

การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ในโหมดแรงดัน  
และสัญญาณไซน์ในโหมดกระแสที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้

DESIGN OF VOLTAGE-MODE QUADRATURE SINUSOIDAL OSCILLATOR AND  
CURRENT-MODE SINUSOIDAL OUTPUT WITH AMPLITUDE  
CONTROLLABILITY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาด้านหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2558

KMITL-2015-ED-M-232-012

การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ในโหมดแรงดัน  
และสัญญาณไซน์ในโหมดกระแสที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้

DESIGN OF VOLTAGE-MODE QUADRATURE SINUSOIDAL OSCILLATOR  
AND CURRENT-MODE SINUSOIDAL OUTPUT WITH AMPLITUDE  
CONTROLLABILITY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF VOLTAGE-MODE QUADRATURE SINUSOIDAL OSCILLATOR  
AND CURRENT-MODE SINUSOIDAL OUTPUT WITH AMPLITUDE  
CONTROLLABILITY



SASITHON CHANDEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN INDUSTRIAL EDUCATION  
IN ELECTRONICS  
FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION  
KING MONGKUT'INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2015-ED-M-232-012



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์  
ในโหมดแรงดัน และสัญญาณไซน์ในโหมดกระแส  
ที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้  
Design of Voltage-Mode Quadrature  
Sinusoidal Oscillator and Current-Mode Sinusoidal  
Output with Amplitude Controllability

นักศึกษา

นางสาวศศิธร จันดี

รหัสประจำตัว

56603286

ปริญญา

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

อิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย ใจกล้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กิติพงศ์	มะโน	
ผศ.ดร.วินัย	ใจกล้า	
รศ.ดร.พีระวุฒิ	สุวรรณจันทร์	
รศ.ปิยะ	ศุภราสุวัฒน์	
ดร.ภมร	ศิลาพันธ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ

18 พฤศจิกายน 2558 เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ

ณ ห้องเรียนปริญญาเอก คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมรับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์)

คณบดี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

วันที่...๑๑...เดือน...ธันวาคม...พ.ศ.2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ ในโหมดแรงดันและสัญญาณไซน์ในโหมดกระแสที่ควบคุม ขนาดของสัญญาณได้
นักศึกษา	นางสาวศศิธร จันดี
รหัสประจำตัว	56603286
ปริญญา	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	อิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. วินัย ใจกล้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร. พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ โดยใช้  
อุปกรณ์หลักคือ วงจรขยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำ (VDTA) จำนวนสองตัว เงื่อนไขในการกำเนิด  
สัญญาณและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณสามารถปรับได้เป็นอิสระจากกันด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์  
วงจรที่นำเสนอสามารถให้กำเนิดสัญญาณไซน์ในโหมดแรงดันสองสัญญาณที่มีมุมต่างเฟสกันประมาณ  
90 องศา และให้กำเนิดสัญญาณไซน์ในโหมดกระแสอีกหนึ่งสัญญาณ อีกทั้งสัญญาณกระแสนี้สามารถ  
ควบคุมขนาดของสัญญาณได้ ซึ่งในวงจรประกอบด้วยวงจรถ่ายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำ (VDTA)  
จำนวนสองตัวต่อร่วมกับตัวเก็บประจุจำนวนสองตัวที่ต่อลงกราวด์ทั้งหมด จึงเหมาะสมในการสร้าง  
วงจรรวม จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้พารามิเตอร์ของ TSMC CMOS เทคโนโลยี  
0.25  $\mu\text{m}$  ที่แหล่งจ่ายแรงดัน  $\pm 1.25\text{V}$  พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกันตามที่ได้วิเคราะห์ไว้  
ในทางทฤษฎี

<b>Thesis Title</b>	Design Of Voltage-Mode Quadrature Sinusoidal Oscillator and Current-Mode Sinusoidal Output with Amplitude Controllability
<b>Student</b>	Miss. Sasithon Chandee
<b>Student ID.</b>	56603286
<b>Degree</b>	Master of Science in Industrial Education
<b>Program</b>	Electronics
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Winai Jaikla
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Peerawut Suwanjan

### ABSTRACT

The quadrature sinusoidal oscillator employing two voltage differencing transconductance amplifiers (VDTAs) has been proposed. The condition of oscillation (CO) and frequency of oscillation (FO) can be independently controlled by adjusting the bias current of two VDTAs. The oscillator can provide two output voltages as quadrature waveform and one output current with magnitude controllability. It consists of two VDTAs and two grounded capacitors which is then suitable for IC architecture. The PSPICE simulation results using 0.25 $\mu$ m TSMC CMOS parameters at  $\pm 1.25$  Voltage power supplies have justified the theoretical anticipation.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ จากการได้รับความร่วมมือ ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน บุคคลที่ต้องกล่าวถึงและขอกราบขอบพระคุณเป็นบุคคลแรก คือ ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นผู้ให้ความรู้ แนวคิดทางวิชาการ ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ตั้งแต่ขั้นตอนแรกจนถึงการตรวจทานความเรียบร้อย ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์ พร้อมด้วย รศ.ดร.กิติพงศ์ มะโน ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ เป็นอย่างดีเสมอมา ขอขอบพระคุณ เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านและขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนของสาขาวิชาครุศาสตร์ วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ แก่ผู้เขียนตลอดการศึกษาเล่าเรียน จนสามารถนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน อันเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดู อบรมสั่งสอนผู้เขียนมาเป็นอย่างดี ใ้กำลังใจ ในการดำเนินชีวิต พร้อมให้โอกาสในการศึกษาแก่ผู้เขียนอย่างเต็มที่ เป็นผู้มีพระคุณอย่างหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกถึงพระคุณนี้ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ศศิธร จันดี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วงจรขยายความนำถ่ายอิน.....	6
2.2 วงจรขยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำกระแส.....	8
2.3 หลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณ.....	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ.....	28
3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากอินพุต ไปเป็นกระแสที่เอาต์พุต VDTA.....	32
3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA.....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	42
4.1 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ในโหมดแรงดัน และสัญญาณไซน์ในโหมดกระแสที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	55
5.2 อภิปรายผลงานวิจัย.....	56
5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	58
บรรณานุกรม.....	59
ประวัติผู้แต่ง.....	62
ภาคผนวก.....	63
MOSFET MODEL PARAMETERS.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าขนาดของทรานซิสเตอร์.....	43
5.1 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่มีการนำเสนอไว้แล้วกับงานวิจัยที่นำเสนอ.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 บล็อกไดอะแกรมการกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์.....	3
2.1 วงจรสมมุทธ์ทางอุดมคติ.....	6
2.2 สัญลักษณ์ของ OTA.....	7
2.3 วงจรขยายความนำถ่ายโอนชนิดใช้มอสทรานซิสเตอร์อย่างง่าย.....	7
2.4 สัญลักษณ์ของ VDTA.....	9
2.5 โครงสร้างภายในของVDTA.....	9
2.6 บล็อกไดอะแกรมแสดงองค์ประกอบของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ.....	11
2.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมีการป้อนกลับแบบบวก.....	11
2.8 เกณฑ์ของบาร์คัสเซ่น.....	13
2.9 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ VDTA.....	15
2.10 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ OTA.....	16
2.11 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ OTA.....	17
2.12 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ DVCC .....	18
2.13 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CDTA จำนวน 2 ตัว.....	19
2.14 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CC-CFA จำนวน 2 ตัว.....	20
2.15 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CCII.....	21
2.16 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ DDCC และ VDTA.....	22
2.17 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CCCII.....	23
2.18 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CFTA.....	24
2.19 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ VDTA จำนวน 2 ตัว.....	25
3.1 ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ.....	27
3.2 แผนผังการออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ.....	28
3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอเตรเจอร์ที่นำเสนอ .....	29
3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควอเตรเจอร์ในกรณีที่มีผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝง ในตัว VDTA.....	37
3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควอเตรเจอร์ในกรณีที่มีผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝง ในตัว VDTA เมื่อแทนตัวอุปกรณ์ในวงจรด้วยแอดมิแตนซ์.....	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การต่อใช้งาน CMOS เป็นวงจรถ่ายสัญญาณไซน์แบบควอเทรเจอร์ที่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้ในโปรแกรม PSPICE.....	42
4.2 แรงดันเอาต์พุตที่สถานะเริ่มต้น.....	44
4.3 แรงดันเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัว.....	44
4.4 สเปกตรัมผลการทดสอบวงจรถ่ายสัญญาณที่ความถี่ 2.6445 MHz.....	44
4.5 ผลการทดสอบวงจรถ่ายสัญญาณที่ความถี่ 265.0100 kHz .....	45
4.6 สเปกตรัมผลการทดสอบวงจรถ่ายสัญญาณที่ความถี่ 265.0100 kHz .....	45
4.7 ผลการทดสอบวงจรถ่ายสัญญาณที่ความถี่ 26.6000 kHz .....	45
4.8 สเปกตรัมผลการทดสอบวงจรถ่ายสัญญาณที่ความถี่ 26.6000 kHz.....	46
4.9 การวัดความต่างเฟสแบบลิสซาจัส.....	46
4.10 ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณเมื่อเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและกระแสไบแอส $I_{B2}$ .....	47
4.11 ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณจากการจำลองผลเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี.....	48
4.12 ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณเมื่อคิดค่าความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA เปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี.....	49
4.13 การทดสอบหาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกสัรวมของแรงดันเอาต์พุตที่ 1 .....	50
4.14 การทดสอบหาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกสัรวมของแรงดันเอาต์พุตที่ 2 .....	51
4.15 มุมต่างเฟสของสัญญาณควอเทรเจอร์ .....	52
4.1.6 เอาต์พุตกระแส.....	53
4.17 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตกระแส.....	53
4.18 การควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุตกระแสด้วย $I_{B4}$ .....	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มนุษย์มีการดำเนินชีวิตมาตั้งแต่อดีตกาล ซึ่งในการดำรงชีวิตของมนุษย์นั้นต้องมีการประสบพบเจอกับเรื่องหรือปัญหาต่างๆ ทำให้มนุษย์เกิดความคิด คิดที่จะทำอะไรสักอย่างเพื่อแก้ปัญหาและพัฒนาต่อยอดเพื่อให้สามารถแก้ปัญหาได้ดีกว่าเดิม มนุษย์คิดอยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดสิ่งประดิษฐ์ ในเรื่องต่างๆ เทคโนโลยีเองก็เป็นสิ่งหนึ่งที่เกิดจากความคิดและการพัฒนาขึ้นของมนุษย์ จากอดีตจนถึงปัจจุบัน เทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น วิทยุ โทรทัศน์ เครื่องเสียง คอมพิวเตอร์ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มนุษย์เป็นผู้คิดค้นขึ้นและมีการคิดพัฒนาเทคโนโลยีเหล่านี้ให้ก้าวหน้าขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบวงจรเพื่อให้เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในยุคแรกๆ สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้ถูกคิดค้นขึ้น ในตอนต้นศตวรรษที่ 20 คือยุคของหลอดสุญญากาศ ซึ่งมีขนาดใหญ่ ต่อมาคือยุคของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการสร้างอุปกรณ์แบบดีสครีต และต่อมาคือการพัฒนาการของการผลิตโดยอาศัยเทคโนโลยีของวงจรรวม หรือเรียกว่า ไอซี ซึ่งเป็นการรวมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำไว้ในอุปกรณ์ชิ้นเดียว เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้ พบว่า การทำงานประกอบด้วยภาคต่างๆ อยู่ เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณ วงจรกรองความถี่ ฯลฯ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ อยู่ภายในวงจร เช่น ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน ทราานซิสเตอร์ ไดโอด เป็นต้น วงจรรวมที่ออกแบบต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน อุปกรณ์มีขนาดเล็ก มีการดึงกำลังไฟฟ้าต่ำ ในปัจจุบันมีผู้วิจัยทำการศึกษาค้นคว้า และออกแบบวงจรที่ใช้หลักการใหม่ๆ ขึ้นมามากมาย โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ วงจรมีขนาดเล็กสามารถนำวงจรไปใช้งานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น ทำให้เทคโนโลยีก้าวเข้าสู่ยุคนาโนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงโลกของเทคโนโลยีให้มีความก้าวหน้าอย่างไม่หยุดยั้ง อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาเรื่องขนาดและความซับซ้อน ส่งผลให้วงจรมีการตอบสนองความถี่ที่ดีกว่าเทคโนโลยีแบบเดิม เพิ่มประสิทธิภาพให้มีความสัมพันธ์โดดเด่นกว่าวงจรเดิม เช่น มีความละเอียดแม่นยำในการทำงานมากยิ่งขึ้น มีผลตอบสนองต่อความถี่ในการปฏิบัติงานสูง ใช้อุปกรณ์ให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อช่วยลดการดึงกำลังไฟฟ้า และสามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำลง (มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2547 : 245-248) รวมทั้งทำให้วงจรทำงานได้โดยอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมภายนอกส่งผลน้อยที่สุด เช่น อุณหภูมิ แรงดันไฟเลี้ยง สัญญาณรบกวน เป็นต้น

ในงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ เป็นวงจรที่สำคัญและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างการใช้งาน ได้แก่ ระบบสื่อสาร ระบบเครื่องมือวัด ระบบเครื่องมือแพทย์ ในห้องทดลองอิเล็กทรอนิกส์และระบบประมวลผลสัญญาณ เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปัจจุบันวงจรกำเนิดสัญญาณสามารถพัฒนาเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ในรูปแบบแรงดันและรูปแบบกระแส (Chen, et. al, 1991 : 2056-2059) ลักษณะเด่นของวงจรกำเนิดสัญญาณนิยมให้สามารถกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ได้สองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  หรือที่เรียกว่าสัญญาณควอดเรเจอร์ ซึ่งวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์นี้ได้รับความนิยมในการออกแบบเพื่อนำไปใช้ในระบบสื่อสาร เช่น ในการมอดูเลตสัญญาณ SSB หรือ QAM (Khan and Khawaja, 2000 : 1353-1357) เป็นต้น มีค่าความผิดเพี้ยนทางฮาโมนิกส์รวมน้อยที่สุด สามารถปรับความถี่ได้ในย่านกว้าง รูปสัญญาณมีแอมพลิจูดคงที่ตลอดความถี่ และองค์ประกอบพื้นฐานสำคัญสองส่วน คือ ส่วนที่ให้กำเนิดความถี่ และส่วนที่เป็นเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ สามารถออกแบบให้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ (Condition of Oscillation : CO) และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณ (Frequency of Oscillation : FO) สามารถปรับได้เป็นอิสระจากกันด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

วงจรรวมสำเร็จรูป (Active Building Block : ABB) เป็นวงจรรวมที่ภายในประกอบด้วยทรานซิสเตอร์จำนวนหลายตัวประกอบร่วมกัน สามารถนำมาใช้ในการออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณแบบแอนะล็อกและดิจิตอลได้ (วัลลภ สุระกำพลธร, 2552 : 1) ซึ่งวงจรรวมสำเร็จรูปได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการออกแบบวงจรมากกว่า เมื่อเทียบกับการออกแบบวงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์ อีกทั้งวงจรที่ออกแบบโดยวงจรรวมสำเร็จรูปสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณลักษณะสมบัติของวงจรได้ง่าย เพราะใช้อุปกรณ์จำนวนน้อย โครงสร้างไม่ซับซ้อน จึงทำให้มีผู้นำเสนอหลักการของวงจรรวมสำเร็จรูปไว้หลายรูปแบบ

จากการศึกษาพบว่าได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้วงจรรวมสำเร็จรูปที่แตกต่างกันไป เช่น วงจรขยายความนำถ่ายไอออน (Khan and Khawaja, 2000: 1353-1357) second-generation current conveyors : CCII (Homg, 2005 : 81-92) Current Differencing Transconductance Amplifiers : CDTA (Keskin and Biolek, 2006 : 214 - 218) Current Controlled Current Feedback Amplifiers : CC-CFAs (Kumbun, Silapan, Siripruchyanun and Prommee, 2009 : 542-545) current differencing transconductance amplifiers : CDTAs (Tangsrirat and Tanjaroen, 2010 : 363 - 366) current conveyor II : CCII (Yucel and Yuce, 2014 : 1-9) เป็นต้น แต่วงจรเหล่านั้นยังมีข้อด้อยดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์มีจำนวนมาก
- ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอยซึ่งไม่สะดวกแก่การสร้างวงจรรวม
- ความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณปรับได้ไม่เป็นอิสระจากกัน
- ไม่สามารถปรับแบบอิเล็กทรอนิกส์
- ไม่สามารถกำเนิดสัญญาณไซน์ควอดเรเจอร์
- ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีผู้นำเสนอวงจรรวมสำเร็จรูปที่มีชื่อเรียกว่าวงจรถายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำ (Voltage Differencing Transconductance Amplifier : VDTA) (Yesil et al, 2012) เป็นอุปกรณ์แอกทีฟในโหมดแรงดันและโหมตกระแส สามารถควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมจะนำไปออกแบบวงจรประมวลสัญญาณแอนะล็อก อีกทั้งสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวต้านทานในการออกแบบวงจร โดย VDTA ใช้เพียงตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ ทำให้ใช้อุปกรณ์น้อยชิ้นเหมาะแก่การนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

จากปัญหาที่ได้นำเสนอหลักการข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบวงจรถายผลต่างสัญญาณควอเดรเจอร์ที่สามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้ โดยใช้ VDTA

## 1.2 วัตถุประสงค์

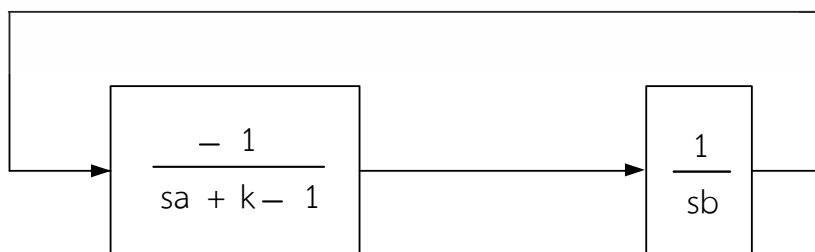
1.2.1 เพื่อออกแบบวงจรถายผลต่างสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ที่สามารถปรับความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาสมรรถนะของวงจรถายผลต่างสัญญาณไซน์ที่ได้ออกแบบ

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรถายผลต่างสัญญาณไซน์ที่ได้ออกแบบไว้ทางทฤษฎีกับการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE

## 1.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย

วงจรถายผลต่างสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ในโหมดแรงดันและสัญญาณไซน์ในโหมตกระแสที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้นี้ มีกรอบแนวคิดในการวิจัย โดยการสังเคราะห์และออกแบบวงจรถายผลต่างสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ตามรูปที่ 1.1 ซึ่งประกอบด้วยวงจรถายผลต่างสัญญาณแบบมีการสูญเสีย (Lossy Integrator) และวงจรถายผลต่างสัญญาณแบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless Integrator) ต่อร่วมกัน



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมการกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1.1 ได้สมการลักษณะสมบัติดังสมการที่ (1.1)

$$s^2 ab + sb(k - 1) + 1 = 0 \quad (1.1)$$

จากสมการที่ (1.1) ได้เงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณดังนี้

$$k = 1 \quad (1.2)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{ab}} \quad (1.3)$$

จากสมการที่ (1.2) และ (1.3) เงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณสามารถปรับได้เป็นอิสระจากกัน โดยที่เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณปรับค่าได้ที่  $k$  และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณปรับค่าได้ที่  $a$  และ  $b$

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดเรเตอร์ที่ออกแบบโดยใช้ VDTA เป็นอุปกรณ์แอกทิฟ จำนวน 2 ตัว

1.4.2 ความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

1.4.3 วงจรสามารถทำงานได้ในย่านความถี่สูงถึงระดับเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

#### 1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.5.1 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเตอร์ (Quadrature Sinusoidal Oscillator) หมายถึง วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ได้สองสัญญาณที่มีความต่างเฟสกัน  $90^\circ$

1.5.2 โหมดแรงดัน (Voltage-mode) หมายถึง วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็นแรงดัน

1.5.3 โหมดกระแส (Current-mode) หมายถึง วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็นกระแส

1.5.4 การควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Control) หมายถึง การปรับ

ค่ากระแสหรือแรงดันจากภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.5 ควบคุมขนาดของสัญญาณ (Amplitude Controllability) หมายถึง เอาต์พุตกระแสสามารถปรับขนาดของสัญญาณได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

1.5.6 วงจรรวมสำเร็จรูป (Active Building Block : ABB) หมายถึง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ที่ภายในของวงจรประกอบด้วยวงจรรย่อยต่างๆ สังเคราะห์และออกแบบโครงสร้างมีขั้วอินพุตและเอาต์พุตไว้สำเร็จและสามารถนำอุปกรณ์แอคทีฟชนิดต่างๆ มาสังเคราะห์ออกแบบให้เป็นโครงสร้างภายในเพื่อให้มีคุณลักษณะสมบัติการทำงานของวงจรมารูปแบบของวงจรรวมสำเร็จรูปชนิดนั้น

1.5.7 การออกแบบ (Design) หมายถึง การนำอุปกรณ์แอคทีฟ VDTA และตัวเก็บประจุมาต่อร่วมกัน เพื่อให้ได้วงจรกำเนิดความถี่แบบคอเดอเรเจอร์ สามารถปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์และสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

1.5.8 โปรแกรม PSPICE หมายถึง โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ได้สังเคราะห์ขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

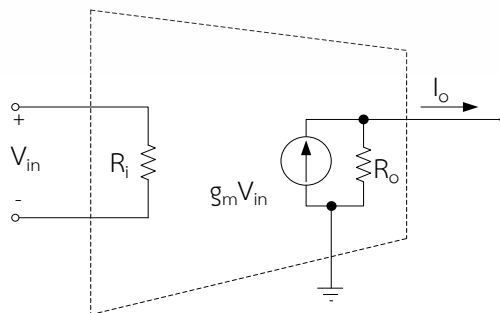
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบวงจรให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ในโหมดแรงดันและสัญญาณไซน์ในโหมดกระแส ที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้ ซึ่งผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบวงจรกิจกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์โดยใช้วงจรขยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำ จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงกลุ่มวงจรและทฤษฎีพื้นฐานรวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

- 2.1 วงจรขยายความนำถ่ายโอน
- 2.2 วงจรขยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำ (VDTA)
- 2.3 หลักการของวงจรกิจกำเนิดสัญญาณ
- 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

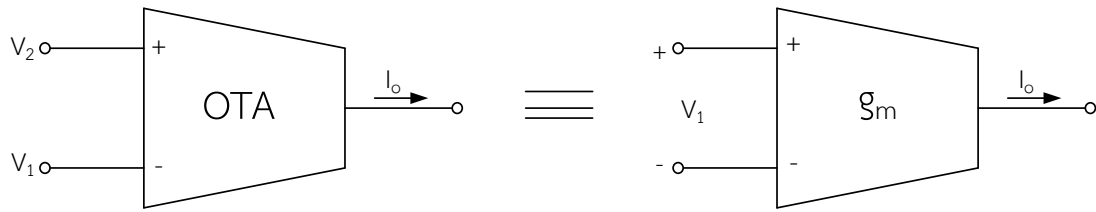
### 2.1 วงจรขยายความนำถ่ายโอน

วงจรขยายความนำถ่ายโอน หรือ OTA จัดเป็นวงจรขยายอีกชนิดหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนผันแรงดันเป็นกระแส จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์แอกทีฟที่มีการทำงานในลักษณะแรงดันควบคุมแหล่งจ่ายกระแส (Voltage Controlled Current Source: VCCS) อัตราการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า เรียกว่า ค่าความนำถ่ายโอน (Transconductance) หรือ  $g_m$  โดยทั่วไป OTA จะสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอยู่ในรูปแบบของวงจรรวมและมีคุณสมบัติพื้นฐานคือ (มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง) ส่วนค่าความนำถ่ายโอนของ OTA สามารถควบคุมได้โดยกระแสไบแอสจากภายนอก สำหรับวงจรสมมูลทางอุดมคติและสัญลักษณ์ของ OTA จะแสดงดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ (มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2551 : 23)



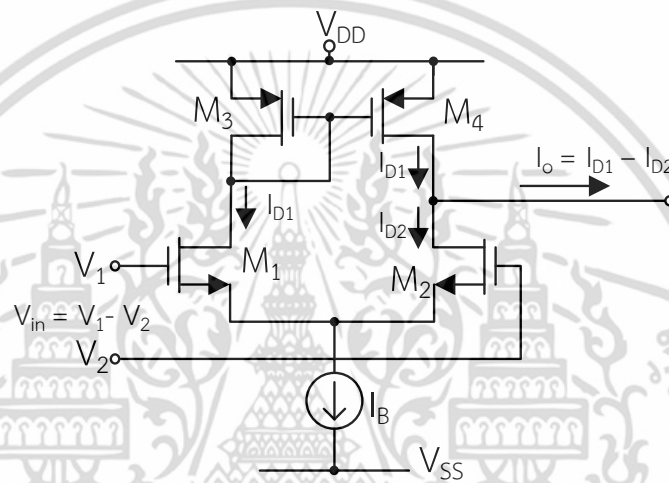
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลทางอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณศึกษาเท่านั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ของ OTA

### 2.1.1 วงจรขยายความนำถ่ายโอนชนิดใช้มอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.3 วงจรขยายความนำถ่ายโอนชนิดใช้มอสทรานซิสเตอร์อย่างง่าย

จากวงจรในรูปที่ 2.3 จะมีมอสทรานซิสเตอร์  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นวงจรขยายความแตกต่างแบบดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส ส่วน  $M_3$  และ  $M_4$  เป็นวงจรสะท้อนกระแส ซึ่งให้อัตราส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่ง โดยมีกระแส  $I_B$  เป็นกระแสไบแอสให้กับวงจร เมื่อป้อนสัญญาณแรงดัน  $V_{in}$  จะทำให้กระแส  $I_{d1}$  และ  $I_{d2}$  ขึ้นที่  $M_1$  และ  $M_2$  ตามลำดับกระแส  $I_{d1}$  ที่ถูกสะท้อนกระแสโดย  $M_3$  และ  $M_4$  เมื่อนำไปลบออกจากค่ากระแส  $I_{d2}$  ที่เกิดขึ้นที่มอสทรานซิสเตอร์  $M_2$  จะได้กระแสจุดออก  $I_o$  มีค่าเท่ากับกระแส  $I_{d1} - I_{d2}$  ซึ่ง OTA มีค่าความนำถ่ายโอนหรือ  $g_m$  ดังสมการที่ (2.1)

$$g_m = \sqrt{\mu_1 C_{ox} (W/L)_B} \quad (2.1)$$

หรือ

$$g_m = \sqrt{kI_B} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$k = \mu_i C_{ox} (W / L)$$

$\mu_i$  คือ ค่าความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ (Mobility)

$C_{ox}$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจาก  $SiO_2$  ระหว่างเกตกับช่องทางเดินกระแสต่อหน่วยพื้นที่ ( $F/m^2$ )

$\frac{W}{L}$  คือ ความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส

จากค่าในสมการที่ (2.2) จะได้ว่าค่า  $g_m$  ของวงจรถูกสร้างขึ้นนั้นสามารถที่จะควบคุมค่าได้ โดยการปรับกระแสไบแอส  $I_B$  แต่การควบคุมโดยตรงนั้นจะทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นระหว่าง  $I_B$  และ  $g_m$

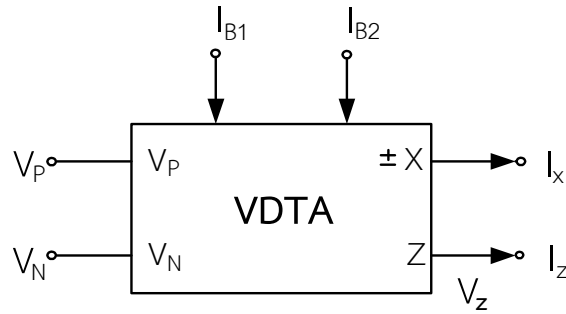
## 2.2 วงจรขยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำ

วงจรถยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำ (Voltage Differencing Transconductance Amplifier : VDTA) (Yesil, et. al. 2011 : 632 – 637) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างมาจาก OTA จำนวน 2 ตัวอยู่ภายใน มี 6 ขั้ว ต่อออกมาภายนอก ในจำนวน 6 ขั้วของ VDTA สามารถแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่ม คือ ขั้วแรงดันขาเข้า 2 ขั้ว  $V_p, V_n$  ขั้วกระแสขาออก 2 ขั้ว  $I_x, I_z$  และขั้วกระแสควบคุม 2 ขั้ว  $I_{B1}, I_{B2}$  โดยสัญลักษณ์และโครงสร้างภายในของ VDTA แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

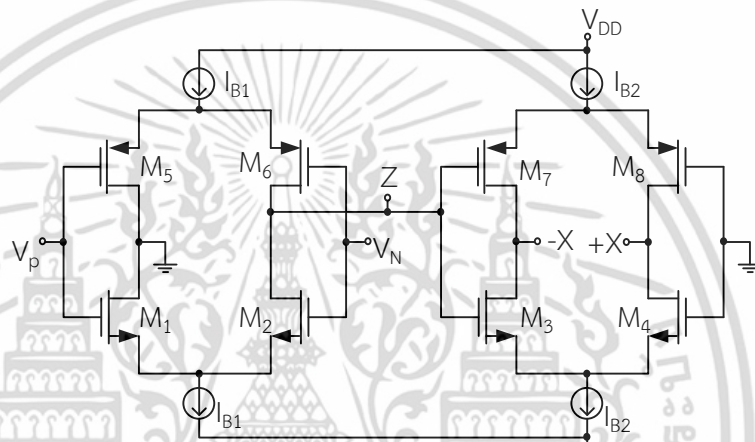
จากสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.4 ขั้ว  $V_p$  และ  $V_n$  เป็นขั้วที่เอาไว้อรับอินพุต ขั้ว  $Z$  และขั้ว  $X$  เป็นขั้วเอาต์พุต และขั้วกระแสควบคุมได้แก่ขั้ว  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  โดยสามารถควบคุมการขยายความนำถ่ายโอนในลำดับที่ 1 โดยกระแสไบแอสภายนอกที่ขั้ว  $I_{B1}$  ส่งผ่านกระแสที่ขั้ว  $Z$  ส่วนการส่งผ่านกระแสที่ขั้ว  $X$  สามารถควบคุมการขยายความนำถ่ายโอนในลำดับที่ 2 โดยกระแสไบแอสภายนอกที่ขั้ว  $I_{B2}$  และทุกขั้วของ VDTA จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก จากคุณลักษณะในอุดมคติที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงด้วยสมการในเชิงเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_z \\ I_{x^+} \\ I_{x^-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{m1} & -g_{gm1} & 0 \\ 0 & 0 & g_{m2} \\ 0 & 0 & -g_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ของ VDTA



รูปที่ 2.5 โครงสร้างภายในของ VDTA

เมื่อ VDTA ที่มีโครงสร้างเป็นมอสทรานซิสเตอร์ (MOS transistor) ความนำถ่ายไอออน  $g_{m1}$  และ  $g_{m2}$  สามารถแสดงได้เป็น

$$g_{m1} = \sqrt{kl_{B1}} \quad (2.4)$$

และ

$$g_{m2} = \sqrt{kl_{B2}} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.4) และ (2.5) พบว่าค่าความนำถ่ายไอออน  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  สามารถควบคุมด้วยกระแสไบแอส  $g_{m1}$  และ  $g_{m2}$  ตามลำดับ หรือที่เรียกว่าการควบคุมด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 หลักการของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ

จีรสุดา เกษร (2542 : 28-33) วงจรถูกกำเนิดสัญญาณ (Oscillator circuit) เป็นวงจรถูกหนึ่งที่มีความสำคัญในทางอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร วงจรถูกกำเนิดสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกันคือ วงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal waveform) และวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปอื่นๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณไซน์ (Non-Sinusoidal Waveform) วงจรถูกกำเนิดสัญญาณจะทำหน้าที่ผลิตสัญญาณที่ขั้วขาออกที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างคงที่ ถ้าสัญญาณที่ขั้วขาออกนั้นคือสัญญาณไซน์ เราเรียกวจรถูกนี้ ว่าวงจรถูกออสซิลเลตสัญญาณไซน์ ถ้าแรงดันที่ขั้วขาออกมีการเพิ่มขึ้นไปที่ระดับแรงดันหนึ่งอย่างรวดเร็วและหลังจากนั้นก็ลดลงอย่างรวดเร็วไปที่ระดับแรงดันที่ต่ำกว่า เราจะเรียกวจรถูกที่ผลิตสัญญาณอย่างนี้ว่าวงจรถูกพัลส์หรือวงจรถูกออสซิลเลตสัญญาณสี่เหลี่ยม

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่เป็นที่รู้จักกันดีมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ วงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบคริสตัล (Crystal oscillator) วงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส (Phase shift oscillator) วงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบวินบริดจ์ (Wien-bridge oscillator) วงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิทซ์ (Colpitts oscillator) วงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบควอเดรเจอร์ หรือวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบฮาร์ทลีย์ (Hartley oscillator) เป็นต้น รูปแบบของสัญญาณที่สร้างขึ้นจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบต่างๆ ก็มีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น สัญญาณไซน์ สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม สัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณฟันเลื่อย ฯลฯ ในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการเกี่ยวกับวงจรถูกกำเนิดสัญญาณไซน์ ซึ่งเป็นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับวงจรถูกที่นำเสนออยู่ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เท่านั้น

ซึ่งการออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณนั้น ผู้ออกแบบต้องศึกษาถึงองค์ประกอบ พร้อมทั้งทำความเข้าใจในหลักการทำงานที่สำคัญของวงจรถูก และคำนึงถึงเงื่อนไขที่สำคัญในการออกแบบของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณด้วย

### 2.3.1 องค์ประกอบของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ

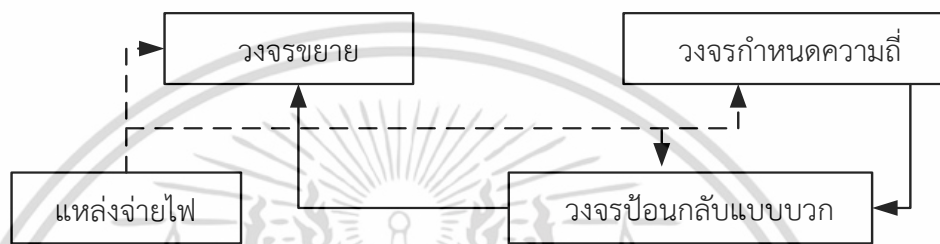
องค์ประกอบหลักที่สำคัญของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่จำเป็นนั้น สามารถแยกออกได้เป็นดังนี้

1. ตัวกำเนิดพลังงาน (Energy source) ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟ แบตเตอรี่ โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่มีศักดาคงที่ ใช้จ่ายไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรถูกเป็นสำคัญ
2. วงจรถูกกำเนิดความถี่ (Frequency-determining circuit) ในการกำเนิดสัญญาณ วงจรถูกกำเนิดความถี่นี้ จะเป็นวงจรถูกที่สามารถใช้เลือกความถี่ได้ ในลักษณะที่เป็นวงจรถูกกรองแบบแถบความถี่ผ่านซึ่งอาจจะได้แก่ วงจรถูกจูนแบบ LC, วงจรถูกจูนแบบ RC หรือ แบบคริสตัล เป็นต้น
3. วงจรถูกขยาย (Amplifier circuit) เป็นวงจรถูกประเภทแอกทิฟ ซึ่งอาจจะเป็นวงจรถูกขยายแบบทรานซิสเตอร์ แบบเฟสหรือวงจรถูกขยายที่อยู่ในรูปของไอซีอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ ซึ่งจะทำหน้าที่ดำรง

การกำเนิดของสัญญาณไว้ด้วยการชดเชยพลังงานในส่วนที่สูญเสียไปภายในวงจรกำเนิดสัญญาณให้มีค่าคงตัวอยู่เช่นเดิมโดยอัตโนมัติ

4. วงจรป้อนกลับแบบบวก (Positive feedback circuit) เป็นวงจรที่จะนำสัญญาณจากทางด้านขาออกของวงจรกำเนิดสัญญาณกลับไปยังด้านขาเข้าของวงจร โดยสัญญาณทางด้านขาออกที่ป้อนกลับไปสู่ด้านขาเข้าของวงจรมันจะต้องจัดให้มีเฟส ตรงกันกับเฟสของวงจรทางด้านขาเข้าทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดการเสริมสัญญาณกันขึ้น เพื่อจะทำให้สัญญาณคงตัวอยู่ได้

ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 4 ข้อ จัดประกอบกันได้ดังไดอะแกรมในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมแสดงองค์ประกอบของวงจรกำเนิดสัญญาณ

### 2.3.2 เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณของวงจร

วงจรกำเนิดสัญญาณนั้นจัดเป็นโครงข่ายแบบป้อนกลับแบบหนึ่ง ซึ่งมีการป้อนกลับแบบบวกสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมองค์ประกอบการไหลวนของสัญญาณได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่มีการป้อนกลับแบบบวก

สัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ในวงจรเป็นดังต่อไปนี้

$x_i$  คือ สัญญาณทางด้านขาเข้าของวงจร

$x_o$  คือ สัญญาณทางด้านขาออกของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $x_e$  คือ สัญญาณผลรวมระหว่างสัญญาณทางด้านขาเข้าและสัญญาณป้อนกลับ  
 มีค่าเท่ากับ  $x_i + x_f$
- $x_f$  คือ สัญญาณป้อนกลับ
- $A(j\omega)$  คือ ค่าเกณฑ์ของวงจรถยาย
- $B(j\omega)$  คือ ค่าเกณฑ์ของวงจรถายกำหนดความถี่

จากบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.7 จะได้ว่า

$$x_e = x_i + x_f \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$x_f = B(j\omega)x_o \quad (2.7)$$

และ

$$x_o = A(j\omega)x_e \quad (2.8)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.7) และ (2.8) ลงใน (2.6) ตามลำดับและเมื่อปรับรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{x_o}{x_i} = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)} \quad (2.9)$$

ในการกำเนิดสัญญาณนั้น วงจรจะต้องสามารถสร้างสัญญาณทางด้านขาออกได้โดยที่ไม่มีสัญญาณทางด้านขาเข้าซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวจะเป็นจริงได้ก็คือค่าเกณฑ์ขยายมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) นั่นคือค่าส่วนของสมการที่ (2.9) จะต้องมีค่าเป็นศูนย์ กล่าวคือ

$$1 - A(j\omega)B(j\omega) = 0 \quad (2.10)$$

โดยเมื่อเงื่อนไขตามสมการที่ (2.10) เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งความถี่ค่าหนึ่ง (สมมติว่าเป็นที่ค่าความถี่  $\omega_0$ ) ก็แสดงว่าจะเกิดการให้กำเนิดสัญญาณที่มีความถี่นั้นขึ้น เกณฑ์การตรวจสอบที่สำคัญที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ เกณฑ์ของบาร์คฮูเซน (Barkhusen criterion) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่รู้จักกันดีในการออกแบบสร้างวงจรถายกำเนิดสัญญาณ เกณฑ์ดังกล่าวมีนัยที่กล่าวได้โดยสรุปดังนี้คือ

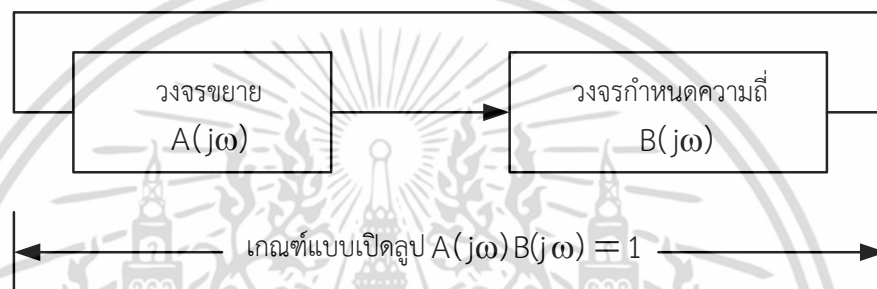
“วงจรถายกำเนิดสัญญาณที่จะสามารถกำเนิดสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องนั้นจะต้องมีเกณฑ์แบบเปิดรูปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Openloopgain) เป็นค่าจริงเท่ากับหนึ่ง” นั่นคือเราจะได้เงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณแยกเป็นสองเงื่อนไขที่จะต้องเกิดพร้อมกันคือ

$$[A(j\omega_0)B(j\omega_0)] = 1 \quad (2.11)$$

และมีค่าเฟส  $\arctan [A(j\omega_0)B(j\omega_0)] = 0$  หรือ  $2n\pi$  ( $n =$  เลขจำนวนเต็ม)

ซึ่งในการรักษาค่าเกณฑ์แบบเปิดลูปของวงจรให้มีค่าเท่ากับหนึ่งนั้น ก็เพื่อเป็นการรักษาการกำเนิดสัญญาณให้คงที่อยู่ตลอดไปนั่นเอง ความหมายของเงื่อนไขบาร์คัสเช่นอาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมเกณฑ์ของบาร์คัสเช่น

โดยการป้อนกลับแบบบวกจะทำให้เกณฑ์แบบปิดลูป (Closed loop Gain) ของวงจรมีค่ามากขึ้น และถ้าเกณฑ์แบบเปิดลูปของวงจรมีค่าเป็นหนึ่งก็จะทำให้เกณฑ์แบบปิดลูปของ วงจรค่าเป็นอนันต์ ซึ่งจะเห็นได้โดยการแทนสมการที่ (2.11) ลงในสมการ (2.9) คือ

$$\frac{X_o}{X_i} = \frac{A(j\omega)}{1-1} = \infty \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเกณฑ์แบบเปิดลูปของวงจรมีค่าเท่ากับหนึ่งแล้ว จะทำให้เกณฑ์แบบปิดลูปของวงจรมีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งหมายความว่าแม้ไม่มีสัญญาณทางด้านขาเข้า  $x_i = 0$  วงจรนี้ก็อาจสามารถสร้างสัญญาณทางด้านขาออกได้ คือ วงจรจะสามารถให้กำเนิดสัญญาณขึ้นมาได้นั่นเอง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินี้วงจรดังกล่าวจะอาศัยสัญญาณรบกวน(Noise Signal) เป็นสัญญาณเริ่มต้นทางด้านขาเข้าให้กับวงจรซึ่งสัญญาณรบกวนนี้อาจจะมาจากแหล่งกำเนิดใดๆ ก็ได้ เช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมาจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรเอง เป็นต้น

อย่างไรก็ตามเพื่อพิจารณากันโดยธรรมชาติแล้วนั้น วงจรกำเนิดสัญญาณโดยทั่วไปนั้นจะเป็นวงจรประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear circuit) หากแต่การวิเคราะห์วงจรนั้นได้ใช้หลักการการ

วิเคราะห์แบบเป็นเชิงเส้นดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นเงื่อนไขที่ได้จึงสามารถที่จะกำหนดได้แต่เพียงความถี่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณเท่านั้น แต่จะไม่สามารถกำหนดขนาดของสัญญาณที่กำเนิดขึ้นได้ ดังจะเห็นได้จากเกณฑ์การตรวจสอบของบาร์คูลูเซ่นที่กล่าวไว้ว่า ณ ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณจะมีค่าเฟสของสัญญาณเท่ากับ  $2n\pi$  (เป็นเลขจำนวนเต็ม)

สำหรับการควบคุมขนาดของสัญญาณที่ถูกกำเนิดขึ้นมานั้นที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธีคือ

1. ทำได้โดยการเพิ่มวงจรในส่วนที่ทำหน้าที่รักษาระดับของสัญญาณ
2. ใช้หลักการของการจำกัดขนาดด้วยตัวเอง (Self-limiting) ของอุปกรณ์ภายในวงจร เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์ (Transistor) ในขณะที่เริ่มต้นเมื่อสัญญาณมีค่าต่ำ ทรานซิสเตอร์จะมีค่าเกณฑ์สูง ทำให้ค่าลูปเกณฑ์ของวงจรจะมีค่ามากกว่า 1 ณ ตำแหน่งความถี่ที่มีค่าเฟสเท่ากับ  $2n\pi$  แต่เมื่อขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มอิ่มตัว (Saturate) ทำให้ทรานซิสเตอร์มีเกณฑ์ลดลงซึ่งจะทำให้ลูปเกณฑ์ของวงจรจะลดลงจนกระทั่งทำให้สัญญาณมีขนาดที่คงที่ได้ในที่สุด

### 2.3.3 หลักการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณ

การทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณนั้นอาจสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สภาวะ คือ

#### 1. สภาวะเริ่มต้นการทำงานของวงจร (First Turn-On)

สภาวะเริ่มต้นการทำงานของวงจรจะเกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกำลังงานให้แก่วงจร ซึ่งการจ่ายกำลังงานจากแหล่งพลังงานภายนอกให้แก่วงจรอย่างทันทีทันใดนี้ จะทำให้เกิดสภาวะเปลี่ยนย้าย (Transition) ขึ้นทำให้มีสเปกตรัมของสัญญาณเกิดกระจายขึ้นอย่างมากมาย อย่างไรก็ตามเนื่องจากวงจรกำเนิดสัญญาณนั้นจะมีวงจรกำหนดความถี่อยู่ภายใน ดังนั้น จึงมีความถี่เพียงความถี่เดียวเท่านั้นที่โดดเด่นและจะถูกเลือกให้ถูกป้อนย้อนกลับในกระบวนการป้อนกลับ ทำให้เกิดการพิกัดเป็นความถี่ของสัญญาณที่จะปรากฏเป็นสัญญาณขาออกของวงจร

#### 2. สภาวะการสร้างสัญญาณ (Signal build up)

เมื่อความถี่ของสัญญาณที่กำเนิดขึ้นถูกกำหนดความถี่โดยวงจรกำหนดความถี่แล้ว สัญญาณทางด้านขาออกจะถูกนำกลับไปยังด้านขาเข้าของวงจร ซึ่งสัญญาณจะถูกจัดโดยวงจรให้มีเฟสตรงกันเพื่อเป็นการเสริมสัญญาณให้มีกำลังมากยิ่งขึ้น

#### 3. สภาวะรักษารสร้างสัญญาณ (Sustained oscillation)

การรักษารสร้างสัญญาณให้คงอยู่นั้นจะเป็นไปตามเงื่อนไขของบาร์คูลูเซ่น คือ ผลคูณค่าเกณฑ์ของวงจรขยาย และวงจรป้อนกลับจะต้องมีค่าเท่ากับหนึ่งในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัตินั้นค่าเกณฑ์รวมของระบบจะต้องมีค่ามากกว่าหนึ่งเล็กน้อยในสถานะเริ่มแรก ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการชดเชยการลดทอนสัญญาณที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในวงจรและจะใช้ลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณมีค่ามากมาเป็นตัวรักษาลูปเกณฑ์ให้เท่ากับหนึ่งเพื่อเป็นตัวมาจำกัดขนาดของสัญญาณที่ได้ออกมา

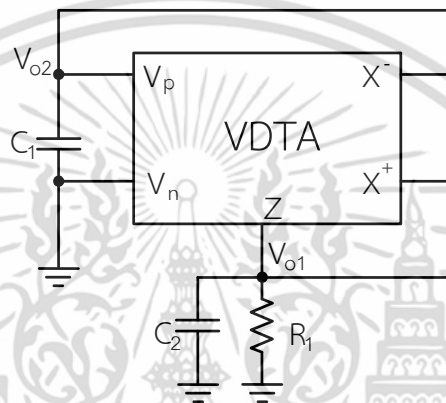
## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้มีการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นอย่างละเอียดไปแล้ว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่ได้มีผู้นำเสนอมาพอสังเขปดังนี้

#### 2.4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ VDTA ตัวเดียว

Srivastava (2014 : 1501-1507) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ VDTA ตัวเดียว ดังรูปที่ 2.9 ประกอบไปด้วย VDTA จำนวน 1 ตัวและอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 3 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.14)



รูปที่ 2.9 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ VDTA

$$s^2 + s \frac{1}{C_2} \left( \frac{1}{R_1} - g_{m2} \right) + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} = 0 \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.13) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$\frac{1}{R_1} = g_{m2} \quad (2.14)$$

ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

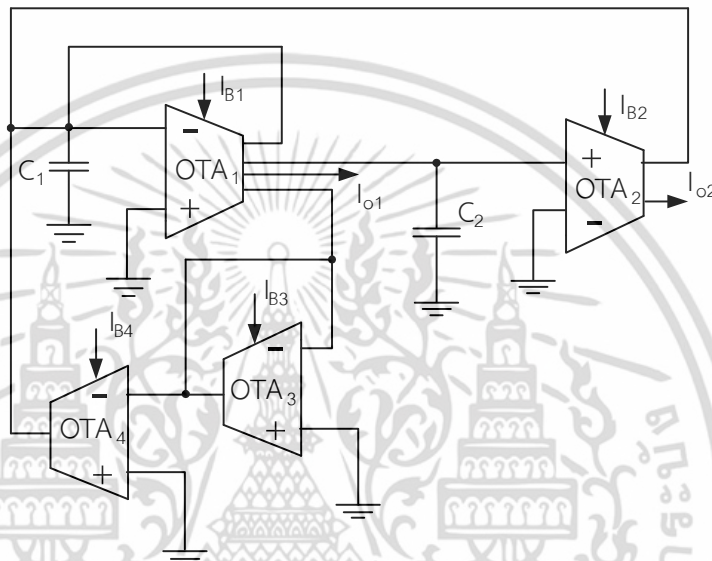
$$\omega = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.9 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้เป็นอิสระจากกัน ข้อด้อย คือ ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

#### 2.4.2 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ OTA จำนวน 4 ตัว

Summart, et. al. (2012 : 14-17) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ OTA ดังรูปที่ 2.10 ประกอบไปด้วย OTA จำนวน 4 ตัวและอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 2 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.16)



รูปที่ 2.10 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ OTA

$$s^2 + s \left( \frac{g_{m3} - g_{m4}}{g_{m3} C_1} \right) + \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} = 0 \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$g_{m3} = g_{m4} \quad (2.17)$$

ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$\omega = \sqrt{\frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (2.18)$$

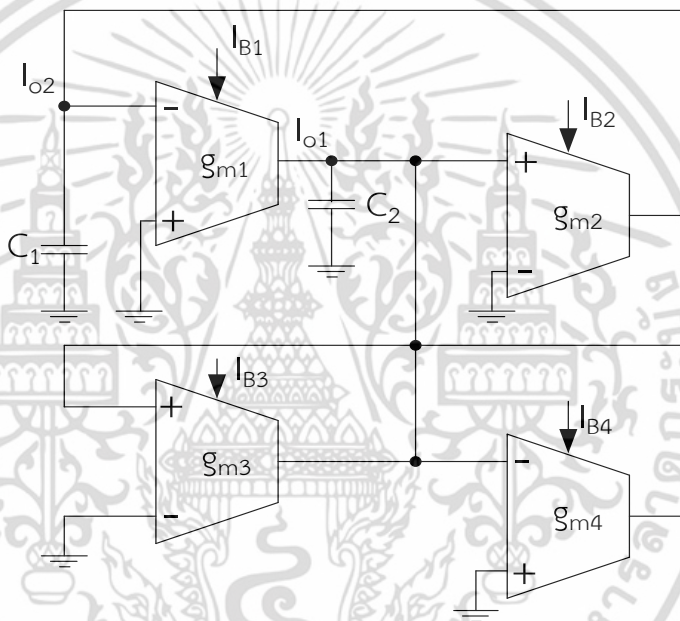
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์ ความต้านทานเอาต์พุตสูงจึงสามารถขับโหลดได้โดยตรง สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้เป็นอิสระจากกัน ข้อด้อย คือ ใช้อุปกรณ์จำนวนมาก ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

### 2.4.3 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอเตรเจอร์ทำงานในโหมดกระแสด้วย

#### วงจรความนำถ่ายโอน

สมศักดิ์ สมบูรณ์ และคณะ (2556 : 625-633) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ OTA ดังรูปที่ 2.11 ประกอบไปด้วย OTA จำนวน 4 ตัว และตัวเก็บประจุภายนอกอีก 2 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.19)



รูปที่ 2.11 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ OTA

$$s^2 + s \left( \frac{g_{m4} - g_{m3}}{C_2} \right) + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} = 0 \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$g_{m4} = g_{m3} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

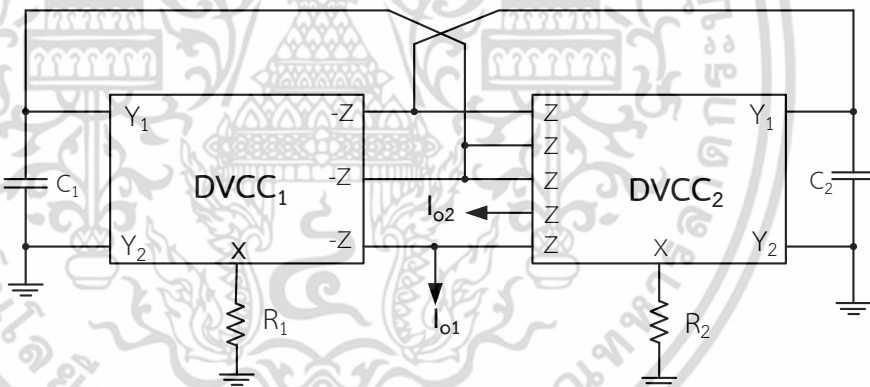
ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$\omega = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (2.21)$$

จากรูปที่ 2.11 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้เป็นอิสระจากกัน และสามารถปรับความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ข้อด้อย คือ ใช้อุปกรณ์จำนวนมาก ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

#### 2.4.4 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดเรเจอร์ทำงานในแบบสัญญาณกระแสด้วยวงจร DVCC

มนตรี คำเงิน และกอบชัย เดชหาญ (2551 : 13-18) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ DVCC จำนวน 2 ตัว ดังรูปที่ 2.12 ประกอบไปด้วย DVCC จำนวน 2 ตัว ตัวเก็บประจุภายนอกอีก 2 ตัว และตัวต้านทานที่ต่อลงกราวด์ 2 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.22)



รูปที่ 2.12 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ DVCC

$$s^2 + s \left( \frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_2 R_2} \right) + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} = 0 \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

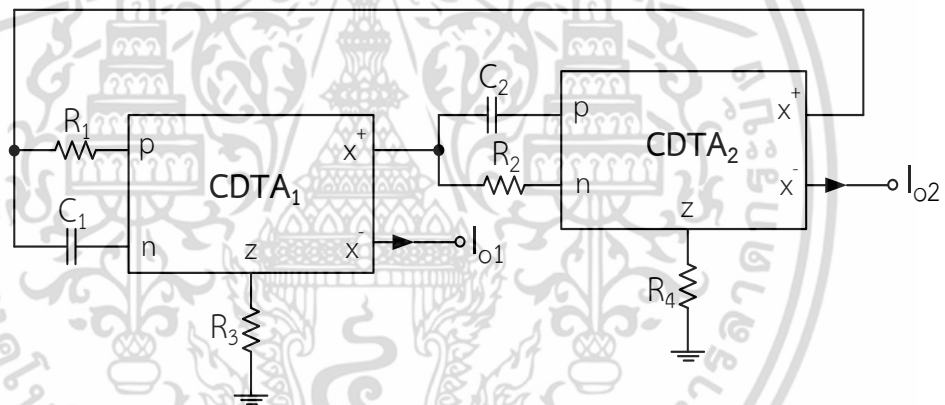
ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.24)$$

จากรูปที่ 2.12 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ ความถี่ต้านทานเอาต์พุตสูงจึงสามารถขับโหลดได้ ข้อด้อย คือ ไม่สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้เป็นอิสระจากกัน และไม่สามารถปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณ

#### 2.4.5 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CDTA จำนวน 2 ตัว

Keskin and Biolek (2006 : 214-218) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CDTA ดังรูปที่ 2.13 ประกอบไปด้วย CDTA จำนวน 2 ตัว และอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 6 ตัวจากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.25)



รูปที่ 2.13 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CDTA จำนวน 2 ตัว

$$s^2(k_1 k_2 + 1) + 2s a_1 a_2 (1 - k_1 k_2) + (k_1 k_2 + 1) a_1 a_2 = 0 \quad (2.25)$$

เมื่อ  $k_1 = g_{m1} R_3$ ,  $k_2 = g_{m2} R_4$ ,  $a_1 = \frac{1}{R_1 C_1}$  และ  $a_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$  จากสมการที่ (2.25) จะได้เงื่อนไขใน

การกำเนิดสัญญาณเป็น

$$g_{m1} g_{m2} R_3 R_4 = 1 \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

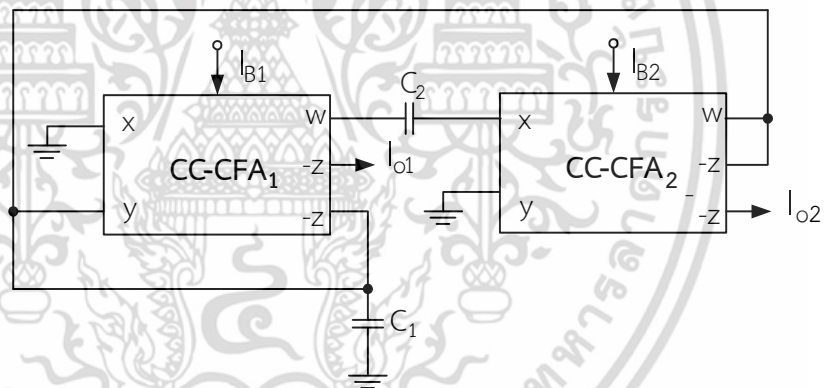
ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_3 R_4}} \quad (2.27)$$

จากรูปที่ 2.13 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ ความต้านทานเอาต์พุตสูง จึงสามารถขับโหลดได้โดยตรง สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้เป็นอิสระจากกัน ข้อด้อย คือ ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอย ไม่สามารถปรับความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณ

#### 2.4.6 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CC-CFA จำนวน 2 ตัว

Kumbun, et. al. (2009 : 542-545) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CC-CFA ดังรูปที่ 2.14 ประกอบไปด้วย CC-CFA จำนวน 2 ตัวและอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 2 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.28)



รูปที่ 2.14 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CC-CFA จำนวน 2 ตัว

จากรูปที่ 2.14 เมื่อ  $R_{x1} = R_{x2} = R_x$  และ  $C_1 = C_2 = C$  สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$s^2 + \frac{s}{R_x C} (2 - k) + \frac{1}{R_x^2 C^2} = 0 \quad (2.28)$$

โดยที่  $R_x$  คือ ความต้านทานอินพุต ที่ขั้ว x ของ CC-CFA

จากสมการที่ (2.28) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (2.29)

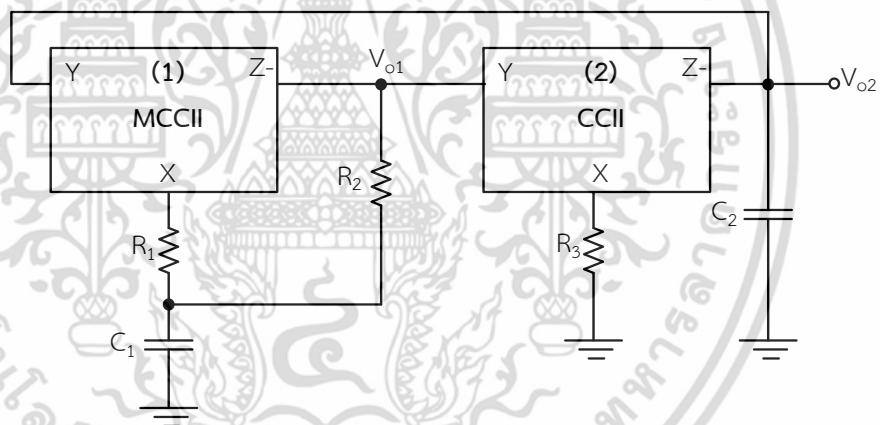
ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$\omega = \frac{1}{R_x C} \quad (2.30)$$

จากรูปที่ 2.14 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์ ความต้านทานเอาต์พุตสูงจึงสามารถขับโหลดได้โดยตรง สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้เป็นอิสระจากกัน ข้อด้อย คือ ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอย ไม่สามารถปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณ

#### 2.4.7 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CCII

Yucel and Yuce (2014 : 1-9) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CCII ดังรูปที่ 2.15 ประกอบไปด้วย CCII จำนวน 2 ตัวและอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 5 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัตินี้ ได้ดังสมการที่ (2.31)



รูปที่ 2.15 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CCII

$$s^2 C_1 C_2 R_1 R_3 + s(C_2 R_3 - C_1 R_2) + 1 = 0 \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.31) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$C_2 R_3 = C_1 R_3 \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

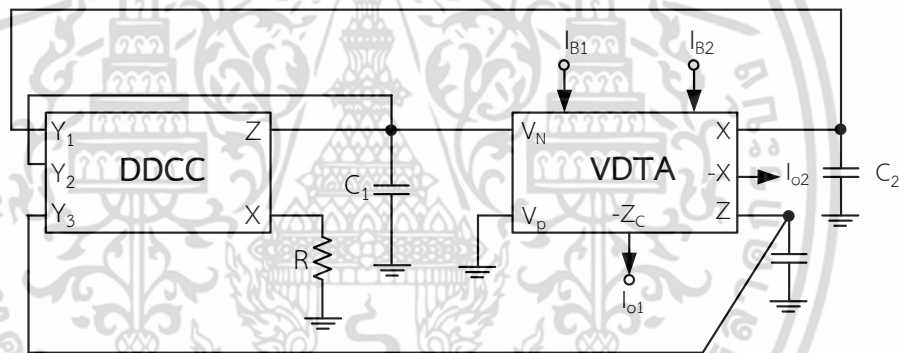
ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_3}} \quad (2.33)$$

จากรูปที่ 2.15 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้เป็นอิสระจากกัน ข้อด้อย คือ ใช้อุปกรณ์จำนวนมาก ไม่สามารถปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

#### 2.4.8 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ DDCC จำนวน 1 ตัว และ VDTA จำนวน 1 ตัว

Phanruttanachai and Jaikla (2013 : 398-401) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ DDCC และ VDTA ดังรูปที่ 2.16 ประกอบไปด้วย DDCC จำนวน 1 ตัว VDTA จำนวน 1 ตัว และอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 4 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.34)



รูปที่ 2.16 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ DDCC และ VDTA

$$s^3 + bs^2 + as + ck = 0 \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) จะได้เงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$ab = ck \quad (2.35)$$

และ

$$\omega = \sqrt{a} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $a = c = \frac{g_{m1}}{C_1 C_2 R}$ ,  $b = \frac{C_2}{g_{m1}}$  และ  $k = \frac{g_{m2}}{C_3}$  จะได้เงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$\frac{1}{C_1 R} = \frac{g_{m2}}{C_3} \quad (2.37)$$

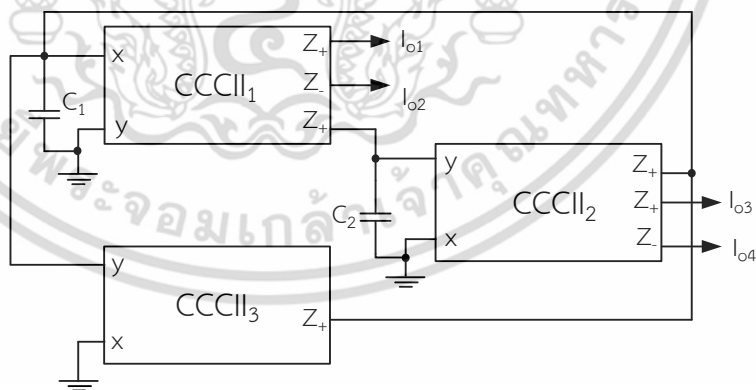
และ

$$\omega = \sqrt{\frac{g_{m1}}{C_1 C_2 R}} \quad (2.38)$$

จากรูปที่ 2.16 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้เป็นอิสระจากกัน ความต้านทานเอาต์พุตสูงจึงสามารถขับโหลดได้โดยตรง ข้อด้อย คือ ใช้อุปกรณ์จำนวนมาก ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

#### 2.4.9 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CCCII จำนวน 3 ตัว

ศักดิ์สิทธิ์ สุ่มมาตย์ และชาญชัย ทองโสภณ (2013 : 117-123) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CCCII ดังรูปที่ 2.17 ประกอบไปด้วย CCCII จำนวน 3 ตัวและอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 2 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.39)



รูปที่ 2.17 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CCCII

$$s^2 + s \left( \frac{R_{x3} + R_{x1}}{R_{x1} R_{x3} C_1} \right) + \frac{1}{C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}} = 0 \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.39) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$R_{x3} = R_{x1} \quad (2.40)$$

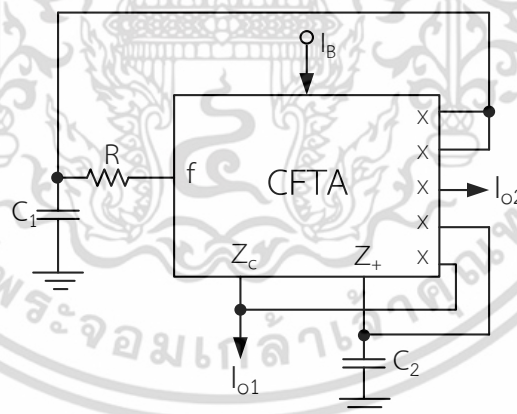
ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}}} \quad (2.41)$$

จากรูปที่ 2.17 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้เป็นอิสระจากกัน ข้อด้อย คือ ใช้อุปกรณ์จำนวนมาก ไม่สามารถปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

#### 2.4.10 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CFTA เพียงตัวเดียว

Maneewan, et. al. (2011 : 312-315) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CFTA ดังรูปที่ 2.18 ประกอบไปด้วย CFTA จำนวน 1 ตัวและอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 3 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.42)



รูปที่ 2.18 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ CFTA

$$s^2 C_1 C_2 R + s(C_2 - C_1 g_m R) + g_m = 0 \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.42) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C_1}{C_2} = Rg_m \tag{2.43}$$

ถ้ากำหนดให้  $C_1 = C_2$  จะได้  $g_m = \frac{1}{R}$  (2.44)

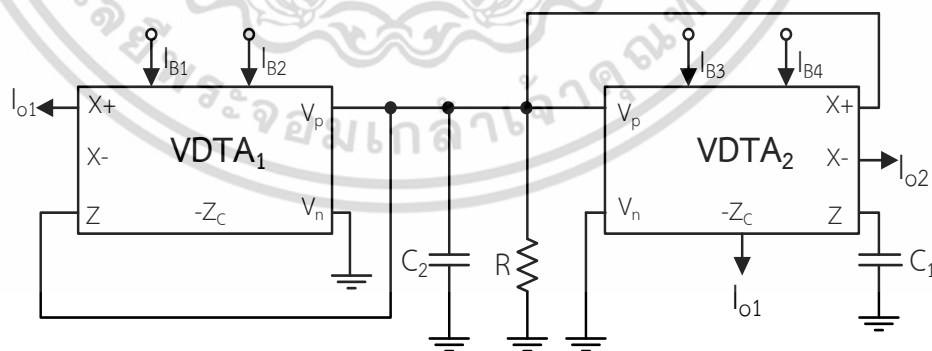
ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$\omega = \sqrt{\frac{g_m}{RC_1C_2}} \tag{2.45}$$

จากรูปที่ 2.18 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ สามารถปรับความถี่และเฟสได้ใน การกำเนิดสัญญาณได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ให้เอาต์พุตกระแสสองเอาต์พุต ข้อด้อย คือ ความถี่และเฟสในการกำเนิดสัญญาณไม่สามารถปรับได้เป็นอิสระจากกัน ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

### 2.4.11 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ VDTA จำนวน 2 ตัว

สุดที่รัก ชูเจริญ (2557 : 38-42) ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ VDTA ดังรูปที่ 2.19 ประกอบไปด้วย VDTA จำนวน 2 ตัวและอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 3 ตัว จากวงจรสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติ ได้ดังสมการที่ (2.46)



รูปที่ 2.19 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ VDTA

$$s^2 C_1 C_2 R + s C_1 - s C_1 g_{m1} R + g_{m3} g_{m4} R = 0 \tag{2.46}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.46) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$1 = g_{m1}R \quad (2.47)$$

ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$\omega = \sqrt{\frac{g_{m3}g_{m4}}{C_1C_2}} \quad (2.48)$$

จากรูปที่ 2.19 ข้อดี คือ ให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ ความถี่และเงื่อนไขสามารถปรับได้เป็นอิสระจากกันด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ให้เอาต์พุตกระแสสองเอาต์พุตและสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้ ข้อด้อย คือ ใช้อุปกรณ์จำนวนมาก

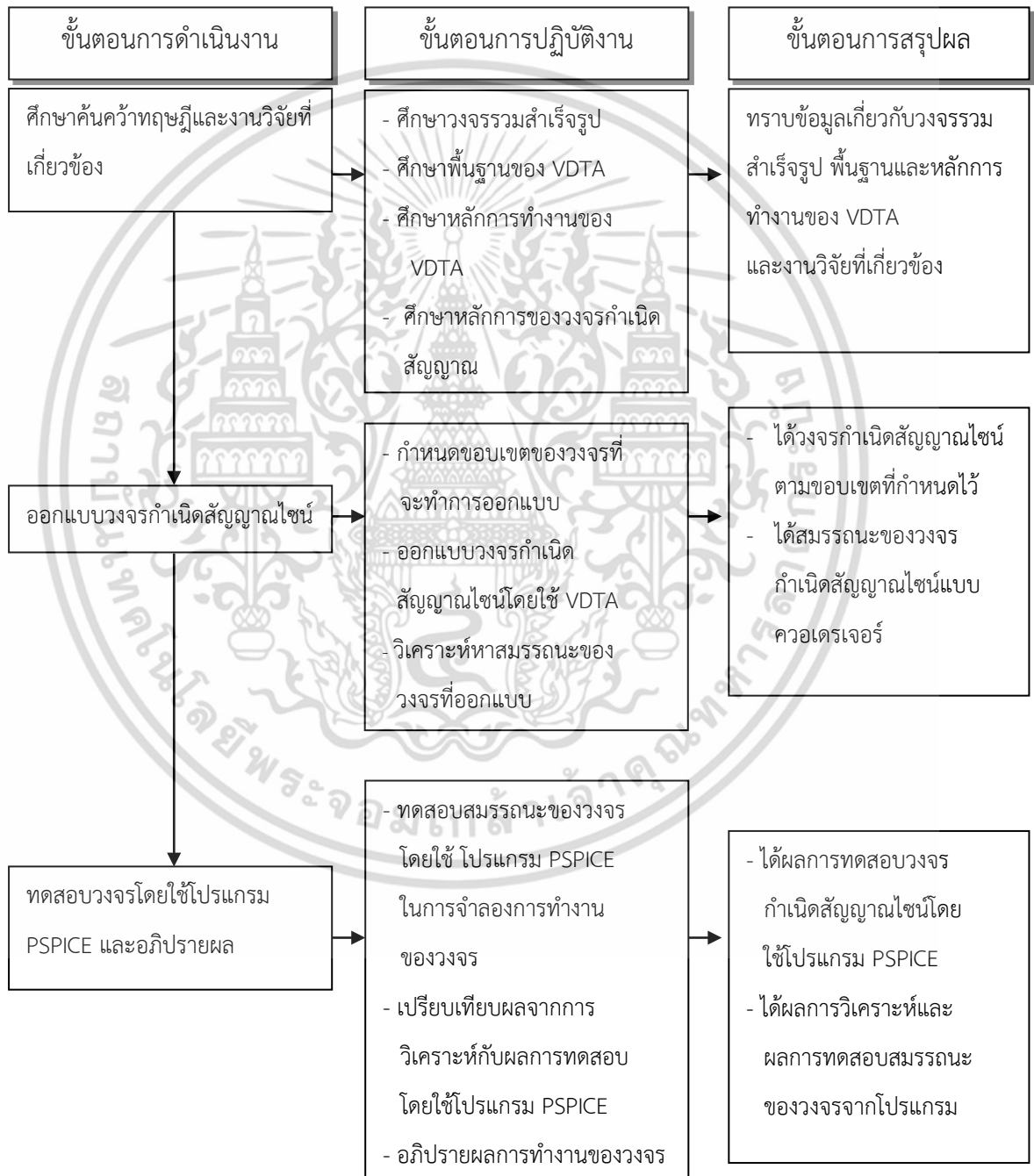


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

หลังจากที่ได้มีศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 แล้ว ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้ VDTA เป็นอุปกรณ์หลัก มีแผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1

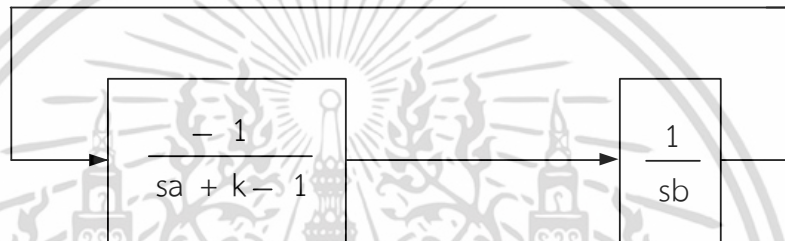


**รูปที่ 3.1** ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ

ดังที่กล่าวมาแล้ววงจรถูกกำเนิดสัญญาณโหมดแรงดันที่ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ มีหลักการพื้นฐานสำคัญของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ VDTA ซึ่งรายละเอียดของ VDTA ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาประกอบร่วมกันเป็นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณตามหลักการของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ สำหรับรายละเอียดของการออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณจะได้กล่าวถึงในหัวข้อนี้

หลักการสังเคราะห์วงจรประกอบไปด้วยวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ 2 ส่วน ได้แก่ วงจรถูกอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย (Lossy integrator) ต่อร่วมกับวงจรถูกอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย (Lossless integrator) แสดงแผนผังการทำงานในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังการออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ

จากแผนผังในรูปที่ 3.2 สามารถเขียนสมการลักษณะสมบัติ (Characteristic equation) ได้ดังนี้

$$s^2 ab + sb(k - 1) + 1 = 0 \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) จะพบว่าสมการเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation condition: CO) และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation frequency: FO) สามารถแสดงได้เป็น

$$CO: k = 1 \quad (3.2)$$

และ

$$FO: \omega = \sqrt{\frac{1}{ab}} \quad (3.3)$$

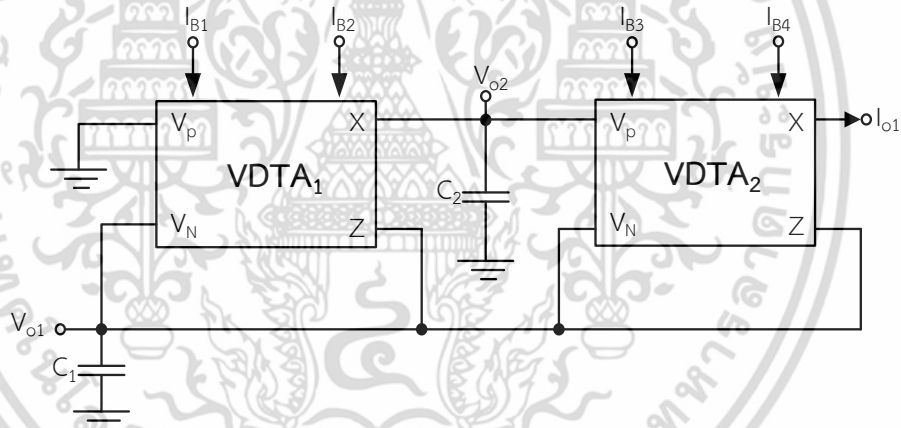
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\omega = 2\pi f$  จากสมการที่ (3.3) จะได้

$$FO : f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{ab}} \tag{3.4}$$

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบจากอุปกรณ์แอกทีฟ VDTA เป็นหลัก โดยอาศัยหลักการจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.2 จะได้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากรูปพบว่า วงจรประกอบไปด้วย VDTA จำนวน 2 ตัวและตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์จำนวน 2 ตัว จะได้เอาต์พุต  $V_{o1}$  จากขั้ว  $V_N$  ส่วนเอาต์พุต  $V_{o2}$  จากขั้ว X นอกจากนี้ยังให้เอาต์พุตกระแส  $I_o$  เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 3.3 และอาศัยคุณสมบัติของ VDTA ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สามารถเขียนสมการกระแสที่ขั้ว p เมื่อ  $I_p = I_{p1} = I_{p2}$  และ  $I_n = I_{n1} = I_{n2}$

$$I_p = I_n = 0 \tag{3.5}$$



รูปที่ 3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดเรเจอร์ที่นำเสนอ

พิจารณาระแสที่ขั้ว x จะได้

$$I_x = I_{c2} \tag{3.6}$$

เมื่อ  $I_x = g_{m2} V_{o1}$  และ  $I_{c2} = sC_2 V_{o2}$  จากสมการที่ (3.6) จะได้

$$g_{m2} V_{o1} = sC_2 V_{o2} \tag{3.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = \frac{sC_2}{g_{m2}} \quad (3.8)$$

พิจารณากระแสที่ขั้ว n จะได้

$$I_{z1} + I_{z2} - I_{c1} = 0 \quad (3.9)$$

เมื่อ  $I_{z1} = g_{m1}V_{o1}$  ,  $I_{z2} = g_{m3}(V_{o1} - V_{o2})$  และ  $I_{c1} = sC_1V_{o1}$  จากสมการที่ (3.9) จะได้

$$-g_{m1}V_{o1} + g_{m3}(V_{o1} - V_{o2}) - sC_1V_{o1} = 0 \quad (3.10)$$

สามารถจัดสมการที่ (3.10) ได้ดังนี้

$$-g_{m1}V_{o1} + g_{m3}V_{o1} - g_{m3}V_{o2} - sC_1V_{o1} = 0 \quad (3.11)$$

$$V_{o1}(-g_{m1} + g_{m3} - sC_1) = g_{m3}V_{o2} \quad (3.12)$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = \frac{g_{m3}}{-g_{m1} + g_{m3} - sC_1} \quad (3.13)$$

แทนค่าสมการที่ (3.8) ลงในสมการที่ (3.13) จะได้

$$\frac{sC_2}{g_{m2}} = \frac{g_{m3}}{-g_{m1} + g_{m3} - sC_1} \quad (3.14)$$

สามารถจัดสมการที่ (3.14) ได้ดังนี้

$$-sC_2g_{m1} + sC_2g_{m3} - s^2C_1C_2 = g_{m2}g_{m3} \quad (3.15)$$

คูณลบเข้าไปตลอดสมการที่ (3.15) จะได้สมการลักษณะสมบัตินี้

$$s^2C_1C_2 + sC_2(g_{m1} - g_{m3}) + g_{m2}g_{m3} = 0 \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $s = j\omega$  จากสมการที่ (3.16) จะได้

$$-\omega^2 C_1 C_2 + g_{m2} g_{m3} + j\omega(g_{m1} - g_{m3}) = 0 \quad (3.17)$$

เมื่อพิจารณาในส่วนจำนวนจริง (Real part) จะได้ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$\omega = \sqrt{\frac{g_{m2} g_{m3}}{C_1 C_2}} \quad (3.18)$$

สำหรับเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ พิจารณาได้จากส่วนจินตภาพ (Imaginary part)

$$g_{m1} \leq g_{m3} \quad (3.19)$$

เมื่อแทนค่า  $g_{m2} = \sqrt{k I_{B2}}$  และ  $g_{m3} = \sqrt{k I_{B3}}$  จะได้ความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$\omega = \sqrt{\frac{k(I_{B2} I_{B3})^{\frac{1}{2}}}{C_1 C_2}} \quad (3.20)$$

และ

$$I_{B1} \leq I_{B3} \quad (3.21)$$

ซึ่งจากสมการที่ (3.20) และ (3.21) พบว่า สามารถปรับเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณปรับที่  $I_{B1}$  และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณปรับได้ที่  $I_{B2}$  เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 3.3 จะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของ  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$

$$\frac{V_{o2}(s)}{V_{o1}(s)} = \frac{g_{m2}}{sC_2} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาในช่วงอยู่ตัวของสัญญาณไซน์จากสมการที่ (3.22) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{V_{o2} |\omega|}{V_{o1} |\omega|} = \frac{g_{m2}}{\omega C_2} e^{-90^\circ} \quad (3.23)$$

ดังนั้น

$$\theta = -90^\circ \quad (3.24)$$

จากสมการที่ (3.24) จะพบว่า ค่ามอดูลัส  $90^\circ$  แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{o2}$  ล้าหลัง  $V_{o1}$  อยู่  $90^\circ$  ถ้าพิจารณาวงจรกำเนิดสัญญาณในรูปที่ 3.3 อีกครั้ง พบว่า วงจรให้กำเนิดสัญญาณกระแส  $I_o$  เขียนสมการได้ว่า

$$I_o = g_{m4} V_{z2} \quad (3.25)$$

จากสมการที่ (3.25) วงจรกำเนิดสัญญาณ ที่ เอาต์พุต  $V_{z2}$  ให้กำเนิดสัญญาณไซน์ และสามารถปรับขนาดของสัญญาณไซน์ได้จากเอาต์พุตกระแส  $I_o$  ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยปรับที่  $I_{B4}$  และจากสมการที่ (3.18) ความไวของความถี่ในการกำเนิดสัญญาณของวงจรที่นำเสนอหาได้จาก

$$S_{c_1, c_2}^\omega = -\frac{1}{2} S_{g_{m2}, g_{m3}}^\omega = \frac{1}{2} \quad (3.26)$$

### 3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากอินพุตไปเป็นกระแสที่เอาต์พุตของ VDTA

ในกรณีที่วงจรขยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำ เกิดความไม่เป็นอุดมคติค่าพารามิเตอร์แฝงของมอสทรานซิสเตอร์สามารถวิเคราะห์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_z \\ I_{x^+} \\ I_{x^-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_p g_{m1} & -\alpha_N g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma g_{m2} \\ 0 & 0 & -\gamma g_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_N \\ V_z \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\alpha_p$  คือ ค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากขั้ว  $V_p$  ไปเป็นกระแสยังขั้ว  $Z$   
 $\alpha_N$  คือ ค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากขั้ว  $V_N$  ไปเป็นกระแสยังขั้ว  $Z$   
 $\gamma$  คือ ค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากขั้ว  $V_N$  ไปเป็นกระแสยังขั้ว  $X +$   
 $-\gamma$  คือ ค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากขั้ว  $V_Z$  ไปเป็นกระแสยังขั้ว  $X -$   
 วิเคราะห์สมการจากรูปที่ 3.3 โดยกำหนดกระแสไหลเข้าและกระแสไหลออกที่ขั้ว  $x_1$  ดังนี้

$$I_x = I_{c2} \quad (3.28)$$

วิเคราะห์สมการจากรูปที่ 3.3 โดยกำหนดกระแสไหลเข้าและกระแสไหลออกที่ขั้ว  $n_1$  ดังนี้

$$I_{z1} + I_{z2} - I_{c1} = 0 \quad (3.29)$$

แทนค่ากระแสที่  $C_1$  และ  $C_2$  ได้สมการดังนี้

$$I_{c1} = sC_1 V_{o1} \quad (3.30)$$

$$I_{c2} = sC_2 V_{o2} \quad (3.31)$$

แทนค่า  $I_x$  จากสมการเชิงเมทริกซ์ (3.27)

$$I_x = \gamma_1 g_{m2} V_{o1} \quad (3.32)$$

แทนค่า  $I_{z1}$  จากสมการเชิงเมทริกซ์ (3.27) โดยตัดเทอมของขั้ว  $V_p$  ออกเนื่องจากต่อลงกราวนด์

$$I_{z1} = -\alpha_{N1} g_{m1} V_{o1} \quad (3.33)$$

แทนค่า  $I_{z2}$  จากสมการเชิงเมทริกซ์ (3.27)

$$I_{z2} = -g_{m3} (\alpha_{p2} V_{o1} - \alpha_{N2} V_{o2}) \quad (3.34)$$

เมื่อ  $\alpha$  และ  $\gamma$  สามารถเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรได้  
 สมการคุณลักษณะสมบัติของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ ดังนี้ แทนค่า  $I_{c2}$  และ  $I_x$   
 จากสมการที่ (3.31) และ สมการที่ (3.32) ลงในสมการที่ (3.28) จะได้  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_x = I_{c2}$$

$$\gamma_1 g_{m2} V_{o1} = sC_2 V_{o2} \quad (3.35)$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = \frac{sC_2}{\gamma_1 g_{m2}} \quad (3.36)$$

แทนค่า  $I_{c1}$ ,  $I_{z1}$  และ  $I_{z2}$  จากสมการที่ (3.30) สมการที่ (3.33) และสมการที่ (3.34) ลงในสมการที่ (3.29) จะได้

$$I_{z1} + I_{z2} - I_{c1} = 0$$

$$-\alpha_{N1} g_{m1} V_{o1} + g_{m3} (\alpha_{p2} V_{o1} + \alpha_{N2} V_{o2}) - sC_1 V_{o1} = 0 \quad (3.37)$$

จากสมการที่ (3.37) จัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$-\alpha_{N1} g_{m1} V_{o1} + \alpha_{p2} g_{m3} V_{o1} - \alpha_{N2} g_{m3} V_{o2} - sC_1 V_{o1} = 0 \quad (3.38)$$

$$V_{o1} (-\alpha_{N1} g_{m1} + \alpha_{p2} g_{m3} - sC_1) = \alpha_{N2} g_{m3} V_{o2} \quad (3.39)$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = \frac{\alpha_{N2} g_{m3}}{-\alpha_{N1} g_{m1} + \alpha_{p2} g_{m3} - sC_1} \quad (3.40)$$

แทนค่าสมการที่ (3.36) ลงในสมการที่ (3.40) จะได้

$$\frac{sC_2}{\gamma_1 g_{m2}} = \frac{\alpha_{N2} g_{m3}}{-\alpha_{N1} g_{m1} + \alpha_{p2} g_{m3} - sC_1} \quad (3.41)$$

สามารถจัดสมการที่ (3.41) ได้ดังนี้

$$-\alpha_{N1} g_{m1} sC_2 + \alpha_{p2} g_{m3} sC_2 - s^2 C_1 C_2 = \gamma_1 \alpha_{N2} g_{m2} g_{m3} \quad (3.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คูณลบเข้าไปตลอดสมการที่ (3.42) จะได้สมการคุณลักษณะสมบัติ เป็น

$$s^2 C_1 C_2 + s C_2 (\alpha_{N1} g_{m1} - \alpha_{p2} g_{m3}) + \gamma_1 \alpha_{N2} g_{m2} g_{m3} = 0 \quad (3.43)$$

แทนค่า  $s = j\omega$  จากสมการที่ (3.43) จะได้

$$-\omega^2 C_1 C_2 + \gamma_1 \alpha_{N2} g_{m2} g_{m3} + s C_2 (\alpha_{N1} g_{m1} - \alpha_{p2} g_{m3}) = 0 \quad (3.44)$$

เมื่อพิจารณาในส่วนจำนวนจริง (Real part) จะได้ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ เป็น

$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma_1 \alpha_{N2} g_{m2} g_{m3}}{C_1 C_2}} \quad (3.45)$$

สำหรับเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ พิจารณาได้จากส่วนจินตภาพ (imaginary part) ได้

$$\alpha_{N1} g_{m1} \leq \alpha_{p2} g_{m3} \quad (3.46)$$

ในการวิเคราะห์วงจรกรณีไม่เป็นอุดมคติสามารถวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ ดังนี้

$$V_{o2} = \frac{I_{c2}}{sC_2} \quad (3.47)$$

แทนค่า  $I_{c2} = I_x = \gamma_1 g_{m2} V_{o1}$  ในสมการที่ (3.47) จะได้

$$V_{o2} = \frac{\gamma_1 g_{m2} V_{o1}}{sC_2} \quad (3.48)$$

$$\frac{V_{o2}(s)}{V_{o1}(s)} = \frac{\gamma_1 g_{m2}}{sC_2} \quad (3.49)$$

เมื่อแรงดันเอาต์พุตอยู่ในรูปของสัญญาณฟังก์ชันไซน์ได้ฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{o2}(j\omega)}{V_{o1}(j\omega)} = \frac{\gamma_1 g_{m2}}{j\omega C_2} \begin{bmatrix} j \\ j \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$\frac{V_{o2}(j\omega)}{V_{o1}(j\omega)} = \frac{j\gamma_1 g_{m2}}{-\omega C_2} \quad (3.51)$$

ได้ฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$\frac{V_{o2}|\omega|}{V_{o1}|\omega|} = \frac{\gamma_1 g_{m2}}{\omega C_2} e^{-90} \quad (3.52)$$

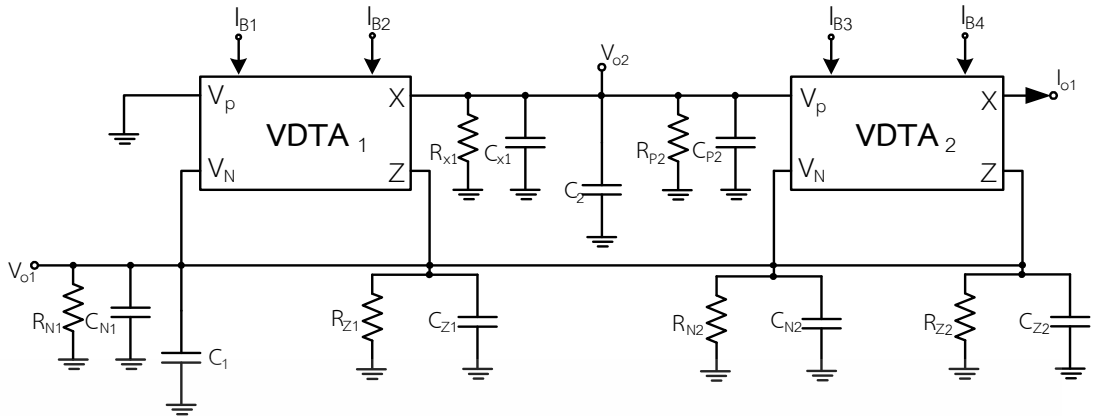
จากสมการที่ (3.52) สรุปได้ว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถ่ายโอนสัญญาณไซน์ในรูปแบบที่ 3.3 เป็นสัญญาณแบบคอแควเตอร์โดยเฟสเซอร์ของสัญญาณทั้งสองมีมุมต่างกัน

$$\theta = -90^\circ \quad (3.53)$$

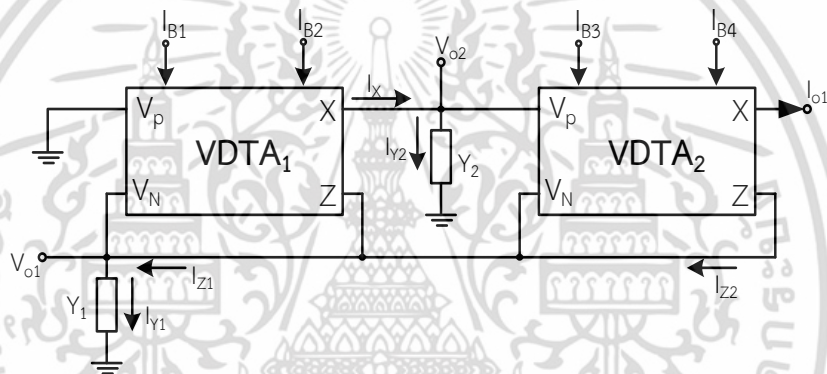
จากสมการที่ (3.45) และ (3.46) พบว่า การวิเคราะห์ถึงวงจรถ่ายโอนสัญญาณไซน์คอแควเตอร์ในกรณีไม่เป็นอุดมคติสามารถส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้น ค่าพารามิเตอร์เป็นผลมาจากค่าความต้านทานและความจุแฝงในตัวมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรขยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำ และมีผลต่อการทำงานของวงจร

### 3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA

ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA ซึ่งตัวต้านทานและความจุแฝงจะมีอยู่ในทุกขั้วของ VDTA ที่ต่อใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากรูป VDTA<sub>1</sub> มีขั้วต่อใช้งาน คือ ขั้ว X ขั้ว V<sub>N</sub> และขั้ว Z ซึ่งมี R<sub>X1</sub>, C<sub>X1</sub>, R<sub>N1</sub>, C<sub>N1</sub> และ R<sub>Z1</sub>, C<sub>Z1</sub> เป็นความต้านทานและความจุแฝง ตามลำดับ ส่วน VDTA<sub>2</sub> มีขั้วต่อใช้งาน คือ ขั้ว V<sub>p</sub> ขั้ว V<sub>N</sub> และขั้ว Z ซึ่งมี R<sub>p2</sub>, C<sub>p2</sub>, R<sub>N2</sub>, C<sub>N2</sub> และ R<sub>Z2</sub>, C<sub>Z2</sub> เป็นความต้านทานและความจุแฝง ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควอดเรเจอร์ในกรณีที่มีผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA



รูปที่ 3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควอดเรเจอร์ในกรณีที่มีผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA เมื่อแทนตัวอุปกรณ์ในวงจรด้วยแอดมิแตนซ์

เพื่อความสะดวกในการหาค่าสมการคุณลักษณะสมบัติ จึงแทนค่าความต้านทานด้วยค่าความนำและแทนค่าอิมพีแดนซ์ด้วยค่าแอดมิแตนซ์ ดังนี้

$$Y_1 = s(C_{N1} + C_1 + C_{Z1} + C_{N2} + C_{Z2}) + G_{N1} + G_{Z1} + G_{N2} + G_{Z2} \quad (3.53)$$

$$Y_2 = s(C_{X1} + C_2 + C_{P2}) + G_{X1} + G_{P2} \quad (3.54)$$

พิจารณาที่โหนด  $V_{o1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{o1} = \frac{I_{z1} + I_{z2}}{Y_1} \quad (3.55)$$

เมื่อ  $I_{z1} = -g_{m1}V_{o1}$  และ  $I_{z2} = g_{m3}(V_{o1} - V_{o2})$  จากสมการที่ (3.55) จะได้

$$V_{o1}Y_1 = -g_{m1}V_{o1} + g_{m3}V_{o1} - g_{m3}V_{o2} \quad (3.56)$$

$$V_{o1}(-g_{m1} + g_{m3} - Y_1) = g_{m3}V_{o2} \quad (3.57)$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = \frac{g_{m3}}{-g_{m1} + g_{m3} - Y_1} \quad (3.58)$$

พิจารณาที่โหนด  $V_{o2}$

$$V_{o2} = I_x - Y_2 \quad (3.59)$$

เมื่อ  $I_x = g_{m2}V_{o1}$  จะได้

$$V_{o2} = g_{m2}V_{o1} - Y_2 \quad (3.60)$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = \frac{Y_2}{g_{m2}} \quad (3.61)$$

แทนค่าสมการที่ (3.58) ลงในสมการที่ (3.61) จะได้

$$\frac{Y_2}{g_{m2}} = \frac{g_{m3}}{-g_{m1} + g_{m3} - Y_1} \quad (3.62)$$

สามารถจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$-g_{m1}Y_2 + g_{m3}Y_2 - Y_1Y_2 = g_{m2}g_{m3} \quad (3.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า แอดมิแตนซ์ตามสมการที่ (3.53) และ (3.54) ลงในสมการที่ (3.63) จะได้

$$\begin{aligned} & -\left[s(C_x + C_2 + C_p) + G_x + G_p\right]g_{m1} + \left[s(C_x + C_2 + C_p) + G_x + G_p\right]g_{m3} \\ & -\left[s(C_{N1} + C_1 + C_{Z1} + C_{N2} + C_{Z2}) + G_{N1} + G_{Z1} + G_{N2} + G_{Z2}\right]\left[s(C_x + C_2 + C_p) \right. \\ & \left. + G_x + G_p\right] - g_{m2}g_{m3} = 0 \end{aligned} \quad (3.64)$$

กำหนดให้  $C_A = C_x + C_2 + C_p$  (3.65)

$$C_B = C_{N1} + C_1 + C_{Z1} + C_{N2} + C_{Z2} \quad (3.66)$$

$$G_A = G_x + G_p \quad (3.67)$$

$$G_B = G_{N1} + G_{Z1} + G_{N2} + G_{Z2} \quad (3.68)$$

แทนค่าสมการที่ (3.65) - (3.68) ลงในสมการ (3.64) จะได้

$$\begin{aligned} & \left[-(sC_A g_{m1} + G_A g_{m1}) + (sC_A g_{m3} + G_A g_{m3})\right] - [sC_B + G_B][sC_A + G_A] \\ & - g_{m2}g_{m3} = 0 \end{aligned} \quad (3.69)$$

ได้สมการลักษณะสมบัติคือ

$$\begin{aligned} & -s^2 C_A C_B - sC_B G_A + sC_A G_B + G_A G_B - sC_A (g_{m1} - g_{m3}) - G_A (g_{m1} - g_{m3}) \\ & - g_{m2}g_{m3} = 0 \end{aligned} \quad (3.70)$$

นำลบคูณตลอดสมการ

$$\begin{aligned} & s^2 C_A C_B + sC_B G_A + sC_A G_B + G_A G_B + sC_A (g_{m1} - g_{m3}) + G_A (g_{m1} - g_{m3}) \\ & + g_{m2}g_{m3} = 0 \end{aligned} \quad (3.71)$$

หาเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ จะได้

$$sC_B G_A + sC_A G_B + sC_A g_{m1} - sC_A g_{m3} = 0 \quad (3.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำ  $s$  หาดตลอดสมการ

$$C_B G_A + C_A G_B + C_A g_{m1} - C_A g_{m3} = 0 \quad (3.73)$$

นำ  $C_A$  หาดตลอดสมการ

$$\frac{C_B G_A}{C_A} + G_B + g_{m1} = g_{m3} \quad (3.74)$$

จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณคือ

$$\frac{(C_{N1} + C_1 + C_{Z1} + C_{N2} + C_{Z2}) \left( \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{p2}} \right)}{C_{x1} + C_2 + C_{p2}} + \left( \frac{1}{R_{N1}} + \frac{1}{R_{Z1}} + \frac{1}{R_{N1}} + \frac{1}{R_{Z1}} \right) + g_{m1} \leq g_{m3} \quad (3.75)$$

หาความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ

$$s^2 C_A C_B + G_A G_B + g_{m2} g_{m3} = 0 \quad (3.76)$$

แทนค่า  $s = j\omega$

$$-\omega^2 C_A C_B + G_A G_B + g_{m2} g_{m3} = 0 \quad (3.77)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{G_A G_B + g_{m2} g_{m3}}{C_A C_B}} \quad (3.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ คือ

$$\omega = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{p2}}\right) \left(\frac{1}{R_{N1}} + \frac{1}{R_{Z1}} + \frac{1}{R_{N2}} + \frac{1}{R_{Z2}}\right) + g_{m2}g_{m3}}{(C_{x1} + C_2 + C_{p2})(C_{N1} + C_1 + C_{Z1} + C_{N2} + C_{Z2})}} \quad (3.79)$$

จากสมการที่ (3.75) และ (3.79) พบว่ากรณีที่วิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์ทำงานที่ความถี่สูง สามารถส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ ซึ่งในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นผลมาจากค่าความต้านทานและความจุแฝงที่มีในตัวมอสทรานซิสเตอร์และจะมีผลต่อการทำงานของวงจรเมื่อความถี่และอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย

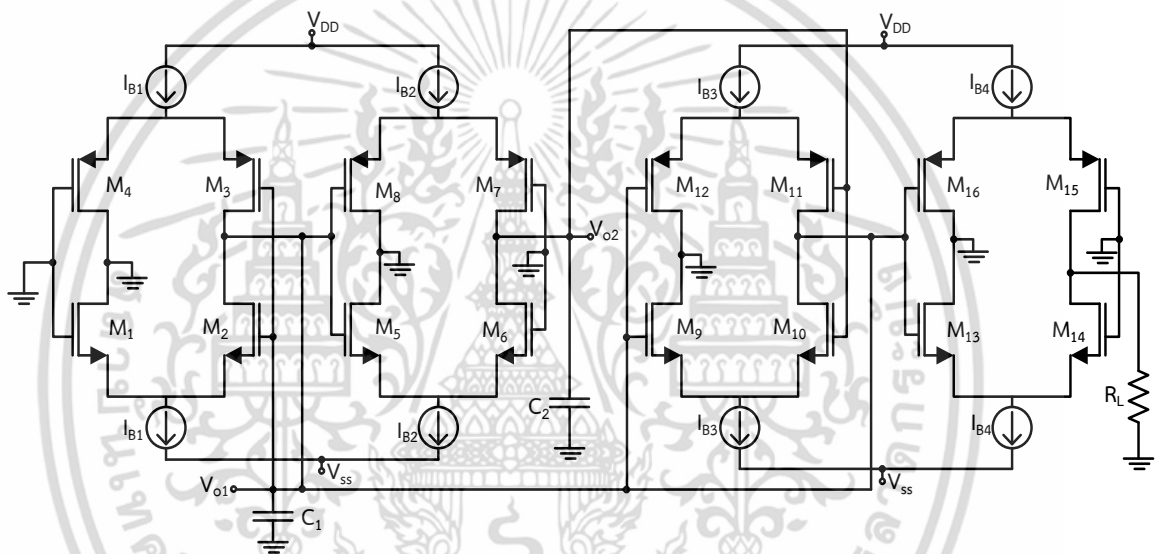


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรถ่ายสัญญาณแบบควอเตอร์เจอร์รี่ในโหมดแรงดันและสัญญาณไซน์ในโหมดกระแส ที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้ ที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ซึ่งบทนี้จะทำการทดสอบการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณด้วยโปรแกรม PSPICE พร้อมทั้งอภิปรายผลที่ได้จากการทดสอบด้วยโปรแกรม PSPICE นี้ เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ไว้ทางทฤษฎีในบทที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 การต่อใช้งาน CMOS เป็นวงจรถ่ายสัญญาณแบบควอเตอร์เจอร์รี่ในโหมดแรงดันและสัญญาณไซน์ในโหมดกระแสที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้ ในโปรแกรม PSPICE

#### 4.1 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณแบบควอเตอร์เจอร์รี่ในโหมดแรงดันและสัญญาณไซน์ในโหมดกระแส ที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้

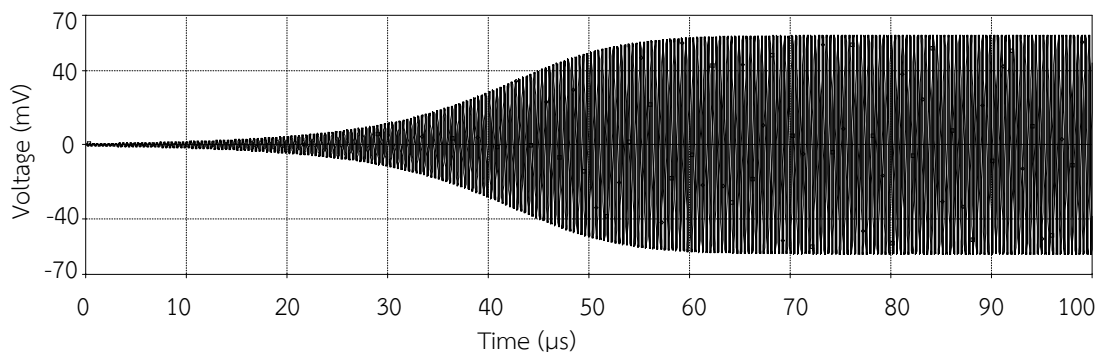
##### 4.1.1 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณแบบควอเตอร์เจอร์รี่

การทดสอบการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณแบบควอเตอร์เจอร์รี่ด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณที่ได้ทำการวิเคราะห์ทางทฤษฎีไว้ในบทที่ 3 โดยทรานซิสเตอร์ NMOS และ PMOS ที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณนั้น มีค่าพารามิเตอร์ในตัวมอสทรานซิสเตอร์ TSMC 0.25  $\mu\text{m}$  CMOS วงจรถ่ายสัญญาณที่แหล่งจ่าย  $\pm 1.25$  โวลต์ ตามโครงสร้างภายในของ VDTA ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และค่าขนาดช่องทางเดินกระแส W/L ของทรานซิสเตอร์แสดงในตารางที่ 4.1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการพิมพ์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

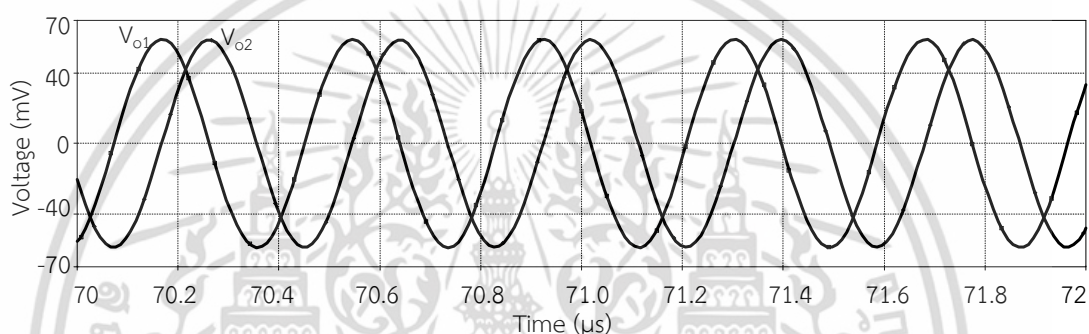
ตารางที่ 4.1 ค่าขนาดของทรานซิสเตอร์

Transistor	Type	W( $\mu\text{m}$ )	L( $\mu\text{m}$ )
M1	PMOS	8	0.25
M2	PMOS	8	0.25
M3	NMOS	5	0.25
M4	NMOS	5	0.25
M5	PMOS	8	0.25
M6	PMOS	8	0.25
M7	NMOS	5	0.25
M8	NMOS	5	0.25
M9	PMOS	8	0.25
M10	PMOS	8	0.25
M11	NMOS	5	0.25
M12	NMOS	5	0.25
M13	PMOS	8	0.25
M14	PMOS	8	0.25
M15	NMOS	5	0.25
M16	NMOS	5	0.25

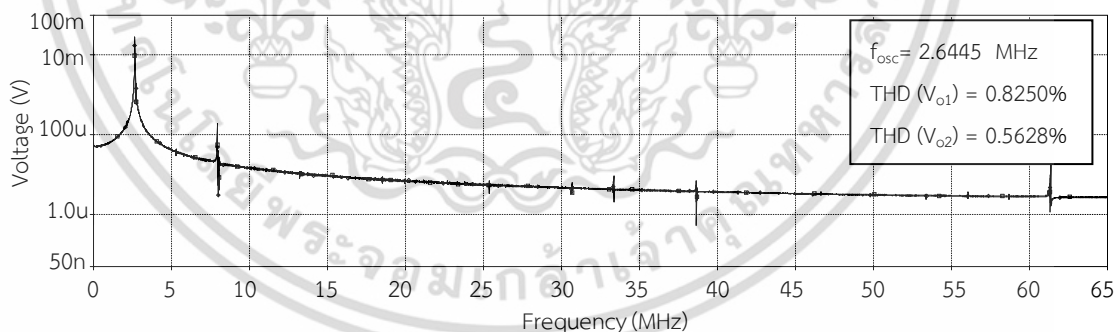
ปรับค่า  $C_1 = C_2 = 20\text{pF}$ ,  $I_{B1} = I_{B2} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$  และ  $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  ผลการทดสอบ รูปที่ 4.2 เป็นแรงดันเอาต์พุตในสถานะเริ่มต้น (Initial state) รูปที่ 4.3 คือ แรงดันเอาต์พุต  $V_{O1}$  และ  $V_{O2}$  สถานะอยู่ตัว (Steady state) ซึ่งพบว่าสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองเป็นสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์และ  $V_{O1}$  มีเฟสหน้า  $V_{O2}$  อยู่  $90^\circ$  ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ (3.24) ส่วนรูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่มีค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 2.6445 MHz ค่าความผิดเพี้ยนทาง ฮาร์โมนิกส์ ของ  $V_{O1}$  และ  $V_{O2}$  เท่ากับ 0.8250% และ 0.5628% ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 แรงดันเอาต์พุตที่สถานะเริ่มต้น



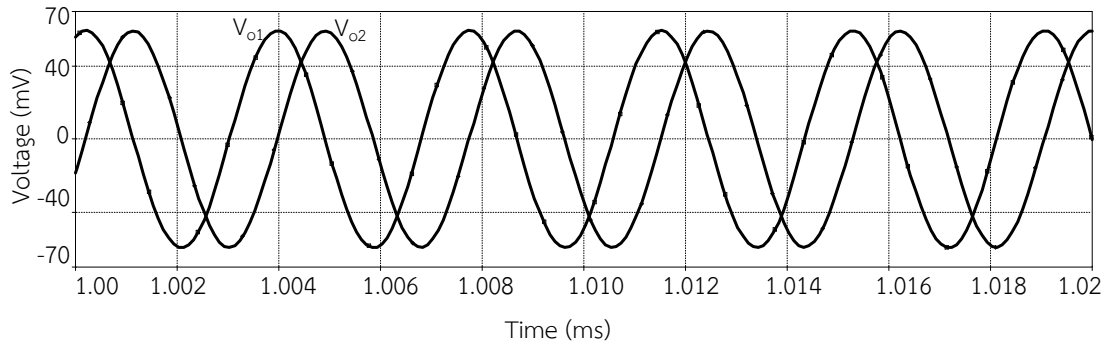
รูปที่ 4.3 แรงดันเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัว



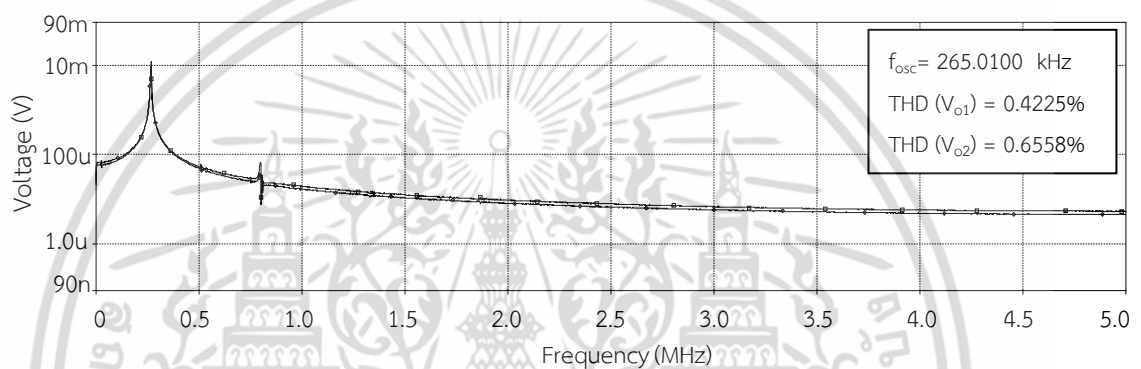
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 2.6445 MHz

ปรับค่า  $C_1 = C_2 = 200\text{pF}$ ,  $I_{B1} = I_{B2} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$  และ  $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  ผลการทดสอบ รูปที่ 4.5 คือ แรงดันเอาต์พุต  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  สถานะอยู่ตัว (Steady state) ซึ่งพบว่าสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองเป็นสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ (3.23) ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ ที่มีค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 265.0100 kHz ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์ของ  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  เท่ากับ 0.4225% และ 0.6558% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

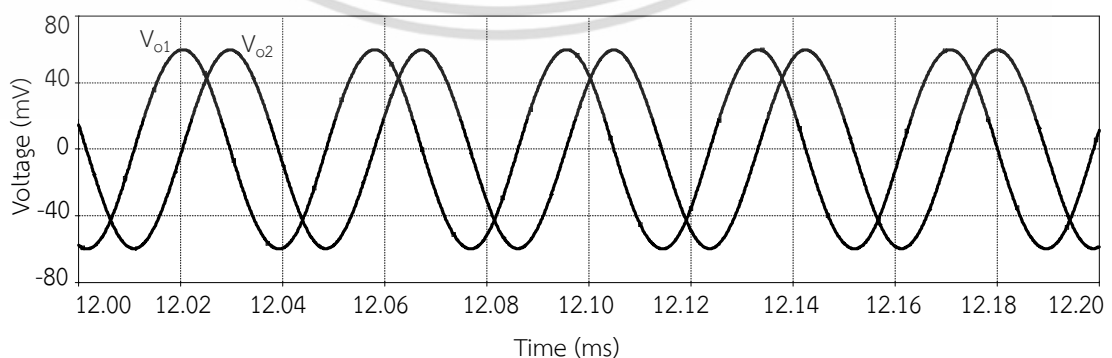


รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 265.0100 kHz



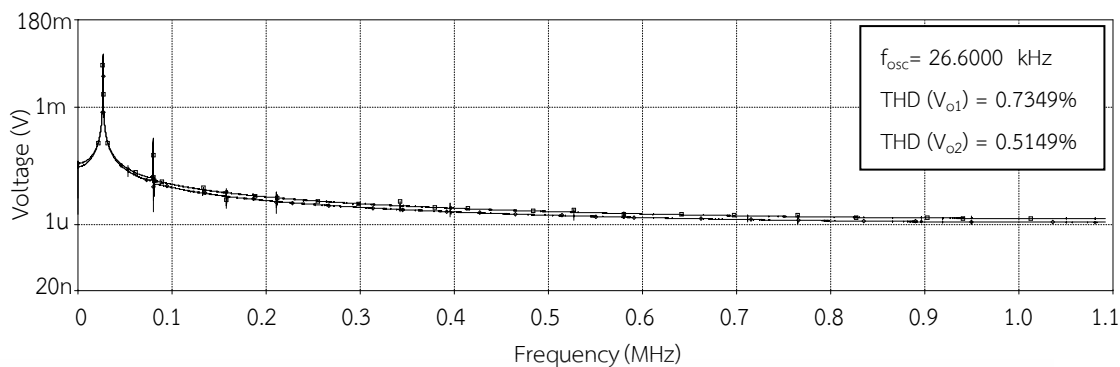
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 265.0100 kHz

และปรับค่า  $C_1 = C_2 = 2\text{nF}$ ,  $I_{B1} = I_{B2} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$  และ  $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  ผลการทดสอบรูปที่ 4.7 คือ แรงดันเอาต์พุต  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  สภาวะอยู่ตัว (Steady state) ซึ่งพบว่าสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองเป็นสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ (3.23) ส่วนรูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ ที่มีค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 26.6000 kHz ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์ ของ  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  เท่ากับ 0.7349% และ 0.5149% ตามลำดับ



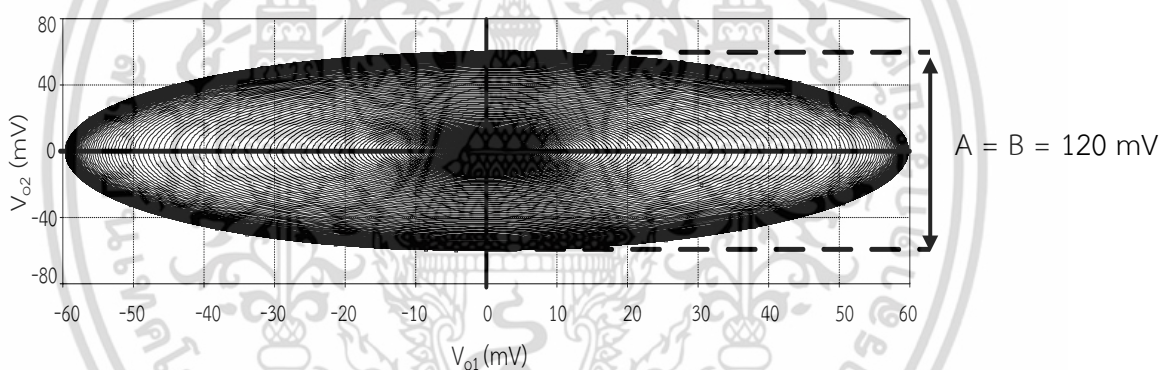
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 26.6000 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 26.6000 kHz

เพื่อยืนยันว่าสัญญาณทั้งสองเป็นแบบคอแตรเจอร์ คือ มีความต่างเฟสกัน  $90^\circ$  ซึ่งในรูปที่ 4.9 เป็นผลการทดสอบการวัดความต่างเฟสด้วยวิธีแบบลิสซาจูลส์ จากรูปสามารถหาความต่างเฟสของ  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  ได้จากสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.9 การวัดความต่างเฟสแบบลิสซาจูลส์

$$\theta = \sin^{-1} \frac{A}{B} \quad (4.1)$$

โดยที่  $\theta$  คือ ค่าความต่างเฟสของสัญญาณ

A คือ ระยะทางที่จุดตัดของรูปกับแกน X จากกลางถึงบน

B คือ ระยะทางของความสูงของรูป จากกลางสุดถึงบนสุด

จากรูปที่ 4.9 แทนค่า  $A = B = 120\text{mV}$  ลงในสมการที่ (4.1) จะได้

$$\theta = \sin^{-1} \frac{120}{120} \quad (4.2)$$

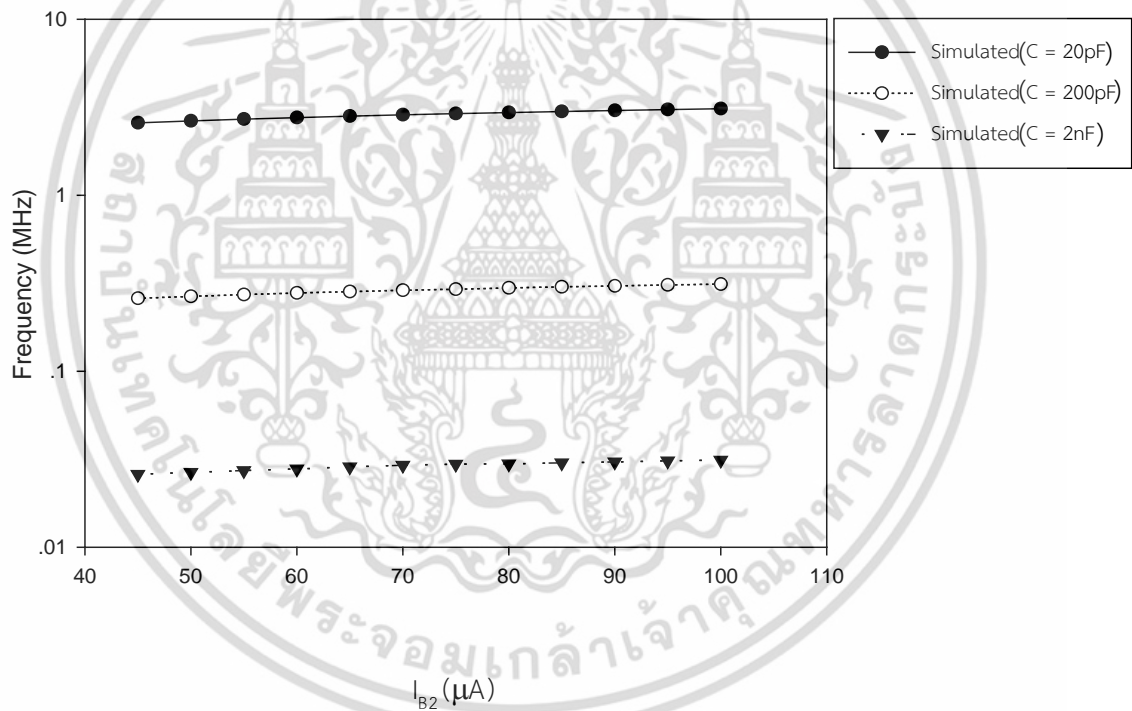
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta = \sin^{-1} 1 \quad (4.3)$$

$$\theta = 90^\circ \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.4) สามารถยืนยันได้ว่าแรงดัน  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  มีความต่างเฟสกัน  $90^\circ$  จริงตามการคำนวณไว้แล้วทางทฤษฎีในสมการที่ (3.24)

ในรูปที่ 4.10 เพื่อเป็นการทดสอบว่าวงจรสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยปรับที่  $I_{B2}$  เมื่อปรับกระแสไบแอส  $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$  และ  $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  คงที่ตลอดการทดสอบและปรับกระแสไบแอส  $I_{B2} = 45 - 100\mu\text{A}$  โดยได้เปลี่ยนตัวเก็บประจุ 3 ค่า ได้แก่ 20pF, 200pF และ 2nF พบว่าสามารถปรับความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้โดยปรับกระแสไบแอส  $I_{B2}$  ดังที่ได้วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ (3.18) โดยที่การปรับไม่ได้เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณแต่อย่างใด

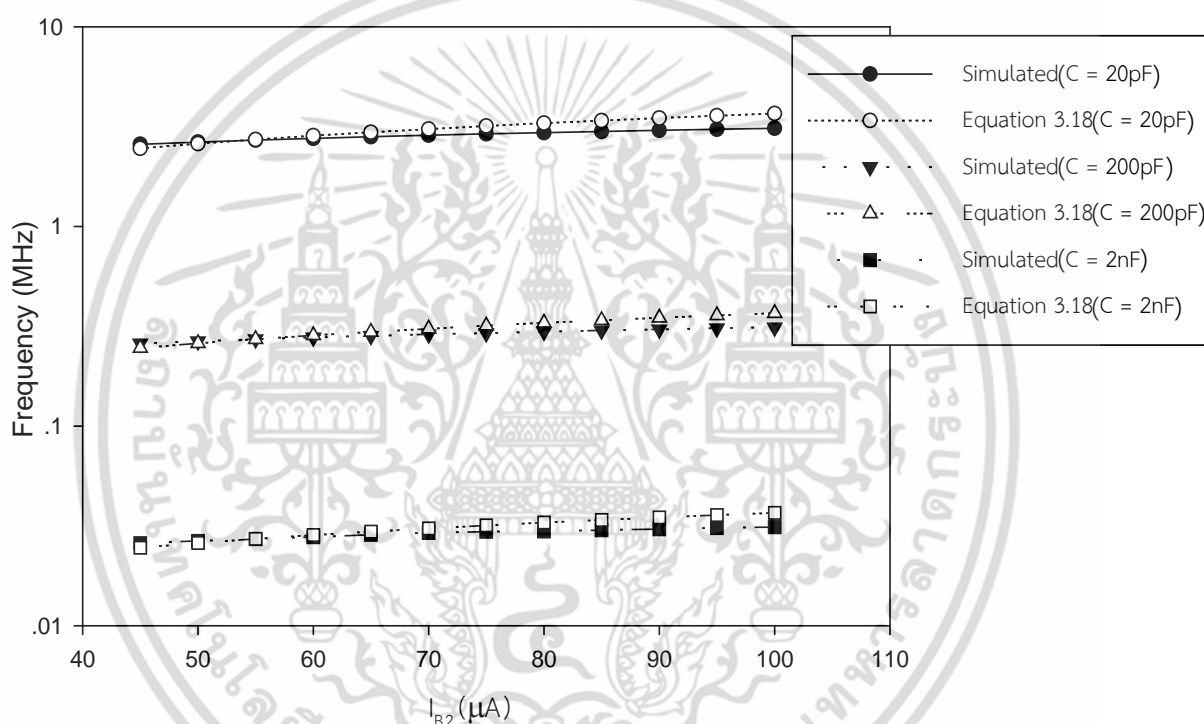


รูปที่ 4.10 ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณเมื่อเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและกระแสไบแอส  $I_{B2}$

ต่อไปในรูปที่ 4.11 เป็นการนำเสนอผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างความถี่ที่ได้จากการจำลองผลจากโปรแกรม PSPICE กับความถี่ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ตามสมการที่ (3.18) ปรับกระแสไบแอส  $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$ ,  $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  คงที่ตลอดการทดสอบ และปรับกระแสไบแอส  $I_{B2}$  ที่  $45 - 100\mu\text{A}$  โดยได้เปลี่ยนตัวเก็บประจุ 3 ค่า ได้แก่ 20pF, 200pF และ 2nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบ พบว่า ความถี่ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีในช่วงแรก ที่ค่ากระแสไบแอส  $45\mu\text{A} - 60\mu\text{A}$  มีค่าน้อยกว่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบด้วยโปรแกรม PSPICE เป็น เพราะอยู่ในช่วงทรานซิสเตอร์เริ่มทำงานจึงทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบแตกต่างจากช่วงกระแสไบแอส  $65\mu\text{A} - 100\mu\text{A}$  เป็นต้นไปที่ความถี่จากการคำนวณทางทฤษฎีจะมีค่ามากกว่าค่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบด้วยโปรแกรม PSPICE ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากอินพุตไปเป็น กระแสที่เอาต์พุตของ VDTA ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนไปจากหนึ่งในรูปตัวแปร  $\alpha$  และ  $\gamma$  ตามสมการที่ (3.45) และสมการที่ (3.46) ค่าพารามิเตอร์นี้เป็นผลมาจากค่าความจุแฝงและค่าความต้านทานแฝงในตัว มอสทรานซิสเตอร์ ดังที่ได้วิเคราะห์ไว้แล้วในสมการที่ (3.75) และสมการที่ (3.79)

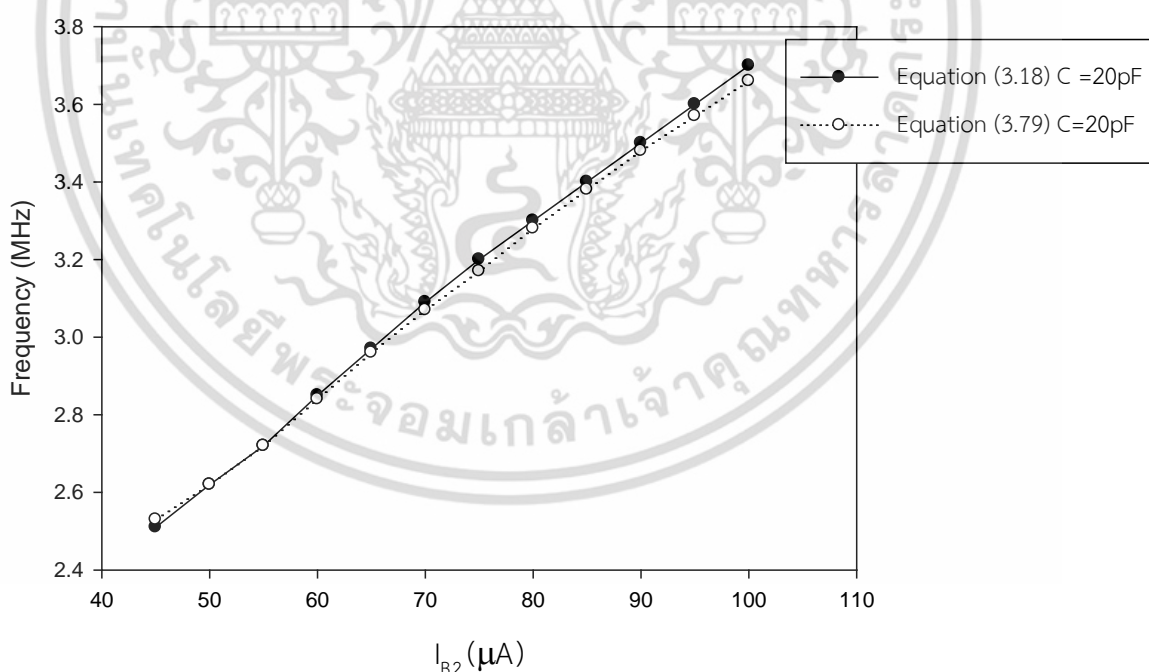


รูปที่ 4.11 ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณจากการจำลองผลเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี

กรณีที่วงจรกำเนิดสัญญาณได้รับผลกระทบจากค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจาก อินพุตไปเป็นกระแสที่เอาต์พุต ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณที่ได้จากการจำลองผลและการคำนวณในทาง ทฤษฎีตามสมการที่ (3.18) จึงมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งค่าความผิดพลาดดังกล่าวเกิดขึ้นจากค่าความจุแฝงและ ค่าความต้านทานแฝงที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกระแสในทุกขั้วของวงจรผลต่างแรงดันส่งผ่านความ นำกระแสที่ต่อใช้งาน ทำให้เงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้สมการ คุณสมบัติ ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จากอุดมคติ แสดงไว้ในสมการที่ (3.45) และ (3.46) เมื่อเกิดค่าความจุแฝงเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความจวม

ของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณมีค่าลดลงที่ได้วิเคราะห์ผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA สมการที่ (3.79)

เพื่อเป็นการยืนยันว่าค่าความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA เข้ามามีผลกระทบกับวงจรกำเนิดสัญญาณ ทำให้ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณที่ได้จากการทดสอบด้วยโปรแกรม PSPICE มีค่าน้อยกว่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (3.18) จึงหาค่าความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA จากโปรแกรม PSPICE และแทนค่าลงในสมการที่ (3.79) เพื่อหาความถี่ในการกำเนิดสัญญาณที่มีค่าความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA มาคำนวณร่วมด้วยโดยค่าความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA มีค่า ดังนี้  $R_{N1} = R_{N2} = R_{P1} = R_{P2} = 7.717100T\Omega$  ที่ความถี่ 1Hz  $C_{N1} = C_{N2} = C_{P1} = C_{P2} = 0.021360pF$  ที่ความถี่ 100GHz  $R_{X1} = 229.258000k\Omega$   $C_{X1} = 0.008405 pF$  ,  $R_{Z1} = R_{Z2} = 442.055k\Omega$  และ  $C_{Z1} = C_{Z2} = 0.02981 pF$  และทำการปรับค่า  $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu A$  และ  $I_{B3} = 54\mu A$  คงที่ตลอดการทดสอบ ใช้ค่าตัวเก็บประจุ 20pF และปรับ  $I_{B2} = 45 - 100\mu A$  เมื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (3.18) จะได้ดังรูปที่ 4.12 จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA เข้ามามีผลกระทบ ทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 3 สมการที่ (3.18) ซึ่งเป็นสมการในอุดมคตินั่นเอง



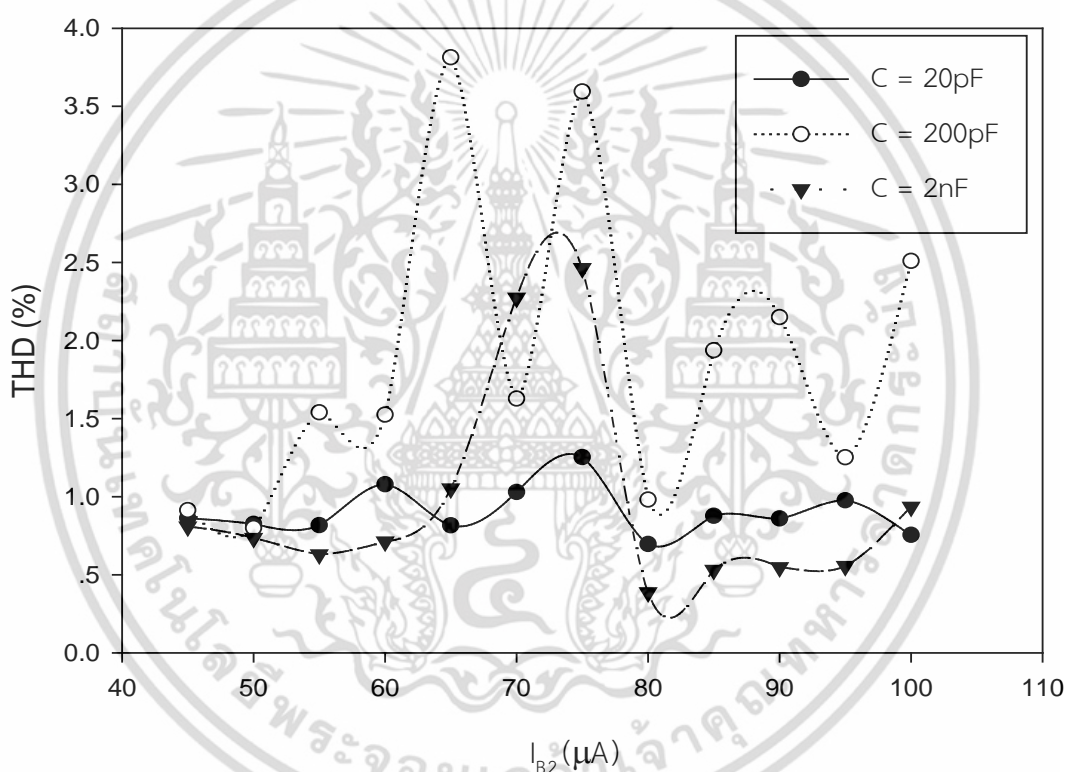
**รูปที่ 4.12** ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณเมื่อคิดค่าความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA เปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์ให้ได้ความถี่ตามต้องการ

จากการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวงจรกำเนิดสัญญาณสามารถกำเนิดความถี่ได้ตามที่ต้องการ เช่น ถ้าต้องการให้วงจรกำเนิดความถี่ 3 MHz สามารถทำได้โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุสองตัวค่า 20 pF ต่อร่วมในวงจร และปรับกระแสไบแอส  $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu A$ ,  $I_{B3} = 54\mu A$  และ  $I_{B2} = 70\mu A$  วงจรก็จะสามารถกำเนิดสัญญาณได้ตามต้องการ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีในสมการที่ (3.18) ผลการทดสอบดังที่แสดงไว้แล้วในรูปที่ 4.12

#### 4.1.3 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควอเตรเจอร์กรณีหาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิกสรรวม



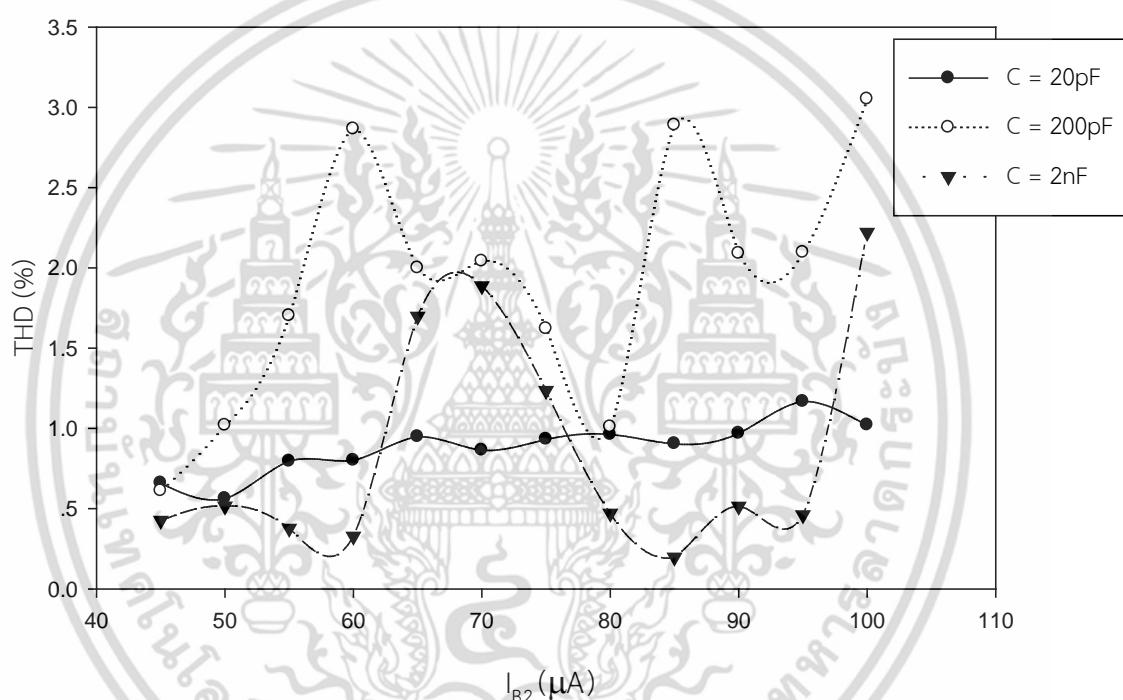
รูปที่ 4.13 การทดสอบหาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิกสรรวมของแรงดันเอาต์พุตที่ 1

ในรูปที่ 4.13 เป็นการทดสอบหาค่า THD ของ  $v_{o1}$  โดยทำการทดสอบหาค่าโดยการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุจำนวน 3 ค่า คือ 20pF, 200pF, 2nF พบว่ากรณีตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดสอบมีค่า 20pF ที่กระแสไบแอส 45 – 100 $\mu A$  ค่า THD ของ  $v_{o1}$  ที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.6956 – 1.2525% ช่วงที่ค่า THD ดีที่สุดของวงจรอยู่ที่กระแสไบแอส  $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu A$ ,  $I_{B3} = 54\mu A$  และ  $I_{B2} = 80\mu A$  ซึ่งวงจรสามารถให้ค่า THD = 0.6956% ที่ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ 2.9486 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดสอบมีค่า 200 pF กระแสไบแอส 45-100  $\mu\text{A}$  ค่า THD ของ  $V_{o1}$  ที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.7986–3.8129% ช่วงที่ค่า THD ดีที่สุดของวงจรรออยู่ที่กระแสไบแอส  $I_{B3} = 54\mu\text{A}$   $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$  และ  $I_{B2} = 50\mu\text{A}$  ซึ่งวงจรมีค่า THD = 0.7986 % ที่ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ 266 kHz

กรณีตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดสอบมีค่า 2nF กระแสไบแอส 45-100  $\mu\text{A}$  ค่า THD ของ  $V_{o1}$  ที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.3867 – 2.4634 % ช่วงที่ค่า THD ดีที่สุดของวงจรรออยู่ที่กระแสไบแอส  $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$   $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  และ  $I_{B2} = 80\mu\text{A}$  ซึ่งวงจรมีค่า THD = 0.3867 % ที่ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ 29.7000 kHz



รูปที่ 4.14 การทดสอบหาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันเอาต์พุตที่ 2

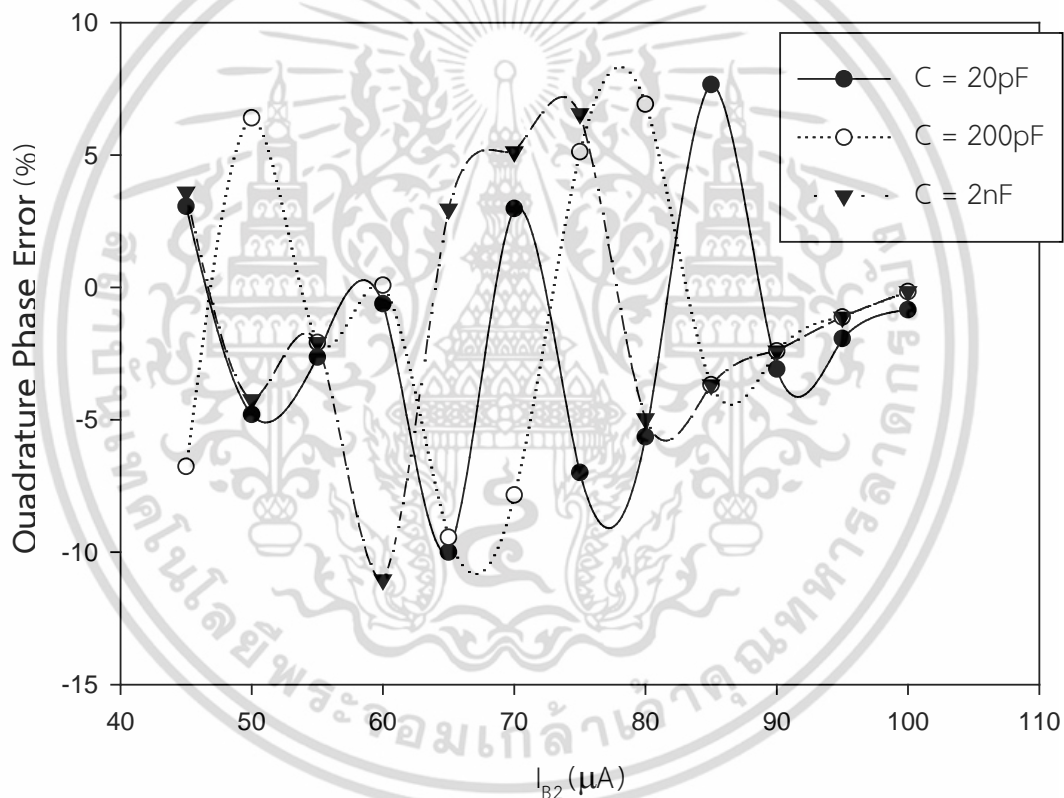
ในรูปที่ 4.14 เป็นการทดสอบหาค่า THD ของ  $V_{o2}$  โดยทำการทดสอบหาค่าโดยการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุจำนวนสามค่า คือ 20pF, 200pF, 2nF พบว่ากรณีตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดสอบมีค่า 20pF ที่กระแสไบแอส 45–100  $\mu\text{A}$  ค่า THD ของ  $V_{o2}$  ที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.5628 – 1.1674% ช่วงที่ค่า THD ดีที่สุดของวงจรรออยู่ที่กระแสไบแอส  $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$ ,  $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  และ  $I_{B2} = 50\mu\text{A}$  ซึ่งวงจรมีค่า THD = 0.5628% ที่ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ 2.6445 MHz

กรณีตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดสอบมีค่า 200 pF กระแสไบแอส 45-100  $\mu\text{A}$  ค่า THD ของ  $V_{o2}$  ที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.6114 – 3.0515% ช่วงที่ค่า THD ดีที่สุดของวงจรรออยู่ที่กระแสไบแอส

$I_{B1} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$ ,  $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  และ  $I_{B2} = 45\mu\text{A}$  ซึ่งวงจรสามารถให้ค่า THD = 0.6114% ที่ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ 259 kHz

กรณีตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดสอบมีค่า 2nF กระแสไบแอส 45-100  $\mu\text{A}$  ค่า THD ของ  $v_{o2}$  ที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.3277 – 2.2207% ช่วงที่ค่า THD ดีที่สุดของวงจรอยู่ที่กระแสไบแอส  $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$   $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  และ  $I_{B2} = 60\mu\text{A}$  ซึ่งวงจรสามารถให้ค่า THD = 0.3277% ที่ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ 27.8000 kHz

#### 4.1.4 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควอดเรเจอร์กรณีที่มีมุมต่างเฟส เบี่ยงเบนไปจาก $90^\circ$



รูปที่ 4.15 ความผิดพลาดมุมต่างเฟสของสัญญาณควอดเรเจอร์

ในรูปที่ 4.15 ได้นำเสนอผลการทดสอบมุมต่างเฟสของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควอดเรเจอร์ โดยการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุสามค่า คือ 20pF, 200pF, 2nF ซึ่งจากการทดสอบพบว่า

การทดสอบที่ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 20pF กระแสไบแอส  $I_{B2} = 45 - 100\mu\text{A}$  มุมเฟสของสัญญาณควอดเรเจอร์ เบี่ยงเบนไปจาก  $90^\circ$  อยู่ในช่วง  $\pm 10\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

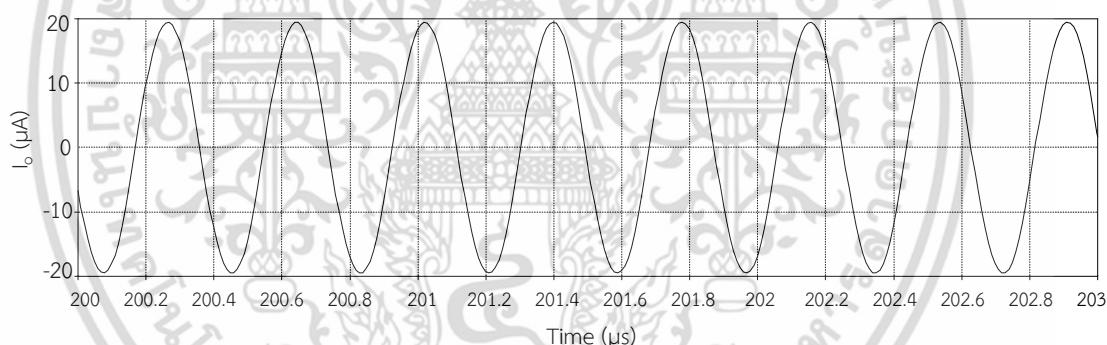
การทดสอบที่ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 200pF กระแสไบแอส  $I_{B2} = 45 - 100\mu\text{A}$  มุมเฟสของสัญญาณควอเทรเจอร์ เบี่ยงเบนไปจาก  $90^\circ$  อยู่ในช่วง  $\pm 10\%$

การทดสอบที่ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 2nF กระแสไบแอส  $I_{B2} = 45 - 100\mu\text{A}$  มุมเฟสของสัญญาณควอเทรเจอร์ เบี่ยงเบนไปจาก  $90^\circ$  อยู่ในช่วง  $\pm 10\%$

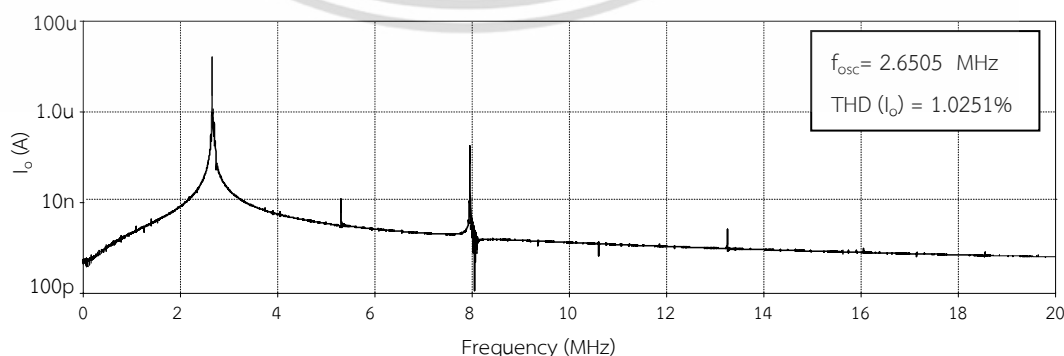
จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่นำเสนอนี้สามารถให้กำเนิดสัญญาณแบบควอเทรเจอร์ได้และที่กระแสไบแอส  $I_{B2} = 60\mu\text{A}$  ที่ตัวเก็บประจุค่า 200pF สามารถให้ค่ามุมต่างเฟสใกล้เคียง  $90^\circ$  มากที่สุดคือ  $90.0720^\circ$

#### 4.1.5 เอาต์พุตกระแสที่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

นอกจากวงจรกำเนิดสัญญาณนี้ จะเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเทรเจอร์ที่สามารถปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณสามารถปรับได้เป็นอิสระจากกันแบบมีเงื่อนไขแล้ว วงจรยังสามารถให้กำเนิดสัญญาณเอาต์พุตกระแส  $I_o$  ได้อีกหนึ่งสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ส่วนรูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตกระแส มีค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิกส์ของ  $I_o$  เท่ากับ 1.0251%

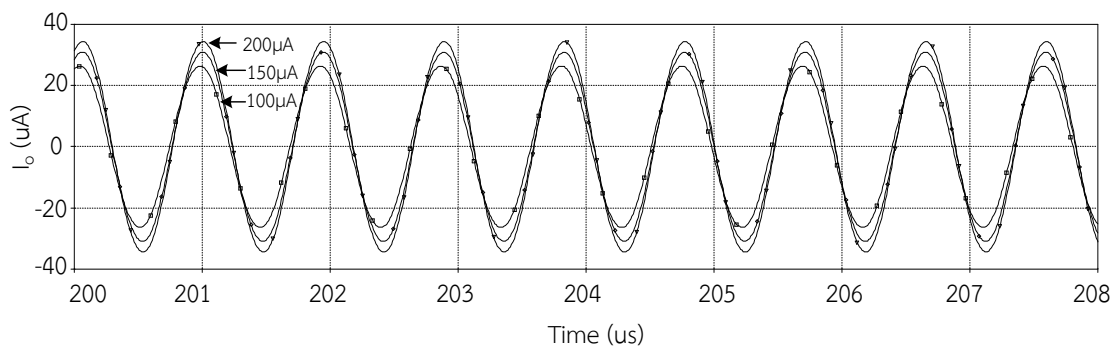


รูปที่ 4.16 เอาต์พุตกระแส



รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 การควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุตกระแสด้วย  $I_{B4}$

และเพื่อเป็นการยืนยันผลจากการวิเคราะห์ที่ไว้ในทางทฤษฎีในบทที่ 3 ของสมการที่ 3.25 ทำการทดสอบโดยการปรับที่  $I_{B4}$  ด้วยค่า  $100\mu\text{A}$ ,  $150\mu\text{A}$  และ  $200\mu\text{A}$  ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.18 และผลการทดสอบดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า เอาต์พุตกระแสสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้ ด้วยการปรับค่าที่  $I_{B4}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์ในโหมดแรงดันและสัญญาณไซน์ในโหมดกระแส ที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้ โดยใช้วงจรสำเร็จรูป VDTA จำนวน 2 ตัว ต่อร่วมอยู่กับตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัว ที่ต่อลงกราวด์ วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์ สามารถควบคุมเฟสและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และปรับได้เป็นอิสระจากกันแบบมีเงื่อนไข โดยที่เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณปรับได้ที่  $I_{B1}$  ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณปรับได้ที่  $I_{B2}$  นอกจากนี้ วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์นี้ยังสามารถให้กำเนิดสัญญาณเอาต์พุตกระแสได้อีกหนึ่งเอาต์พุต ที่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้โดยการปรับที่  $I_{B4}$

ผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้พารามิเตอร์ของ CMOS เทคโนโลยี  $0.25\mu\text{m}$  ของ TSMC โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดัน  $\pm 1.25\text{V}$  ผลการจำลองการทำงาน พบว่า วงจรสามารถให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์ที่ปรับได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ความถี่และเฟสในการกำเนิดสัญญาณปรับได้เป็นอิสระจากกันแบบมีเงื่อนไข ทำการทดลองโดยการปรับกระแสไบแอส  $I_{B2} = 45 - 100\mu\text{A}$  ปรับกระแสไบแอส  $I_{B1} = I_{B4} = 50\mu\text{A}$ ,  $I_{B3} = 54\mu\text{A}$  คงที่ตลอดการทดสอบ และเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุสามค่าคือ  $20\text{pF}$ ,  $200\text{pF}$  และ  $2\text{nF}$  พบว่า วงจรสามารถให้ความถี่ได้ตามที่ต้องการ เช่น หากต้องการให้วงจรกำเนิดสัญญาณที่ความถี่  $3\text{ MHz}$  สามารถทำได้โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุสองตัว ค่า  $20\text{pF}$  ต่อร่วมในวงจร และปรับกระแสไบแอส  $I_{B2} = 70\mu\text{A}$  วงจรก็จะสามารถให้กำเนิดความถี่ได้ตามที่ต้องการ โดยการปรับความถี่ไม่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณแต่อย่างใด พร้อมทั้งวงจรกำเนิดสัญญาณนี้สามารถให้เอาต์พุตกระแสได้อีกหนึ่งเอาต์พุตซึ่งจากการทดสอบโดยการปรับกระแสไบแอส  $I_{B4} = 100\mu\text{A}, 150\mu\text{A}$  และ  $200\mu\text{A}$  ผลการทดสอบพบว่า ขนาดของเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงตามการปรับค่ากระแสไบแอส จากการทดสอบสรุปได้ว่า วงจรกำเนิดสัญญาณ สามารถให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตรเจอร์ ที่ความถี่และเฟสในการกำเนิดสัญญาณสามารถปรับได้เป็นอิสระจากกันแบบมีเงื่อนไขด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และสัญญาณไซน์ในโหมดกระแสสามารถขยายขนาดของสัญญาณได้

## 5.2 อภิปรายผลงานวิจัย

ประเด็นหลักที่ผู้วิจัยจะนำมาอภิปรายเพิ่มเติมในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเตอร์เจอร์รี่ในโหมดแรงดันและสัญญาณไซน์ในโหมดกระแส ที่ควบคุมขนาดของสัญญาณได้ คือ ความแตกต่างกันของสมการที่ทำการวิเคราะห์วงจรในกรณีอุดมคติ และการวิเคราะห์วงจรในกรณีที่มีผลกระทบจากค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากอินพุตไปเป็นกระแสเอาต์พุตของ VDTA ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 นั้น เห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรมีความถี่ในการกำเนิดสัญญาณในช่วงแรกมากกว่าการคำนวณทางทฤษฎีในกรณีอุดมคติเพียงเล็กน้อย เป็นเพราะอยู่ในช่วงทรานซิสเตอร์เริ่มทำงาน จากนั้นเมื่อเพิ่มกระแสไบแอสจะพบว่า ผลจากการจำลองวงจรในโปรแกรม PSPICE มีความถี่ในการกำเนิดสัญญาณน้อยกว่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีในกรณีอุดมคติ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าว เกิดจากผลกระทบจากค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากอินพุตไปเป็นกระแสที่เอาต์พุตของ VDTA ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ (3.45) และสมการที่ (3.46) ในทางปฏิบัตินั้น ค่าพารามิเตอร์เป็นผลมาจากค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงในตัวมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรขยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำกระแส ซึ่งความต้านทานและความจุแฝงมีในทุกขั้วของอุปกรณ์ VDTA ที่ต่อใช้งาน เป็นผลทำให้วงจรให้สมการที่ไม่เป็นไปตามอุดมคตินั้นเอง จึงมีการวิเคราะห์ผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงในตัว VDTA ได้สมการความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ ดังสมการที่ (3.79) และเพื่อเป็นการยืนยันทฤษฎีดังกล่าว จึงมีการนำค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุแฝงในตัว VDTA ที่ได้จากโปรแกรม PSPICE มาคำนวณตามสมการที่ (3.79) จากการคำนวณดังกล่าวพบว่า ค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณที่นำค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุแฝงมาคิดร่วมด้วยตามสมการที่ (3.79) มีค่าน้อยกว่าค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณในกรณีอุดมคติ ผลดังกล่าวทำให้ทราบว่า ความแตกต่างของสมการมีผลต่อการทำงานของวงจร ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องคำนึงถึงผลกระทบดังกล่าวร่วมด้วย และในการนำวงจรไปใช้งานจริง การไบแอสกระแส  $I_B$  ให้กับวงจรทำได้โดยสร้างวงจรสะท้อนกระแสขึ้นมา เพื่อทำการป้อนกระแส  $I_B$  ให้กับวงจร ทำให้ต้องเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์เข้ามาเพื่อสร้างวงจรสะท้อนกระแสขึ้นมา และในตาราง ที่ 5.1 เป็นการเปรียบเทียบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีผู้นำเสนอไว้แล้วกับวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่นำเสนอ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างทั้งเรื่องของอุปกรณ์แอคทีฟที่ใช้ การใช้อุปกรณ์พาสซีฟซึ่งบางวงจรต่อตัวเก็บประจุแบบลอย และบางวงจรมีตัวต้านทานร่วมในวงจร อีกทั้งวงจรที่ศึกษาส่วนใหญ่ไม่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่มีการนำเสนอไว้แล้วกับงานวิจัยที่นำเสนอ

ชื่อผู้วิจัยและปีที่นำเสนอ	ชื่ออุปกรณ์แอคทีฟ	จำนวนอุปกรณ์แอคทีฟ	จำนวนตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ	เอาต์พุตเป็นสัญญาณไซน์ควอเดรเจอร์	COและ FO ควบคุมได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์	COและ FO ควบคุมได้เป็นอิสระจากกัน	สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้
Srivastava, 2014.	VDTA	1	1+2	ทำได้	ทำได้	ทำได้	ทำไม่ได้
Summart et, 2012.	OTA	4	0+2	ทำได้	ทำได้	ทำได้	ทำไม่ได้
สมศักดิ์ สมบูรณ์และคณะ, 2556.	OTA	4	0+2	ทำได้	ทำได้	ทำได้	ทำไม่ได้
มนตรี คำเงิน และกอบชัย เดชหาญ, 2551.	DVCC	2	2+2	ทำได้	ทำไม่ได้	ทำไม่ได้	ทำไม่ได้
Keskin and Biolk, 2006.	CDTA	2	2+2	ทำได้	ทำไม่ได้	ทำได้	ทำไม่ได้
Kumbun et, 2009.	CC-CFA	2	0+2	ทำได้	ทำไม่ได้	ทำได้	ทำไม่ได้
Yucel and Yuce, 2009.	CCII	2	3+2	ทำได้	ทำไม่ได้	ทำได้	ทำไม่ได้
Phanruttanachai and Jaikla, 2013.	DDCC+ VDTA	1+1	1+3	ทำได้	ทำได้	ทำได้	ทำไม่ได้
ศักดิ์สิทธิ์ สุ่มมาตย์ และชาญชัย ทองโสภณ, 2013.	CCCII	3	0+2	ทำได้	ทำไม่ได้	ทำได้	ทำไม่ได้
Maneewan et, 2011	CFTA	1	1+2	ทำได้	ทำได้	ทำไม่ได้	ทำไม่ได้
สุดที่รัก ชูเจริญ, 2557.	VDTA	2	1+2	ทำได้	ทำได้	ทำได้	ทำได้
งานวิจัยที่นำเสนอปี 2014.	VDTA	2	0+2	ทำได้	ทำได้	ทำได้	ทำได้

ผลการเปรียบเทียบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ที่มีการนำเสนอไว้กับวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ที่นำเสนอ โดยใช้อุปกรณ์ VDTA ในการออกแบบ สามารถสรุปข้อดีได้ดังนี้ คือ

- ใช้วงจรมีผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำกระแสจำนวนสองตัว ต่อกับตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์ ทำให้เป็นวงจรกำเนิดความถี่อันดับสองตามสมการและใช้อุปกรณ์จำนวนน้อย
- สามารถให้กำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ และสามารถให้กำเนิดสัญญาณเอาต์พุตกระแสอีกหนึ่งสัญญาณโดยที่สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณได้
- เงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณสามารถปรับได้เป็นอิสระจากกันแบบมีเงื่อนไข และสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

### 5.3.1 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยในครั้งนี

สำหรับการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ที่นำเสนอ ยังพบข้อบกพร่อง คือ การที่สามารถปรับความถี่โดยการปรับทางอิเล็กทรอนิกส์ที่  $I_{B2}$  เพียงอย่างเดียว เพื่อไม่ให้มีผลกระทบกับเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ ทำให้ขนาดแรงดัน  $V_{O1}$  และ  $V_{O2}$  ในแต่ละช่วงความถี่แตกต่างกัน โดยถ้าปรับ  $I_{B2}$  เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดัน  $V_{O2}$  มีขนาดมากกว่า  $V_{O1}$  ซึ่งจะทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์รวมสูงขึ้นด้วย เนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของ VDTA และที่จุดเอาต์พุต  $V_{O1}$  และ  $V_{O2}$  ไม่สามารถนำไปขับโหลดได้โดยตรง จะต้องใช้โวลต์เตจบัฟเฟอร์มาต่อร่วมก่อนจึงจะสามารถนำไปต่อกับโหลดหรือวงจรอื่นได้ และจากการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE วงจรที่ใช้ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าการต่อใช้งาน VDTA หนึ่งตัว จะมีขั้วที่ใช้ปรับกระแส  $I_B$  ด้วยกัน 4 ขั้ว โดยการปรับต้องปรับเป็นคู่ ซึ่งการใช้งานจริง VDTA หนึ่งตัวควรที่จะมีปรับกระแส  $I_B$  แค่เพียง 2 ขั้วเท่านั้น

### 5.3.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยในครั้งต่อไป

จากการทำวิจัยในครั้งนีจึงมีข้อเสนอแนะที่จะสามารถนำไปปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาต่อยอดในครั้งต่อไป ดังนี้ ออกแบบวงจรให้สามารถปรับความถี่โดยที่ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุดในทุกช่วงความถี่ ซึ่งจะเป็นผลดีในการนำวงจรไปใช้งานจริง และเพื่อเป็นการลดอุปสรรคในการนำไปใช้งานจริงวงจรควรที่จะสามารถนำไปต่อกับวงจรภาคอื่นๆได้โดยตรง ส่วนการปรับกระแสที่  $I_B$  เพื่อให้สะดวกกับการนำไปใช้งานจริงควรสร้างวงจรสะท้อนกระแส เพื่อจะทำให้สามารถปรับกระแส  $I_B$  เพียงขั้วเดียว และสะท้อนไปยังอีกขั้วหนึ่ง เช่น จากรูปที่ 4.1 หากจะปรับกระแส  $I_{B1}$  ก็สามารถปรับที่  $I_{B1}$  ขั้วเดียวและให้วงจรสะท้อนกระแส สะท้อนไปยัง  $I_{B1}$  อีกหนึ่งขั้วที่คู่กัน จะทำให้สะดวกแก่การใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นแนวทางแก่ผู้ที่สนใจศึกษา ค้นคว้าเกี่ยวกับวงจรกำเนิดสัญญาณ และนำข้อเสนอแนะนี้ไปปรับปรุง พัฒนา สามารถสังเคราะห์และออกแบบวงจรโดยประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ VDTA นี้ ให้เหมาะสมแก่การนำไปผลิตเป็นวงจรรวมและใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมในอนาคตต่อไป

## บรรณานุกรม

- จิรสุดา เกษร. 2542. “วงจรกรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์.”  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ทันพงษ์ ภูริภักษ์. 2556. “การสังเคราะห์และการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์  
โหมดแรงดันอย่างง่ายโดยใช้วงจรขยายความนำถ่ายโอนผลต่างแรงดัน.”  
ครุศาสตรบัณฑิตสาทรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร. ครุศาสตรบัณฑิตสาทรรม,  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ภมร ศิลาพันธ์, ธนันต์ ศรีสกุล, วินัย ใจกล้า และมนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2549. “วงจรถ้าเนิดสัญญาณแบบ  
ควอดเรเตอร์และวงจรกรองความถี่โหมดกระแสแบบหลายหน้าที่โดยใช้ CDTA ที่ควบคุมด้วย  
กระแส.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 16(2) : 43 – 48.
- มนตรี คำเงิน และกอบชัย เดชหาญ. 2551. “วงจรถ้าเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดเรเจอร์ทำงาน  
ในแบบสัญญาณกระแสด้วยวงจร DVCC.” วิศวกรรมลาดกระบัง. 25(2) : 13 – 18.
- มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2547. “การศึกษาวงจรถ้าเนิดสัญญาณและวงจรถ้าเนิด PWM ที่สามารถควบคุม  
ด้วยกระแสอย่างเป็นอิสระต่อกัน โดยอาศัยหลักการวงจรถ้าเนิด.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร  
ดุขฎิบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง.
- มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2547. “วงจรถ้าเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ชนิดควอดเรเจอร์โหมดกระแสที่ใช้เพียง  
อุปกรณ์แอคทีฟและสามารถควบคุมความถี่ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์.” หน้า 245 – 248.  
ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2551. “การออกแบบและสังเคราะห์วงจรถ้าเนิดสัญญาณในช่วงไม่เป็นเชิงเส้น  
โหมดกระแสโดยใช้วงจรถ้าเนิดสายพานกระแสส่งผ่านความนำที่สามารถควบคุมด้วยกระแส.”  
ครุศาสตรบัณฑิตสาทรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วัลลภ สุระก้าพลธร. 2552. “การวิจัยวงจรถ้าเนิดสัญญาณสำหรับการประมวลผลสัญญาณ.” โครงการวิจัยสถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. [Online]. Available :  
[http://elibrary.trf.or.th/project\\_content.asp?PJID=RTA4680003](http://elibrary.trf.or.th/project_content.asp?PJID=RTA4680003).
- วินัย ใจกล้า. 2553. “การสังเคราะห์และออกแบบวงจรถ้าเนิดสัญญาณซายน์แบบควอดเรเจอร์โหมด  
กระแสโดยใช้ CCCDTA และการประยุกต์ใช้งานกับการศึกษาด้านการออกแบบวงจรถ้า  
อิเล็กทรอนิกส์.” เทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- ศักดิ์สิทธิ์ สุ่มมาตย์ และ ชาญชัย ทองโสภาก. 2556. “วงจรถ้าเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์  
โหมดกระแส 4 เฟส โดยใช้ CCCII.” วิศวกรรมสาร มช.. 40(1) : 117-123.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ. 2555. “การสังเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์โหมดกระแสที่ใช้อุปกรณ์แอกทีฟเพียงอย่างเดียวสำหรับการฝึกรอบรูป.” วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้าศึกษา. บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สมศักดิ์ สมบูรณ์, วรวัฒน์ เสี่ยงมิบูล และเศวช หงส์ประสิทธิ์. 2556. “วงจรถ่ายโอนสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดเรเตอร์ทำงานในโหมดกระแสด้วยวงจรถ่ายโอนนำถ่ายโอน.” หน้า 625 – 633. ใน การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- สุดที่รัก สุขเจริญ, 2557. “การสังเคราะห์และออกแบบวงจรถ่ายโอนสัญญาณไซน์ควอดเรเตอร์โหมดกระแสที่สามารถควบคุมขนาดสัญญาณได้โดยใช้วงจรถ่ายโอนนำถ่ายโอนผลต่างแรงดัน.” คุรุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร. คุรุศาสตร์อุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Chen, J.J., Chen, C.C., Tsao, H.W., and Liu, S.I. 1991. “Current-Mode Oscillator using Single Current follower.” *Electron. Lett*, Vol. 27, pp : 2056-2059.
- Hong, J.W. 2005. “Current conveyors based allpass filters and quadrature oscillators employing grounded capacitors and resistors.” *Computers and Electrical Engineering*. Vol. 31, pp : 81–92.
- Keskin, A.U. and Biolk, D. 2006. “Current mode quadrature oscillator using current differencing transconductance amplifiers (CDTA).” *IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems*. Vol. 153 No. 3, pp : 214-218.
- Khan, I.A. and Khawaja, S. 2000. " An integrable gm-C quadrature oscillator." *International Journal of Electronics*. Vol. 87, pp : 1353-1357.
- Kumbun, J., Silapan, P., Siripruchyanun, M., and Prommee, P. 2009. “A Current-mode Quadrature Oscillator Based on CC-CFAs.” *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* : 978-1-4244-3388-9/09, pp : 542-545.
- Maneevan, S., Sreewirote, B., and Jaikla, W. 2011. “A Current-mode Quadrature Oscillator Using a Minimum Number of Active and Passive Components.” *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* : 978-1-4577-0577-9/11, pp : 312-315.
- Phanrutthanachai, K. and Jaikla, W. 2013. “Third Order Current-mode Quadrature Sinusoidal Oscillator with High Output Impedances.” *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*. Vol. 7, No. 3, pp : 398-401.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Srivastava M., 2014. "Voltage Mode Quadrature Oscillator Employing Single VDTA and Grounded Passive Elements." **Contemporary Engineering Sciences**, Vol. 7, pp : 1501 – 1507.
- Summart, S., Thongsopa, C., and Jaikla, W. 2012. "OTA Based Current-mode Sinusoidal Quadrature Oscillator with Non-interactive Control." **Przegląd elektrotechniczny (electrical review)**. Vol. 88 No. 7a, pp : 14-17.
- Yesil, A., Kacar, F., Kuntman H., 2011. "New Simple CMOS Realization of Voltage Differencing Transconductance Amplifier and Its RF Filter Application." **Radioengineering**, Vol. 20, No. 3, pp : 632-637.
- Yucel, F. and Yuce, E. 2014. "CCII based more tunable voltage-mode all-pass filters and their quadrature oscillator applications." **International Journal of Electronics and Communications**, Vol. 68, pp : 1-9.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MOSFET MODEL PARAMETERS

\*\*\*\*\*

## MODEL PT PMOS

LEVEL = 3	TOX = 5.7E-9	NSUB = 1E17
GAMMA = 0.6348369	PHI = 0.7	VTO = -0.5536085
DELTA = 0	UO = 250	ETA = 0
THETA = 0.1573195	KP = 5.194153E-5	VMAX = 2.295325E5
KAPPA = 0.7448494	RSH = 30.0776952	NFS = 1E12
TPG = -1	XJ = 2E-7	LD = 9.968346E-13
WD = 5.475113E-9	CGDO = 6.66E-10	CGSO = 6.66E-10
CGBO = 1E-10	CJ = 1.893569E-3	PB = 0.9906013
MJ = 0.4664287	CJSW = 3.625544E-10	MJSW = 0.5)

\*\*\*\*\*

## MODEL NT NMOS

LEVEL = 3	TOX = 5.7E-9	NSUB = 1E17
GAMMA = 0.4317311	PHI = 0.7	VTO = 0.4238252
DELTA = 0	UO = 425.6466519	ETA = 0
THETA = 0.1754054	KP = 2.501048E-4	VMAX = 8.287851E4
KAPPA = 0.1686779	RSH = 4.062439E-3	NFS = 1E12
TPG = 1	XJ = 3E-7	LD = 3.162278E-11
WD = 1.232881E-8	CGDO = 6.2E-10	CGSO = 6.2E-10
CGBO = 1E-10	CJ = 1.81211E-3	PB = 0.5
MJ = 0.3282553	CJSW = 5.341337E-10	MJSW = 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวศศิธร จันดี
วัน-เดือน-ปีเกิด	11 พฤศจิกายน 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดยโสธร
ที่อยู่ปัจจุบัน	57/168 โมติวิลล่า ตำบลศาลากลาง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2549 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมหาชนะชัยวิทยาาคม ปีการศึกษา 2555 สำเร็จการศึกษา ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.) สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม (แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษา ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.) สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	ครูผู้สอนแผนกอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีชลบุรี พ.ศ. 2555-2557 นักวิชาการศึกษาปฏิบัติการ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการศึกษาเอกชน สังกัด สำนักงานปลัดกระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงศึกษาธิการ พ.ศ. 2557 – ปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้