

วงจรกําเนิดสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรมอสทรานคอนดักเตอร์  
SINUSOIDAL OSCILLATOR CIRCUIT USING CMOS OPERATIONAL  
TRANSCONDUCTANCE AMPLIFIER CIRCUIT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

ISBN 974-621-997-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 28912

วัน, เดือน, ปี..... 1 พ.ย. 2540

รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SINUSOIDAL OSCILLATOR CIRCUIT USING CMOS OPERATIONAL  
TRANSCONDUCTANCE AMPLIFIER CIRCUIT**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1997

ISBN 974-621-997-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรซิมอสทรานคอนคัตเตอร์
นักศึกษา	นายปิติกันต์ รักราชการ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เฉลยหาญ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2540

#### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการเสนอวงจรสร้างสัญญาณไซน์แบบเลื่อนเฟสโดยใช้วงจรทรานคอนคัตเตอร์ โดยทำให้เป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำและความถี่สูงผ่าน และนำมาต่อแบบป้อนกลับเพื่อให้ได้วงจรกำเนิดสัญญาณ หลักการที่ใช้คือการใช้วงจรเลื่อนเฟสโดยอาศัยวงจรทรานคอนคัตเตอร์ ซึ่งวงจรนี้ยังเหมาะสมในการสร้างเป็นวงจรรวม และเป็นทางเลือกใหม่ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์

**Thesis Title** Sinusoidal Oscillator Circuit Using CMOS Operational Transconductance Amplifier Circuit

**Student** Mr.Pitikan Rughachagam

**Thesis Advisor** Assoc.Prof.Dr. Kobchai Dejhan

**level of study** Master of Engineering in Electrical Engineering

**Department** Telecommunication Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Year** 1997

### Abstract

This thesis presents a phase shift oscillator using transconductor circuit to implement low and high pass filter to oscillate the sinusoidal waveform and used in connection with feedback circuit to oscillation. The technique is to use the phase shift and voltage amplifier based on transconductor circuits. This oscillator circuit is suitable to implement into integrated circuit form and some novel techniques for oscillator circuit design.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา และให้คำปรึกษาในด้านการเรียนและการศึกษาแก่ผู้เขียน ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่า ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่เคารพรักที่ได้ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือผู้เขียนมาตลอด ขอขอบคุณ คุณพิพัฒน์ พรหมมี ที่ได้ให้แนวคิดและแนวทางรวมทั้งให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ได้ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ปิติกันต์ รักราชการ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ที่มาของงานวิจัย.....	1
จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
หลักการใหม่ของวิทยานิพนธ์.....	2
รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	2
2. ทฤษฎีวงจรถูกกำเนิดสัญญาณและการทำงาน.....	4
บทนำ.....	4
ประเภทของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ.....	4
หลักการเบื้องต้นของการกำเนิดสัญญาณ.....	7
หลักการของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนกลับ.....	9
ข้อกำหนดของการกำเนิดสัญญาณรูปไซน์.....	10
ข้อกำหนดและการป้อนกลับของการกำเนิดสัญญาณ.....	12
ข้อกำหนดของการกำเนิดสัญญาณ ในลักษณะของกระแส.....	13
ข้อกำหนดของการกำเนิดสัญญาณ โดยใช้องค์ประกอบของเอชพารามิเตอร์.....	14
วงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส.....	16
บทสรุป.....	21
3. หลักการของวงจรถานคอนดัคเตอร์.....	22
บทนำ.....	22
วงจรถานคอนดัคเตอร์.....	22

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
วงจรพื้นฐานของ OTA .....	25
OTA Building Blocks .....	30
Monolithic Transconductance Amplifier .....	35
บทสรุป.....	39
4. วงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้วงจรถานคอนดักเตอร์ แบบที่ 1.....	40
บทนำ.....	40
ทฤษฎีและหลักการ.....	40
วงจรกำเนิดสัญญาณแบบใหม่ที่นำเสนอ.....	42
การวิเคราะห์ค่าความไวของวงจร.....	47
การทดสอบและผลการทดสอบ.....	50
บทสรุป.....	55
5. วงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้วงจรถานคอนดักเตอร์ แบบที่ 2.....	56
บทนำ.....	56
ทฤษฎีและหลักการ.....	56
การวิเคราะห์ค่าความไวของวงจร.....	60
การทดสอบและผลการทดสอบ.....	63
บทสรุป.....	68
6. การทดลองและผลการทดลอง.....	69
บทนำ .....	69
การทดลองและผลการทดลองของวงจรที่หนึ่ง .....	69
การทดลองและผลการทดลองของวงจรที่สอง .....	73
บทสรุป .....	76
7. สรุปผลและแนะแนวทางการพัฒนา .....	77
แนวทางการพัฒนา .....	79
ภาคผนวก .....	80

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม.....	85
ประวัติผู้เขียน.....	87



# สารบัญญภาพ

หน้า

1	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลือกสัญญาณที่คอลเลกเตอร์ .....	5
2	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Hartley และ Colpitts .....	5
3	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสแบบ Wien bridge โดยใช้อปแอมป์ .....	6
4	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสโดยใช้ทรานซิสเตอร์และอปแอมป์ .....	6
5	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้จิ้นผลึกแบบ ฮาร์ทเลย์ และ คอลพิทท์ .....	6
6	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ไอซีเบอร์ 8038 .....	7
7	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบอุดมคติ .....	7
8	แสดงค่ารากความถี่ธรรมชาติของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบอุดมคติและแบบที่มีการสูญเสีย ....	8
9	แสดงไดอะแกรมการป้อนกลับแบบบวก .....	9
10	แสดงไดอะแกรมวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้การป้อนกลับ .....	12
11	แสดงไดอะแกรมวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนกลับในแบบกระแส .....	13
12	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณที่อธิบาย โดยใช้องค์ประกอบแบบเอช-พารามิเตอร์ .....	14
13	แสดงวงจรเลื่อนเฟสแบบ RC โดยใช้กระแส .....	16
14	แสดงรูปแบบพื้นฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้วงจรเลื่อนเฟสในรูปของแรงดัน .....	17
15	แสดงวงจร โครงข่ายเลื่อนเฟสอันดับสาม .....	17
16	แสดงค่ารากโพลของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส .....	19
17	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสโดยใช้อปแอมป์ .....	20
18	แสดงผลตอบสนองทางความถี่และเฟสของวงจรกำเนิดสัญญาณ ในภาพที่ 17 .....	21
19	แสดงสัญลักษณ์ของ OTA .....	23
20	แสดงวงจรเทียบเท่าทางอุดมคติของ OTA .....	23
21	แสดงวงจรขยาย OTA แบบคู่ดิฟเฟอเรนเชียล .....	24
22	แสดงวงจรขยายกลับขั้วโดยใช้ OTA .....	25
23	แสดงวงจรขยายไม่กลับขั้วโดยใช้ OTA .....	26
24	แสดงวงจรขยายกลับขั้วที่มีการป้อนกลับ .....	26

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
25 แสดงวงจรขยายไม่กลับขั้วที่มีการป้อนกลับ .....	27
26 แสดงวงจรขยายผลต่างโดยใช้ OTA .....	27
27 แสดงวงจรอินทรีเกรเตอร์แบบที่ไม่มีการสูญเสีย .....	28
28 แสดงวงจรอินทรีเกรเตอร์ที่มีการสูญเสีย ที่มีการป้อนกลับ .....	28
29 แสดงวงจรอินทรีเกรเตอร์ที่มีการสูญเสีย ที่ไม่มีการป้อนกลับ .....	29
30 แสดงวงจรดิฟเฟอเรนเชียลโดยใช้ OTA .....	29
31 แสดงวงจรขยายที่ใช้ OTA เป็นโหลด .....	30
32 แสดงวงจรความต้านทานแบบค่อกราวน์ที่ปรับค่าได้ .....	31
33 แสดงวงจรความต้านทานแบบลอยตัวที่ปรับค่าได้ .....	31
34 แสดงวงจรวกโดยใช้ OTA .....	32
35 แสดงวงจรไจเรเตอร์ที่ที่เลียนแบบตัวเหนี่ยวนำชนิดค่อกราวน์โดยใช้ OTA .....	33
36 แสดงวงจรไจเรเตอร์ที่ที่เลียนแบบตัวเหนี่ยวนำชนิดลอยตัวโดยใช้ OTA .....	33
37 แสดงวงจรภายในของ ไอซี OTA .....	35
38 กราฟแสดงคุณสมบัติถ่ายโอนของ OTA .....	37
39 แสดงวงจรขยาย OTA โดยใช้ไอซีเบอร์ CA3080 .....	38
40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอินพุตและเข้าพุตกับกระแสไบอัส $I_B$ .....	39
41 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณ .....	40
42 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ OTA แบบที่หนึ่ง .....	42
43 แสดงไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่ง .....	42
44 แสดงไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีส่วนของการป้อนกลับ .....	43
45 แสดงวงจรขยายแรงดันโดยใช้ OTA .....	45
46 แสดงวงจรความต้านทานทางอิเล็กทรอนิกส์ .....	45
47 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์โดยใช้ OTA แบบที่หนึ่ง .....	46
48 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์โดยใช้วงจรทรานคอนคัคเตอร์แบบง่ายแบบที่หนึ่ง .....	50

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

49	แสดงรูปสัญญาณที่กำเนิดได้ ณ จุดต่างๆสามจุดของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งโดยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice .....	51
50	แสดงรูปสัญญาณที่กำเนิดได้ในรูปของอาณาจักรความถี่ ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งโดยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice .....	51
51	กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุดของวงจรเมื่อปรับค่ากระแสไบอัส.....	52
52	กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุดของวงจรเมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุ .....	53
53	แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Underdamped Oscillation ของวงจรในภาพที่ 48 .....	54
54	แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Overdamped Oscillation ของวงจรในภาพที่ 48 .....	54
55	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้ OTA แบบที่สอง .....	56
56	แสดงไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สอง .....	57
57	แสดงไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีส่วนของการป้อนกลับ .....	57
58	แสดงวงจรกรองอันดับสาม .....	58
59	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์แบบที่สองที่ประกอบด้วยการป้อนกลับที่มีค่าทรานคอนดักแดนซ์สองเท่า .....	60
60	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้วงจรทรานคอนดักเตอร์แบบง่ายแบบที่สอง .....	63
61	แสดงรูปสัญญาณที่กำเนิดได้ ณ จุดต่างๆสามจุดของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สอง โดยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice .....	64
62	แสดงรูปสัญญาณที่กำเนิดได้ในรูปของอาณาจักรความถี่ ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สองโดยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice .....	65
63	กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุดของวงจรเมื่อปรับค่ากระแสไบอัส .....	66
64	กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุดของวงจรเมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุ .....	66
65	แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Underdamped Oscillation ของวงจรในภาพที่ 60 .....	67
66	แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Overdamped Oscillation ของวงจรในภาพที่ 60 .....	67
67	แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งโดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3080E .....	70

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
68 แสดงภาพวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่ง พร้อมวงจรจ่ายกระแสคงตัว.....	70
69 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งจากจอภาพออสซิลอสโคป .....	70
70 กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุทของวงจรที่หนึ่งเมื่อปรับค่ากระแสไบอัส .....	71
71 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สอง โดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3080E .....	73
72 แสดงภาพวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สอง พร้อมวงจรจ่ายกระแสคงตัว .....	74
73 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สองจากจอภาพออสซิลอสโคป .....	74
74 กราฟแสดงค่าเข้าพุทของวงจรที่สองเมื่อปรับค่ากระแสไบอัส .....	75
75 กราฟแสดงค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิครวมของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งและสองจากการทดสอบโดยใช้โปรแกรม Pspice .....	78
76 แสดงแนวทางการปรับปรุงวงจรให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยใช้วงจรรยกกำลังสอง .....	79

# บทที่ 1

## บทนำ

เทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ช่วยทำให้วิชาอิเล็กทรอนิกส์พัฒนาไปมาก ซึ่งช่วยให้เกิดวงจรต่างๆมากมาย วงจรพื้นฐานอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ก็คือ วงจรกำเนิดสัญญาณหรือวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของวงจรรีเลย์ เช่น การตอบสนองความถี่ อัตราการขยาย สำหรับวงจรประเภทดิจิตอลนำไปใช้ในการเข้าจังหวะสัญญาณนาฬิกา เป็นต้น วงจรกำเนิดสัญญาณที่ดีควรมีคุณสมบัติ ดังนี้คือ มีความเพี้ยนในเชิงความถี่และฮาร์โมนิกที่ต่ำ มีขนาดของสัญญาณหรือแอมพลิจูดคงที่ และวงจรที่ได้นั้นก็ควรที่จะปรับเปลี่ยนความถี่ได้ โดยวงจรกำเนิดสัญญาณส่วนใหญ่จะนิยมสร้างมาจากอุปกรณ์จำพวกแอคทีฟ (active) เช่น ทรานซิสเตอร์ และอุปกรณ์จำพวกพาสซีฟ (passive) เช่น ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นหลักการของวงจรรีเลย์ออสซิลเลเตอร์ทั้งชั้นแบบดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งมีเสถียรภาพของวงจรทางด้านอุณหภูมิ และผลการตอบสนองทางความถี่ยังไม่ดีนัก ซึ่งในปัจจุบันก็ได้มีการพัฒนารูปแบบของวงจรกำเนิดสัญญาณให้ดีขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ใหม่ๆ เช่น ออปแอมป์ หรือ มอสเฟต ซึ่งทำให้วงจรมีประสิทธิภาพดีขึ้น และสามารถทำให้มีขนาดเล็กลงเพื่อสะดวกในการออกแบบเป็นวงจรรวมได้ด้วย

### ที่มาของงานวิจัย

การสร้างวงจรรีเลย์สัญญาณโดยใช้วงจรรีเลย์ทรานสดักชันคอนดิเตอร์ ถูกคิดค้นขึ้นมาในช่วงทศวรรษปี 1980 โดยเริ่มแรกเมื่อมีการผลิตวงจรรวมในรูปของไอซีประเภท Monolithic ที่เริ่มมีการใช้เป็นการครั้งแรกในรูปของวงจรรีเลย์ในโหมดแรงดันอยู่ โดยวงจรรีเลย์สัญญาณส่วนมากยังคงใช้เทคโนโลยีทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์อยู่ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน และมีความร้อนสูง จนกระทั่งเทคโนโลยี NMOS และ CMOS กำเนิดขึ้น จึงทำให้วงจรรวมที่ได้เริ่มมีขนาดเล็กลง ราคาต่ำ จึงทำให้มีการนำวงจรรวมมาใช้กันอย่างกว้างขวางและยังสามารถสร้างเป็นวงจรรีเลย์ใหม่ๆได้อีกมากมาย จึงทำให้มีวงจรรีเลย์สัญญาณที่อยู่ในรูปของวงจรรวมอยู่มากมาย แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่บางประการ จนกระทั่งมีการผลิตวงจรรวมอยู่ในรูปของโหมดกระแส ซึ่งทำให้วงจรรีเลย์ทำงานได้ที่ความถี่สูง และมีการรบกวนต่ำ จึงทำให้วงจรรีเลย์สัญญาณสามารถถอดรหัสที่ความถี่สูงๆได้ หลักการของงานนี้เริ่มจาก Grebene (1972) [1] ได้ออกแบบสร้างวงจรรีเลย์สัญญาณ ไซน์ขึ้นมา แต่ก็ยังได้สัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซน์ที่ยังไม่สวยงามนัก จนกระทั่งปี 1994 K.Dejhan et al. [2] ได้ออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์โดยใช้ทรานคอนดักเตอร์ โดยวงจรไม่ซับซ้อนและการตอบสนองไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และในปี 1987 M.T.Abelma และ R.H.Almaskati [3] ได้ออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงมาก สามารถปรับความถี่ได้ และมีค่าความไวต่ำ ทำให้สามารถนำไปผลิตเป็นวงจรรวมได้ หลักการของงานวิจัยนี้จะยังคงใช้หลักการเดิมของการกำเนิดสัญญาณโดยใช้การป้อนกลับ [4] และยังคงใช้หลักการแบบเลื่อนเฟสอยู่แต่จะใช้เทคโนโลยีแบบซิมอสซึ่งทำให้เหมาะสมในการสร้างเป็นวงจรรวม

### จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดจุดประสงค์ไว้ดังนี้

1. เป็นการศึกษาวิจัยและนำเสนอ วงจรกำเนิดสัญญาณแบบใหม่ โดยใช้วงจรซิมอสทรานคอนดักเตอร์ (Transconductance Amplifier)
2. สามารถนำวงจรดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานได้ และสามารถนำไปผลิตเป็นวงจรรวมได้
3. วงจรที่ออกแบบควรมีการใช้อุปกรณ์ให้น้อยที่สุด มีความเพี้ยนต่ำ และสามารถที่จะปรับความถี่ได้โดยใช้กระแส

### หลักการใหม่ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการใหม่ซึ่งจะแตกต่างจากวงจรมกำเนิดสัญญาณแบบเดิมที่เคยนำเสนอไว้ในอดีต จากหลักการทั่วไปของวงจรมกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสในโหมดแรงดัน [5] จะใช้หลักการของวงจรโครงข่าย RC แบบขั้นบันได (RC Ladder) นำมาต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่สูงผ่าน หรือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบอันดับสาม (Third order) แล้วนำมาต่อกับวงจรขยายที่มีค่าอัตราขยายคงที่ค่าหนึ่ง แต่ในหลักการใหม่ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วงจรทรานคอนดักเตอร์หรือวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (Voltage-Controlled-Current-Source, VCCS) และตัวเก็บประจุนำมาต่อร่วมกันเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์แบบที่มีการสูญเสีย (Lossy integrator) หรือต่อเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์แบบที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless integrator) นำมาต่อเข้าต่อกัน และใช้หลักการเพื่อกำหนดเงื่อนไขของการออสซิลเลต ซึ่งวงจรมกำเนิดสัญญาณแบบนี้ สามารถใช้เทคโนโลยีแบบซิมอสในการผลิตได้ สามารถนำไปผลิตเป็นวงจรรวมได้ มีรูปแบบที่ง่าย และมีความเพี้ยนต่ำ

## รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท โดยในบทที่ 1 จะเป็นการกล่าวนำ วัตถุประสงค์ หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาโดยย่อของแต่ละบท โดยมีเนื้อหาดังนี้

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ ประเภทของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ หลักการของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ ข้อกำหนดของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ และหลักการของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส

บทที่ 3 จะกล่าวถึงวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ โครงสร้างของวงจร การสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณโดยใช้ OTA (Operational Transconductance Amplifier) วงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบเวลาต่อเนื่องหรือวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่เกรตเตอร์

บทที่ 4 จะกล่าวถึงวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ ไซน์แบบใหม่ที่ใช้วงจรถูกกำเนิดสัญญาณคอนดัคเตอร์ หลักการทำงาน การวิเคราะห์ค่าความไวของวงจร การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice

บทที่ 5 จะกล่าวถึงวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ ไซน์แบบใหม่ที่ใช้วงจรถูกกำเนิดสัญญาณคอนดัคเตอร์ แบบที่สองซึ่งเป็นอีกแบบหนึ่ง หลักการทำงาน การวิเคราะห์ค่าความไวของวงจร การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice

บทที่ 6 จะกล่าวถึงการทดลองต่อวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ ไซน์ทั้งสองแบบที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยการต่อวงจรลงในโปรโตบอร์ดและปรีแอมป์ประสงค์ โดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3080E

บทที่ 7 เป็นการสรุปรายละเอียดที่สำคัญต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ทั้งหมด ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางแก้ไขและแนวทางการพัฒนาต่อไป

ภาคผนวก จะกล่าวถึงโปรแกรม Pspice ที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของวงจร และบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีวงจรกำเนิดสัญญาณและการทำงาน

#### บทนำ

วงจรกำเนิดสัญญาณหรือวงจรรอสซซิเลเตอร์มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณแบบจูนคอลเลกเตอร์ (Tuned Collector Oscillator), วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส (Phase Shift Oscillator) และวงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Wien Bridge เป็นต้น ซึ่งในบทนี้จะได้ทำการศึกษาเฉพาะวงจรกำเนิดรูปไซน์เท่านั้น ซึ่งทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณที่จุดทางออกของสัญญาณ ซึ่งจะได้อธิบายถึงหลักการและวิธีการออกแบบวงจรต่อไป

#### ประเภทของวงจรกำเนิดสัญญาณ

ประเภทของวงจรกำเนิดสัญญาณสามารถแบ่งได้จากอุปกรณ์ที่ใช้ ซึ่งวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

- 1) วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ LC
- 2) วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ RC
- 3) วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ชิ้นผลึก (Crystal)
- 4) วงจรกำเนิดสัญญาณที่อยู่ในรูปของวงจรรวมสำเร็จรูป

1) วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ LC มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น แบบเลือกความถี่ที่คอลเลกเตอร์ (สำหรับไบโพล่า) หรือเดรน (สำหรับมอสเฟต), แบบ Hartley, แบบ Colpitts เป็นต้น วงจรประเภทนี้มีข้อดีคือ สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ง่าย และใช้งานในย่านความถี่สูงได้ดี แต่ก็มีข้อเสียคือเสถียรภาพทางความถี่ยังไม่ดีนักและมีปัญหาในการผลิตเป็นวงจรรวมเนื่องจากการสร้างตัวเหนี่ยวนำทำได้ยาก แต่ก็ยังเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 1 และ 2

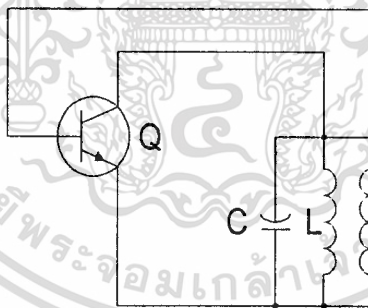
2) วงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้ RC มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น แบบ Wien bridge, แบบเลื่อนเฟส (Phase shift) เป็นต้น วงจรประเภทนี้มีข้อดีคือ สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้เช่นกัน

และใช้งานในย่านความถี่สูงได้ แต่ก็มีข้อเสียคือเสถียรภาพทางความถี่ยังไม่ดีนักเช่นกัน ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 3 และ 4

3) วงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้ชิ้นผลึก มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ แบบขึ้นผลึกต่อระหว่าง B กับ E และแบบขึ้นผลึกต่อระหว่าง C กับ B วงจรประเภทนี้มีข้อดีคือ มีเสถียรภาพทางความถี่ที่ดีมาก และสามารถใช้งานในย่านความถี่สูงได้ดี แต่ก็มีข้อเสียคือการเปลี่ยนแปลงความถี่ทำได้ยากมากหรือทำไม่ได้เลย ซึ่งอาจต้องใช้วงจรอื่น ๆ มาช่วย แต่ก็เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีการนำมาใช้ในวงจรต่าง ๆ มากมาย เช่น นาฬิกา คอมพิวเตอร์ วิทยุสื่อสารหรือวงจรเฟสล็อกคูล (Phase Locked Loop) ซึ่งแสดงวงจรไว้ดังภาพที่ 5

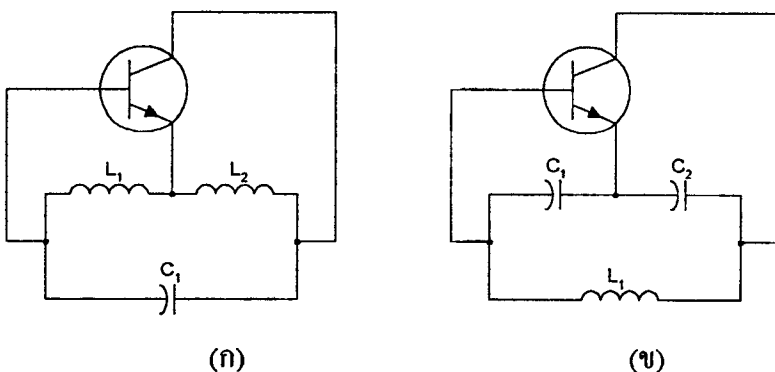
4) วงจรกำเนิดสัญญาณที่อยู่ในรูปของวงจรรวมสำเร็จรูปหรือที่เรียกว่าไอซีฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์ (IC Function Generator) เป็นวงจรรวมที่ผลิตขึ้นมาเพื่อสร้างสัญญาณโดยเฉพาะ เช่น ไอซีเบอร์ XR-2240 หรือเบอร์ 8038 ข้อดีของวงจรมชนิดนี้คือ ใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยาก สามารถปรับความถี่ได้โดยใช้หลักการของ VCO (Voltage Controlled Oscillator) และยังสามารถเลือกรูปร่างของสัญญาณได้หลายแบบ เช่น รูปคลื่นไซน์หรือรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แต่ก็มีข้อเสียคือสามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น ซึ่งแสดงวงจรไว้ดังภาพที่ 6

ภาพที่ 1



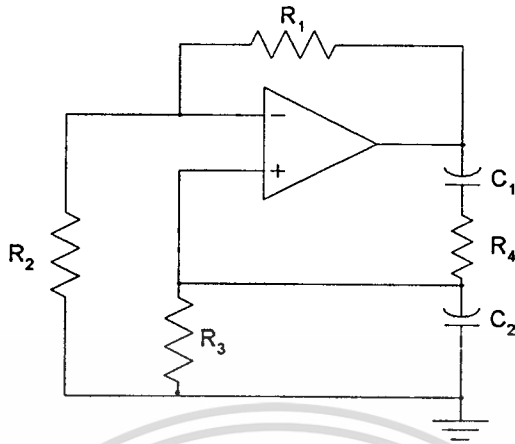
แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลือกสัญญาณที่คอลเลกเตอร์

ภาพที่ 2



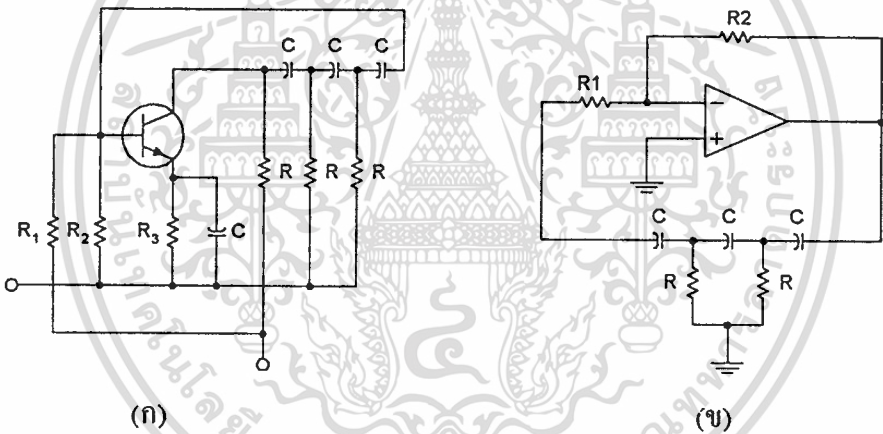
แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ (ก) แบบ Hartley (ข) แบบ Colpitts

ภาพที่ 3



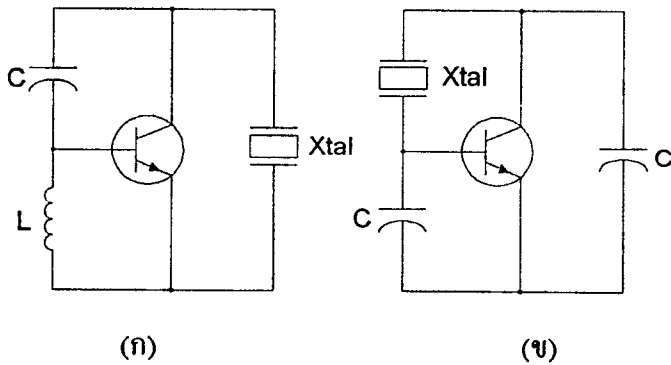
แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสแบบ Wienbridge โดยใช้โอปแอมป์

ภาพที่ 4



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสโดยใช้ (ก) ทรานซิสเตอร์ (ข) โอปแอมป์

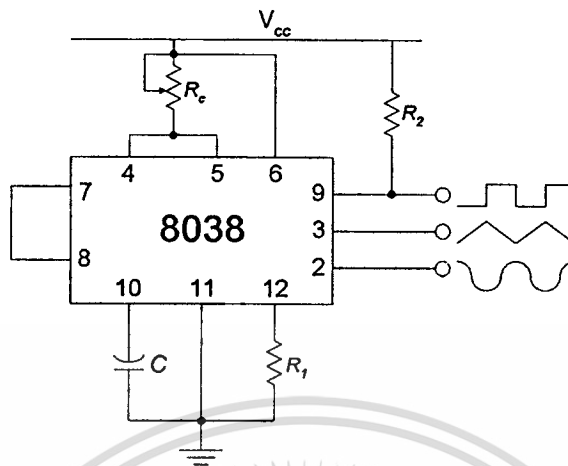
ภาพที่ 5



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ชิ้นผลึกแบบ (ก) Hartley (ข) Colpitts

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

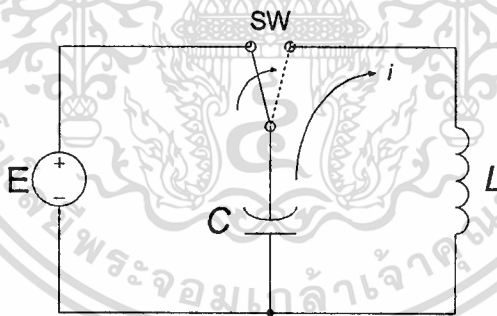
ภาพที่ 6



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ไอซีเบอร์ 8038

หลักการเบื้องต้นของการกำเนิดสัญญาณ

ภาพที่ 7



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบอุดมคติ

ในทางอุดมคติวงจรกำเนิดสัญญาณจะแสดงได้ดังภาพที่ 7 [6] ซึ่งประกอบไปด้วยวงจร LC ถ้าวจรนี้ไม่มีการสูญเสียพลังงานที่ได้จะแปลงกลับไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและแม่เหล็ก ค่าแรงดันและกระแสที่ได้จะเป็นค่าไซน์ที่บริสุทธิ์ โดยสมการทางวงจรไฟฟ้าอธิบายได้โดยใช้สมการอนุพันธ์

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \omega_0^2 v = 0 \quad (2-1)$$

โดยกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad (2-2)$$

ผลเฉลยของสมการจะอยู่ในรูป

$$v = V \exp(j\omega_0 t) + V \exp(-j\omega_0 t) = V \sin \omega_0 t \quad (2-3)$$

ถ้าพิจารณาในรูปของความถี่ สมการคุณสมบัติของวงจรจะเป็น

$$S^2 + \omega_0^2 = 0 \quad (2-4)$$

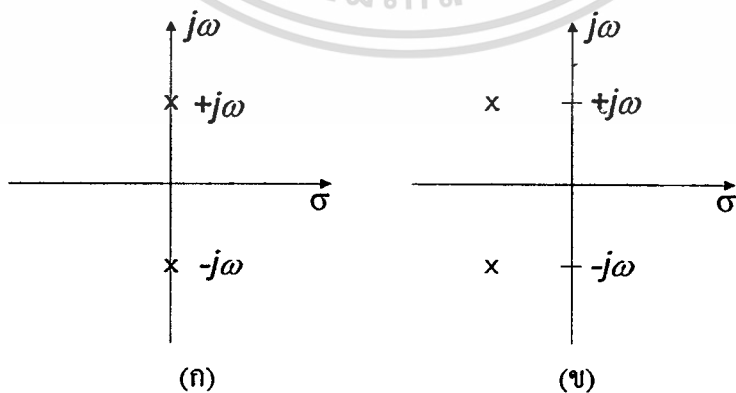
ค่าความถี่ของวงจรหรือค่ารากของสมการจะมีค่าเป็น  $S_1, S_2 = \pm j\omega_0$  หรืออยู่บนแกนจินตภาพซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 8 (ก) แต่ในหลักความเป็นจริงแล้ววงจรนี้จะต้องมีการสูญเสีย (Loss) ของพลังงานไฟฟ้าเนื่องมาจากคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแส ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียขึ้น การออสซิลเลตก็จะค่อยๆ ลดขนาดลงจนกลายเป็นศูนย์ ซึ่งเรียกว่าการออสซิลเลตแบบ Damped Oscillation ซึ่งสมการคุณสมบัติของวงจรในรูปของความถี่จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$S^2 + 2\alpha S + \omega_0^2 = 0 \quad (2-5)$$

ค่ารากของสมการจะอยู่บนระนาบทางซ้ายดังแสดงในภาพที่ 8 (ข) และสำหรับ  $\omega_0 > \alpha$  จะได้ค่ารากสมการคือ

$$S_1, S_2 = -\alpha \pm j\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = -\alpha \pm j\omega_0 \quad (2-6)$$

ภาพที่ 8

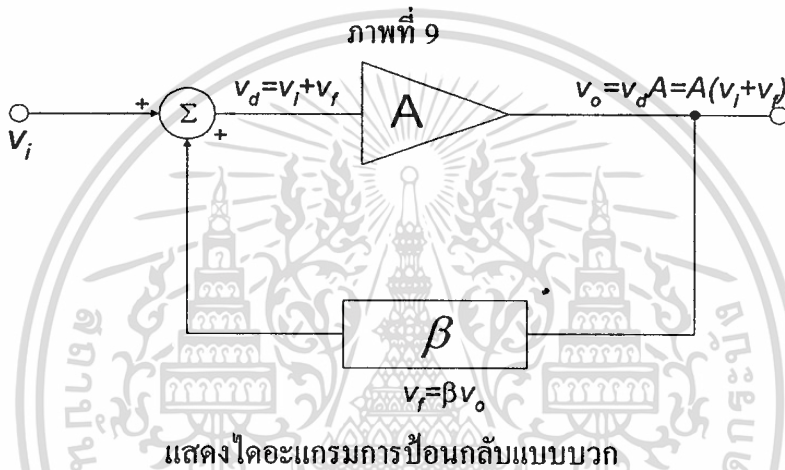


แสดงค่ารากความถี่ธรรมชาติของวงจรกำเนิดสัญญาณ

(ก) แบบอุดมคติ (ข) แบบที่มีการสูญเสีย

### หลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนกลับ

วงจรกำเนิดสัญญาณหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งก็คือวงจรออสซิลเลเตอร์ เป็นวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้หลักการป้อนกลับของสัญญาณ โดยใช้วงจรป้อนกลับ (Feedback Circuit) จากเอาต์พุตกลับเข้ามายังอินพุตที่เป็นแบบบวก ซึ่งเรียกว่า การป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) หรือรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) ซึ่งเขียนไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 9



ในภาพที่ 9 แสดงถึงไดอะแกรมการป้อนกลับแบบบวก ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณอินพุต  $V_i$  และมีสัญญาณป้อนกลับเป็น  $V_f$  และในกรณีที่สัญญาณป้อนกลับมีเฟสตรงกันกับอินพุต ก็จะทำให้สัญญาณที่ป้อนกลับมีค่าเป็นบวกด้วย ดังนั้นค่าสัญญาณความแตกต่าง  $V_d$  จึงมีค่าเป็น

$$V_d = V_i + V_f \quad (2-7)$$

เมื่อมีสัญญาณเข้าไปยังวงจรรขยายที่มีค่าอัตราขยายแรงดันเป็น  $A$  ก็จะทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) มีค่าเป็น

$$V_o = AV_d = A(V_i + V_f) \quad (2-8)$$

จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตก็จะถูกป้อนกลับไปที่ ส่วนรวมสัญญาณ ( $\Sigma$ ) หลังจากผ่านเครือข่ายวงจรป้อนกลับที่มีค่าอัตราขยาย  $\beta$  เป็นอัตราส่วนระหว่าง  $V_f$  กับ  $V_o$  ถ้ากำหนดให้  $A_f$  คืออัตราขยายลูปปิด (closed loop gain) ที่มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตดังสมการ

$$A_f = \frac{V_o}{V_i} \quad (2-9)$$

จากสมการ (2-8) และ (2-9) จะเขียนได้ว่า

$$A_f = \frac{AV_d}{V_d - V_f} = \frac{AV_d}{V_d - \beta V_o} = \frac{AV_d}{V_d - \beta AV_d} = \frac{AV_d}{V_d(1 - \beta A)}$$

จะได้

$$A_f = \frac{A}{1 - \beta A} \quad (2-10)$$

จากสมการข้างบนเราเรียกค่า  $A\beta$  ว่าอัตราขยายลูป (Loop Gain) จากสมการที่ (4) ถ้ากำหนดให้  $A\beta = 1$  จะทำให้อัตราขยาย  $A_f$  เป็นอนันต์นั่นคือ

$$A_f = \frac{1}{1 - A\beta} = \frac{1}{1 - 1} = \text{infinity } (\infty)$$

นั่นคือสถานะที่แรงดันเข้าพูดค่าใดค่าหนึ่ง ในขณะที่ไม่มีค่าแรงดันอินพุตให้กับระบบ แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถผลิตสัญญาณเข้าพูดได้โดยไม่ต้องมีแรงดันอินพุต ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่สำคัญอย่างหนึ่งในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณ

### ข้อกำหนดของการกำเนิดสัญญาณรูปไซน์

การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณในแต่ละแบบย่อมมีข้อกำหนดของแต่ละวงจรที่แตกต่างกันไป เช่นการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมสามารถสร้างได้ง่าย โดยการต่อวงจรในลักษณะการป้อนกลับแบบบวกกับออปแอมป์เพื่อใช้ขับสัญญาณด้านบวกและลบสลับกันไป สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบฟันเลื่อยก็สามารถสร้างได้ง่ายโดยใช้การอินทิเกรตสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความเที่ยงตรง และการสร้างสัญญาณรูปไซน์ก็สามารถสร้างได้จากสัญญาณฟันเลื่อยได้เช่นกัน แต่สัญญาณที่ได้จะมีความเพี้ยนสูง ดังนั้นการสร้างสัญญาณรูปไซน์จึงต้องมีวิธีการพิเศษ ซึ่งสามารถสรุปได้จากข้อกำหนดของ Barkhausen Criterion

ข้อกำหนดของ Barkhausen ได้อธิบายไว้ว่า การสร้างสัญญาณไซน์ที่บริสุทธิ์ (pure sine) จะต้องประกอบด้วยเงื่อนไขสามประการคือ [7]

- 1) วงจรที่ใช้กำเนิดสัญญาณต้องเป็นวงจรป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลคูณของวงจรมีค่าป้อนกลับ ( $\beta$ ) กับอัตราขยายรูปเปิด ( $A$ ) จะต้องมามีค่าเท่ากับหนึ่ง

3) ค่าเฟสของวงจรสร้างความถี่จะต้องมีการเลื่อนไป  $0^\circ$  หรือ  $360^\circ$  และจะต้องมีเพียงความถี่เดียวเท่านั้น

ข้อกำหนดทั้งสามข้อนี้เรียกว่า "ข้อกำหนดของ Barkhausen Criterion" ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอาจมีวิธีการอื่นที่สามารถสร้างสัญญาณไซน์ได้อีก แต่ข้อกำหนดนี้เป็นหลักการพื้นฐานของวงจรมีค่าป้อนกลับสัญญาณอื่นๆอีกหลายชนิดที่มีการใช้กัน

พิจารณาข้อกำหนดในข้อแรกพบว่าสามารถทำได้ง่าย ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถสร้างได้โดยใช้โอปแอมป์ที่ใช้ขั้วอินพุตส่วนที่ไม่กลับขั้ว (Non-inverting Input) และสามารถสร้างวงจรมีค่าป้อนกลับแบบบวกได้โดยเชื่อมต่อเอาต์พุตกลับไปยังขั้วอินพุตส่วนที่ไม่กลับขั้วเช่นกัน

พิจารณาข้อกำหนดในส่วนที่สอง อาจมีความแตกต่างจากกรณีทั่วไปอยู่บ้าง โดยปกติแล้ววงจรมีค่าป้อนกลับแบบลบ หรือ Negative Feedback ซึ่งเขียนสมการฟังก์ชันโอนย้ายได้เป็น

$$H(s) = \frac{A}{1 + A\beta}$$

แต่ในวงจรมีค่าป้อนกลับแบบบวกค่า  $A\beta$  จะมีค่าเป็นลบดังแสดงในสมการ (2-10)

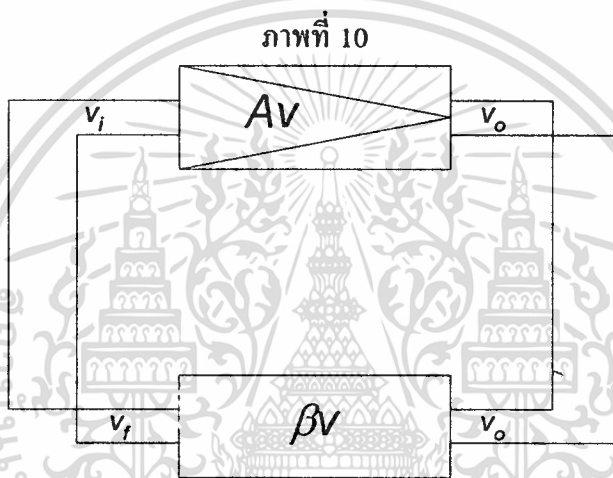
จากสมการข้างบนพบว่าอัตราการขยายของวงจรมีค่ามากกว่าอัตราขยายรูปเปิด เช่น ถ้า  $A\beta = 0.9$  แล้วอัตราขยายอาจมีค่าเป็นสิบเท่าของอัตราขยายรูปเปิด ในวงจรมีค่าป้อนกลับแบบบวกประกอบด้วยสัญญาณอินพุต แต่ในวงจรมีค่าป้อนกลับแบบลบจะไม่มีสัญญาณอินพุต และการกำเนิดสัญญาณต้องเริ่มจากศูนย์ ดังนั้นค่า  $A\beta$  จะต้องมามีค่าเป็นหนึ่งเท่านั้นจึงจะทำให้วงจรมีค่าป้อนกลับแบบบวกสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์และถูกต้อง แต่ถ้า  $A\beta > 1$  จะทำให้มีพลังงานส่วนหนึ่งจากเอาต์พุตซึ่งเกินความจำเป็นถูกป้อนกลับเข้ามาอีกซึ่งทำให้ขนาดสัญญาณเอาต์พุตมีขนาดสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเรียกว่าการออสซิลเลตแบบ Overdamped Oscillation และในกรณีที่  $A\beta < 1$  ขนาดของสัญญาณที่เอาต์พุตมีค่าต่ำเกินไปที่จะทำให้เกิดการออสซิลเลต ขนาดของเอาต์พุตจะมีขนาดลดลงเรื่อยๆจนเป็นศูนย์

พิจารณาข้อกำหนดในส่วนที่สาม อาจอธิบายได้ง่ายๆว่าในส่วนป้อนกลับของวงจรมีค่าป้อนกลับประกอบไปด้วยตัวต้านทานทำหน้าที่เป็นวงจรมีค่าป้อนกลับจากเอาต์พุตป้อนกลับอินพุตแบบไม่กลับขั้ว ซึ่งทำให้เฟสของวงจรเลื่อนไป  $0^\circ$  หรือ  $360^\circ$  ซึ่งการเลื่อนเฟสจะสามารถทำได้ในทุกๆความถี่

ในการวิเคราะห์ฟูเรียร์ของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมหรือสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจะประกอบไปด้วยผลบวกของสัญญาณไซน์ที่ฮาร์โมนิกต่างๆมากมาย ซึ่งฮาร์โมนิกต่างๆเหล่านี้ยังมีมากขึ้นเท่าใดก็จะทำให้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมหรือฟันเลื่อยมีความเพี้ยนน้อยลงเท่านั้น แต่สำหรับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ จะต้องประกอบด้วยความถี่เพียงความถี่เดียวเท่านั้น ความถี่ที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้คือความถี่ของสัญญาณ จากข้อกำหนดนี้ทำให้เกิดวงจรถ้าเน็คสัญญาณไซน์ได้สองแบบคือ วงจรถ้าเน็คสัญญาณแบบเลื่อนเฟส (Phase-Shift Oscillator) และวงจรถ้าเน็คสัญญาณแบบไม่เลื่อนเฟสหรือวงจรถ้าเน็คสัญญาณแบบ Wien Bridge ซึ่งจะได้อธิบายหลักการของวงจรในหัวข้อถัดไป

### ข้อกำหนดและการป้อนกลับของวงจรถ้าเน็คสัญญาณ



แสดงโคจรแอมพลิจูดของวงจรถ้าเน็คสัญญาณ โดยใช้การป้อนกลับ

วงจรถ้าเน็คสัญญาณในภาพที่ 10 เป็นวงจรที่ทำงานอยู่ในรูปของแรงดัน ถ้ากำหนดให้อัตราขยายของวงจรมีค่าเป็น  $A_v$  และอัตราขยายตัวป้อนกลับมีค่าเป็น  $\beta_v$  จะได้ว่า

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad (2-11)$$

$$\beta_v = \frac{v_f}{v_o} \quad (2-12)$$

ถ้า  $v_f > v_i$  การออสซิลเลตก็จะเริ่มขึ้น และได้ค่าอัตราขยายรูปเป็น

$$A_v \beta_v = \frac{v_f}{v_i} > 1 \quad (2-13)$$

จากสมการที่ (2-13) เป็นสมการข้อกำหนดของการออสซิลเลต และถ้าต้องการให้เกิดการออสซิลเลตอย่างต่อเนื่องจะต้องทำให้ค่าอัตราขยายรูปมีค่าเป็นหนึ่ง นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_v \beta_v = 1 \tag{2-14}$$

ในสมการที่ (2-14) เรียกว่าสมการของการออสซิลเลตอย่างต่อเนื่อง และเนื่องจากค่าของ  $A_v$  และ  $\beta_v$  จะมีค่าเป็นเลขจำนวนเชิงซ้อน (Complex Number) ค่าที่ได้จะมีอยู่สองส่วน ส่วนแรกเป็นค่าจำนวนจริง และอีกส่วนหนึ่งเป็นจำนวนจินตภาพ (Imaginary Number) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

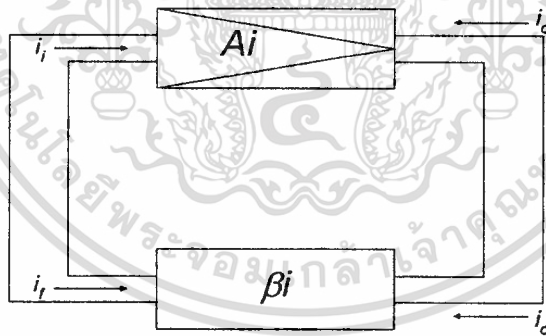
$$\text{ส่วนจำนวนจริง } \text{Re} (A_v \beta_v) = 1 \tag{2-15}$$

$$\text{ส่วนจำนวนจินตภาพ } \text{Im} (A_v \beta_v) = 0 \tag{2-16}$$

โดยสมการที่ (2-15) เรียกว่า ข้อกำหนดของขนาดแรงดันสัญญาณ ซึ่งใช้หาค่าของ  $A_v$  และ  $\beta_v$  ที่ทำให้เกิดการออสซิลเลตแบบต่อเนื่องได้ ส่วนสมการที่ (2-16) เรียกว่าข้อกำหนดของความถี่สัญญาณ ซึ่งจะใช้ในการหาค่าความถี่ของวงจร

ข้อกำหนดของการกำเนิดสัญญาณในลักษณะของกระแส

ภาพที่ 11



แสดงไดอะแกรมวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนกลับในแบบกระแส

ถ้ากำหนดให้  $A_i = \frac{i_o}{i_i}$  และ  $\beta_i = \frac{i_f}{i_o}$  จะได้

$$A_i \beta_i = \frac{i_f}{i_i}$$

เงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณจะเริ่มขึ้นเมื่อ  $i_f > i_i$  นั่นคือ

$$A_i \beta_i = \frac{i_f}{i_i} > 1 \text{ (เงื่อนไขของการเริ่มกำเนิดสัญญาณ)} \tag{2-17}$$

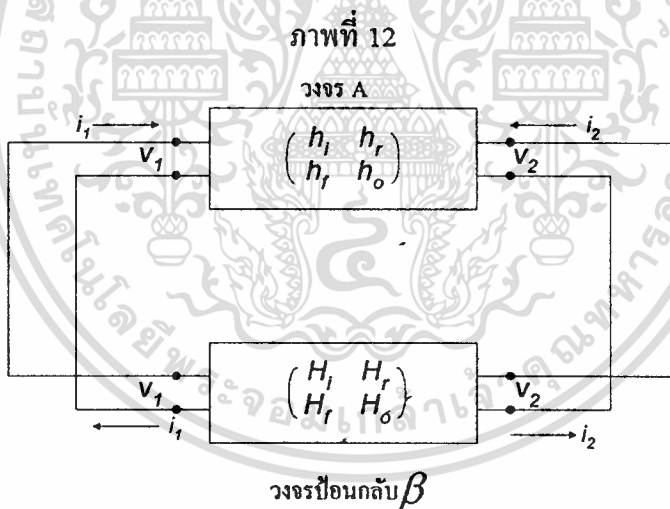
เงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณแบบต่อเนื่องจะเกิดขึ้นเมื่อ  $i_r = i_i$  นั่นคือ

$$A_i \beta_i = \frac{i_f}{i_i} = 1 \text{ (เงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณแบบต่อเนื่อง)} \quad (2-18)$$

ในสมการที่ (2-18) ก็ยังคงแยกออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนจริง และส่วนจินตภาพ โดยส่วนจริงคือข้อกำหนดของกระแสที่ทำให้เกิดการออสซิลเลตอย่างต่อเนื่อง และในส่วนจินตภาพจะเรียกว่าข้อกำหนดทางความถี่ของสัญญาณ

ข้อกำหนดของการกำเนิดสัญญาณ โดยใช้องค์ประกอบของพารามิเตอร์แบบ  $h$

องค์ประกอบของพารามิเตอร์แบบ  $h$  ( $h$ -parameter) เป็นวิธีที่ใช้อธิบายเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณแบบที่มีการป้อนกลับอีกแบบหนึ่ง ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 12



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบป้อนกลับที่อธิบายโดยใช้พารามิเตอร์แบบ  $h$

จากภาพที่ 12 เป็นองค์ประกอบเอชที่อยู่ในวงจร A ที่อยู่ในรูปของ  $h_i$ ,  $h_r$ ,  $h_f$  และ  $h_o$  ส่วนองค์ประกอบของเอชที่อยู่ในวงจรป้อนกลับ  $\beta$  จะอยู่ในรูปของ  $H_i$ ,  $H_r$ ,  $H_f$  และ  $H_o$  ตามลำดับ

จากทฤษฎีโครงข่ายสี่จุดที่ใช้องค์ประกอบเอชคือ

$$v_1 = h_i i_1 + h_r v_2 \quad (2-19)$$

$$i_1 = h_f i_1 + h_o v_2 \quad (2-20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2-19) และ (2-20) แสดงถึงสมการของวงจร A และสำหรับวงจรป้อนกลับ  $\beta$  จะได้สมการดังนี้คือ

$$v_1 = H_i(-i_1) + H_r v_2 \quad (2-21)$$

$$-i_2 = H_f(-i_1) + H_o v_2 \quad (2-22)$$

นำสมการ (2-19) - (2-21) จะได้

$$0 = (h_i + H_i)i_1 + (h_r - H_r)v_2 \quad (2-23)$$

นำสมการ (2-20) - (2-22) จะได้

$$0 = (h_f - H_f)i_1 + (h_o - H_o)v_2 \quad (2-24)$$

จากสมการ (2-23) และ (2-24) สามารถหาค่า  $i_1$  และ  $v_2$  ได้จาก

$$i_1 = \frac{\begin{vmatrix} 0 & (h_r - H_r) \\ 0 & (h_o - H_o) \end{vmatrix}}{\det} \quad (2-25)$$

$$v_2 = \frac{\begin{vmatrix} (h_i - H_i) & 0 \\ (h_f - H_f) & 0 \end{vmatrix}}{\det} \quad (2-26)$$

โดยที่  $\det$  มีค่าเท่ากับ

$$\det = (h_i + H_i)(h_o - H_o) - (h_r - H_r)(h_f - H_f)$$

กำหนดให้เงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณเป็น

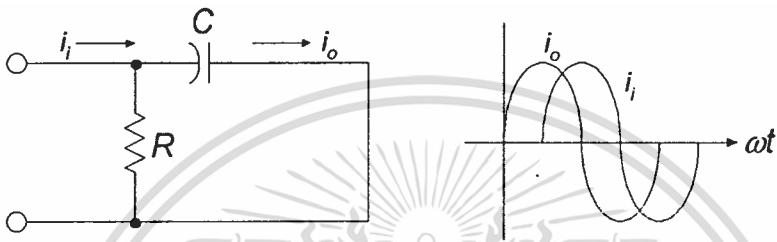
$$\det = 0 \quad (2-27)$$

ในสมการที่ (2-27) คือข้อกำหนดของการกำเนิดสัญญาณแบบต่อเนื่อง โดยสมการนี้จะประกอบไปด้วยส่วนจริง และส่วนจินตภาพ โดยส่วนจริงจะเป็นข้อกำหนดของขนาดแรงดันสัญญาณ และส่วนจินตภาพจะเป็นข้อกำหนดของความถี่สัญญาณ

## วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส

วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส [8] เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณอีกแบบหนึ่งที่ถูกเสนอโดย Ginzton และ Hillingsworth [9] ในปี ค.ศ. 1941 ซึ่งวงจรพื้นฐานจะประกอบไปด้วย วงจรขยายสัญญาณและวงจรเลื่อนเฟสแบบ RC

ภาพที่ 13



แสดงวงจรเลื่อนเฟสแบบ RC โดยใช้กระแส

จากภาพที่ 13 หาความสัมพันธ์ระหว่าง  $i_o$  กับ  $i_i$  ได้เป็น

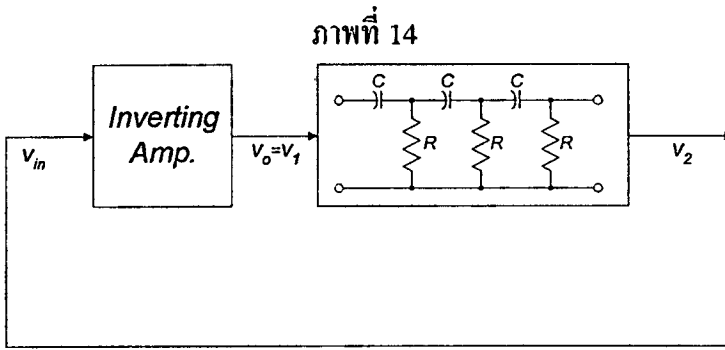
$$i_o = \frac{R}{R + sC} i_i = \frac{j\omega CR}{j\omega CR + 1} i_i \quad (2-28)$$

ถ้ากำหนดให้  $\frac{1}{\omega C} \gg R$  ก็จะได้

$$i_o \approx j\omega CR i_i \quad (2-29)$$

นั่นคือ เฟสของกระแส  $i_o$  จะนำหน้า  $i_i$  อยู่ 90 องศา

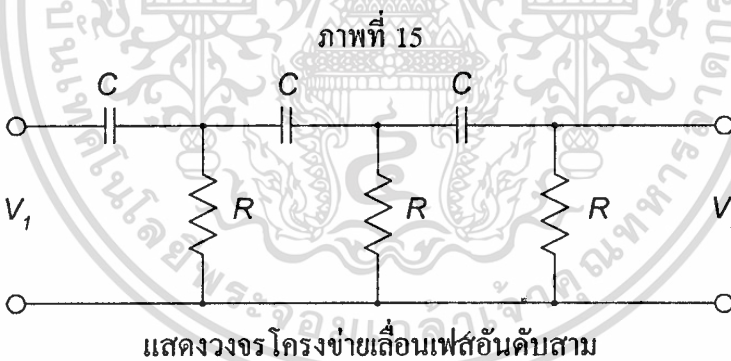
จากวงจรในภาพที่ 13 ถ้ากำหนดให้แต่ละวงจรสามารถเลื่อนเฟสออกไปได้ 60 องศา นำวงจรนี้มาต่ออนุกรมกัน 3 วงจรก็จะทำให้เฟสของกระแสเลื่อนออกไปได้ถึง  $60 \times 3 = 180$  องศา โดยการนำเอาวงจรเลื่อนเฟสเหล่านี้มาต่อกับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ก็จะทำให้เกิดค่าความถี่ที่แน่นอนค่าหนึ่งของการป้อนกลับ ซึ่งก็จะทำให้วงจรเกิดการออสซิลเลตได้



แสดงรูปแบบพื้นฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้วงจรเลื่อนเฟสในรูปของแรงดัน

ในภาพที่ 14 ประกอบไปด้วยวงจรเลื่อนเฟสซึ่งสามารถเลื่อนเฟสของแรงดันออกไปได้ 180 องศา [10] และวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสซึ่งจะทำการเลื่อนเฟสออกไปอีก 180 องศา ก็จะทำให้วงจรกำเนิดสัญญาณนี้มีการเลื่อนเฟสออกไปทั้งหมด  $180 + 180 = 360$  องศา โดยค่าแรงดันที่เข้าพุดจะถูกป้อนกลับ ไปเป็นอินพุตของวงจรเลื่อนเฟส นั่นคือ

$$V_1 = V_o \quad (2-30)$$



เนื่องจากวงจรที่ทำการวิเคราะห์เป็นวงจรกรองอันดับสามดังแสดงในภาพที่ 15 และจากสมการ โอนย้ายของรูปเกนที่มีค่าเท่ากับหนึ่งมีค่าเท่ากับฟังก์ชัน โพลีโนเมียลอันดับสามที่อยู่ในรูปความสัมพันธ์

$$1 - A_v \beta_v = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2-31)$$

จากสมการ (2-31) พบว่า  $N(s)$  ต้องมีค่าเป็นศูนย์สมการจึงจะมีความถูกต้องโดยค่า  $N(s)$  จะอยู่ในรูปสมการ โพลีโนเมียล

$$a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 = 0 \quad (2-32)$$

ถ้ากำหนดให้สมการ (2-32) อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ โดยให้  $s = j\omega$  จะได้ว่า

$$N(s) = a_0(j\omega)^3 + a_1(j\omega)^2 + a_2(j\omega) + a_3$$

$$0 = -j\omega^3 a_0 - \omega^2 a_1 + j\omega a_2 + a_3$$

จากสมการข้างบนเทียบสัมประสิทธิ์ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน  $s+j\omega$  ได้เป็นสมการในส่วนจริงจะมีค่าเป็น

$$a_3 - \omega^2 a_1 = 0 \quad (2-33)$$

$$\omega^2 = \frac{a_3}{a_1}$$

สมการในส่วนจินตภาพจะมีค่าเป็น

$$a_2 - \omega^2 a_0 = 0 \quad (2-34)$$

$$\omega^2 = \frac{a_2}{a_0}$$

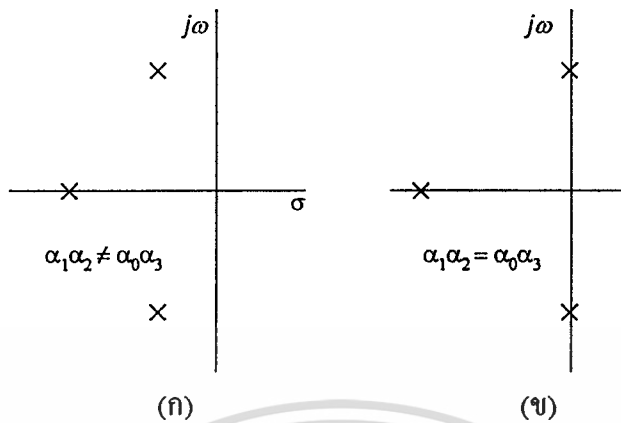
จากสมการ (2-33) เท่ากับ (2-34) แสดงเงื่อนไขของการออสซิลเลตได้เป็น

$$a_0 a_3 - a_2 a_1 = 0 \quad (2-35)$$

จากสมการที่ (2.35) แสดงค่าของโพลของเงื่อนไขได้ดังภาพที่ 16 โดยในภาพที่ 16 (ก) แสดงถึงกรณีต่างๆ ไปของโพลีโนเมียลอันดับสามที่มีโพลคอนจูเกตเชิงซ้อนหนึ่งคู่ และค่าโพลตัวที่สามเป็นค่าจริง เมื่อ  $a_0 a_3 - a_2 a_1 = 0$  แล้วค่าโพลคอนจูเกตจะเลื่อนไปอยู่บนแกนจินตภาพดังแสดงในภาพที่ 16 (ข) และจากสมการ (2-32) ก็จะกลายเป็น

$$a_0(s + \alpha_1)(s^2 + \omega_0^2) = 0 \quad (2-36)$$

ภาพที่ 16



แสดงค่ารากโพลของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส

จากภาพที่ 15 แสดงค่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ได้เป็น

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{(RCs)^3}{(RCs)^3 + 6(RCs)^2 + 5(RCs) + 1} \quad (2-37)$$

ถ้านำวงจรในภาพที่ 15 มาเชื่อมต่อกับคาบคเคกับวงจรขยายออปแอมป์ที่กลับขั้วที่มีค่าอัตราขยาย  $(-R_2 / R_1)$  ดังแสดงในภาพที่ 17 อัตราขยายลูบจะมีค่าเป็น

$$A_v \beta_v = \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{-R_2}{R_1} \quad (2-38)$$

จากวงจรในภาพที่ 17 ค่าความต้านทานอินพุตของวงจรขยายกลับขั้ว  $R$ , สามารถแทนค่า  $R$  ทางด้านปลายของ  $V_2$  ได้ทำให้ลดค่าความต้านทานลงไปได้หนึ่งตัว และถ้ากำหนดให้สมการ (2-31) มีค่าเท่ากับศูนย์ และกำหนดให้  $k = [-R_2/R_1]$  ก็จะได้ว่า

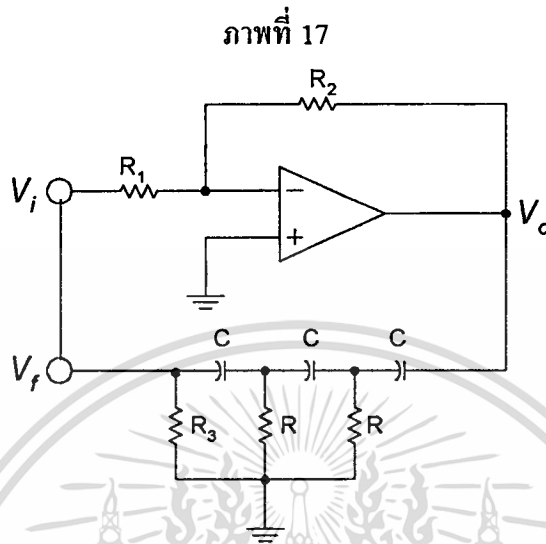
$$(1+k)(RCs)^3 + 6(RCs)^2 + 5(RCs) + 1 = 0 \quad (2-39)$$

จากข้อกำหนดของการออสซิลเลตในสมการที่ (2-35) สามารถหาค่าอัตราขยายของวงจรกำเนิดสัญญาณโดยการเทียบสัมประสิทธิ์ในสมการ (2-39) ได้คือ

$$5 \times 6 - (1+k) \times 1 = 0 \quad \text{หรือ} \quad k = 29 \quad (2-40)$$

จากข้อกำหนดทางความถี่ของการออสซิลเลตในสมการที่ (2-33) และ (2-34) สามารถหาค่าความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณโดยการเทียบสัมประสิทธิ์ในสมการ (2-39) ได้คือ

$$\omega^2 = \frac{1}{6R^2C^2} \quad \text{หรือ} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{6RC}} \quad (2-41)$$



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลือนเฟสโดยใช้ออปแอมป์

พิจารณาได้จากภาพที่ 17 ถ้าอัตราขยายของออปแอมป์มีค่าเป็น  $V_o/V_i$  ค่าอัตราขยายย้อนกลับ ( $\beta$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $V_f/V_o$  และจากเงื่อนไขของการออสซิลเลต  $A_v\beta = 1$  เฟสของแรงดันย้อนกลับ  $V_f$  จะต้องมามีค่าเท่ากับเฟสของแรงดันอินพุต  $V_i$  ดังนั้นเมื่อ  $V_f$  เชื่อมต่อกับ  $V_i$  การออสซิลเลตก็จะเริ่มขึ้น

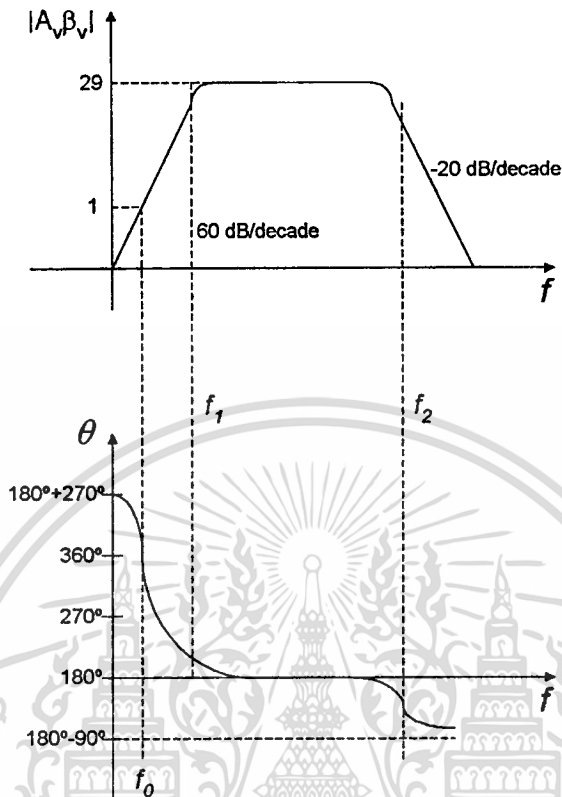
ในภาพที่ 18 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และเฟสของวงจรกำเนิดสัญญาณในภาพที่ 17 ในขณะที่ออปแอมป์มีอัตราขยาย  $R_f/R_i$  ในช่วงย่านความถี่กลางเฟสจะเลื่อนออกไป 180 องศา และในย่านความถี่สูงค่าอัตราขยายจะลดลงประมาณ 20 dB ต่อ decade และค่ามุมเฟสจะถูกลี้นออกไปอีก 90 องศา ดังนั้นจากสมการ (2-40) และ (2-41) สามารถหาค่าอัตราขยายและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้คือ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}} \quad (2-42)$$

และ

$$\frac{V_o}{V_f} = -\frac{1}{29} \quad (2-43)$$

ภาพที่ 18



แสดงผลตอบสนองทางความถี่และเฟสของวงจรกำเนิดสัญญาณในภาพที่ 17

บทสรุป

ในบทที่ 2 นี้ เป็นการอธิบายเกี่ยวกับรูปแบบของวงจรกำเนิดสัญญาณ, เงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณ และ หลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส รวมถึงการป้อนกลับของวงจรซึ่งเป็นหลักการที่สำคัญของวงจรกำเนิดสัญญาณ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็ได้ใช้หลักการป้อนกลับเพื่อกำเนิดสัญญาณเช่นเดียวกัน ซึ่งในบทต่อไปจะได้อธิบายถึงวงจรทรานคอนคัคเตอร์ และ วงจรเลือกความถี่หรือฟิลเตอร์เพื่อใช้ในการสร้างวงจรต่อไป

## บทที่ 3

### หลักการของวงจรทรานคอนดักเตอร์

#### บทนำ

ในปัจจุบันการประมวลผลสัญญาณในโหมดกระแสได้มีบทบาทอย่างมากในวิชาอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากการประมวลผลในโหมดกระแสมีข้อดีว่าการประมวลผลในโหมดแรงดันหลายประการ เช่น ค่าแถบความถี่ (bandwidth) ที่กว้างกว่า, ค่าความกว้าง (dynamic range) ที่สูงขึ้น และที่สำคัญคือ ใช้แรงดันไฟเลี้ยงที่ต่ำกว่า [11] ซึ่งวงจรประมวลผลในโหมดกระแสมีอยู่หลายชนิด รวมทั้งวงจรทรานคอนดักเตอร์ ซึ่งเป็นวงจรที่นำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น วงจรขยายสัญญาณ วงจรกรองสัญญาณ วงจรความต้านทานเสมือน เป็นต้น ซึ่งในบทนี้จะเป็นการแนะนำวงจรทรานคอนดักเตอร์แบบต่างๆ และหลักการพื้นฐาน รวมทั้งการนำวงจรนี้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกรองสัญญาณหรือฟิลเตอร์ เพื่อใช้ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณต่อไป

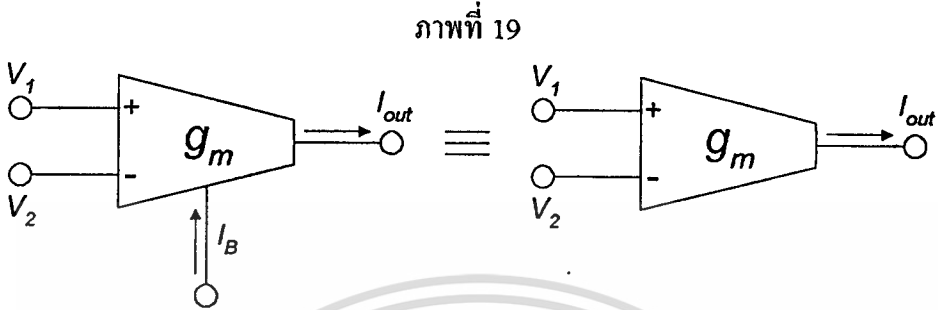
#### วงจรทรานคอนดักเตอร์

Operational Amplifier หรือ op-amp ถือเป็นวงจรถ่ายชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในการสร้างวงจรถ่ายหรือวงจรประมวลผลแบบอนาล็อกเป็นอย่างมาก และที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านวงจรดิจิตอลได้ แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีวงจรถ่ายอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีหลักการมาจากออปแอมป์ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากคือ วงจรถ่ายทรานคอนดักแตนซ์ (Operational Transconductance Amplifier) หรือเรียกสั้นๆว่า OTA โดยจะให้เอาพุตเป็นกระแสจากอินพุตที่เป็นแรงดัน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีค่าแบนด์วิธสูงกว่าออปแอมป์ธรรมดาทั่วไป และทำให้การสร้างวงจรกรองสัญญาณง่ายขึ้นด้วย อีกทั้งยังสามารถสร้างหรือออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีแบบซิมอสได้ด้วย

วงจรทรานคอนดักเตอร์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า OTA เป็นวงจรถ่ายอีกชนิดหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแส จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ประเภท active element แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VCCS (Voltage Controlled Current Source) โดยมีสัญญาณอินพุตเป็นแรงดัน และสัญญาณเข้าพุตเป็นกระแส ซึ่งแสดงสัญญาณของวงจร ได้ดังภาพที่ 19



แสดงสัญลักษณ์ของ OTA

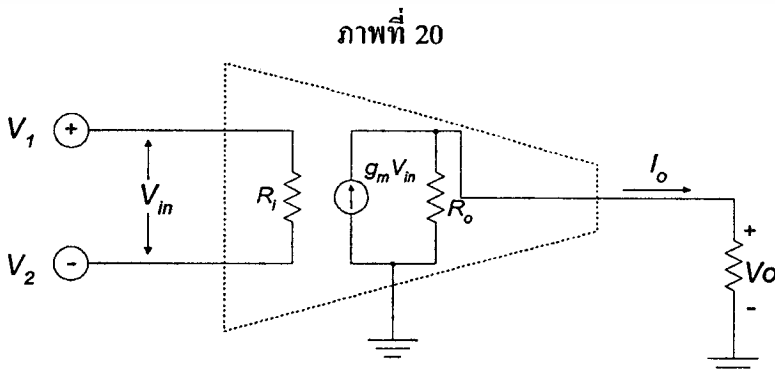
สัญลักษณ์ของ OTA แสดงได้ในภาพที่ 19 ซึ่งประกอบด้วยขั้วอินพุตสามขั้ว และขั้วเข้าพุตหนึ่งขั้ว ซึ่งจากภาพวงจรสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต ( $V_{in}$ ) และกระแสเข้าพุต ( $I_{out}$ ) ได้เป็น

$$I_{out} = g_m (V_1 - V_2) \tag{3-1}$$

สำหรับวงจร OTA ในทางอุดมคตินั้นจะมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็นอนันต์และเข้าพุตอิมพีแดนซ์เป็นอนันต์ด้วย และค่า  $g_m$  หรือค่าทรานคอนดักแตนซ์โดยปกติจะมีค่าน้อยมาก และจะถูกควบคุมจากกระแส  $I_B$  จึงเขียนสมการความสัมพันธ์ของค่า  $g_m$  กับ  $I_B$  ได้ดังนี้

$$g_m = \eta I_B \tag{3-2}$$

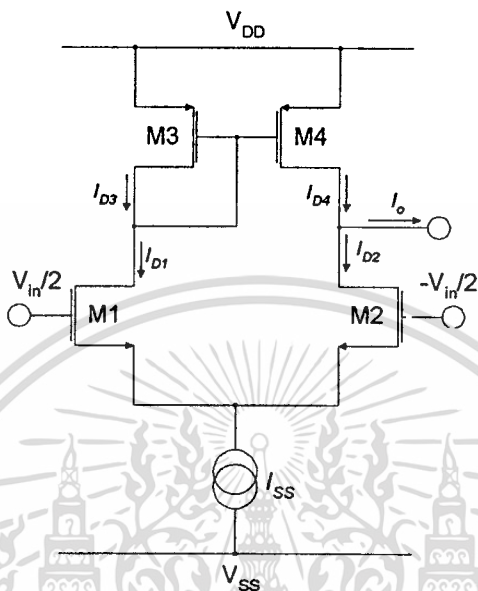
สำหรับวงจรเทียบเท่าทางอุดมคติของ OTA แสดงดังภาพที่ 20



แสดงวงจรเทียบเท่าทางอุดมคติของ OTA

วงจรถานคอนดักเตอร์แบบที่ง่ายที่สุดคือวงจรถูคิฟเฟอร์เรเนียนซีล (Differential Pair) [12], [13] ซึ่งประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ 4 ตัว และแหล่งจ่ายกระแสที่ 1 ตัว ดังภาพที่ 21

ภาพที่ 21



แสดงวงจรถานขยาย OTA แบบคูคิฟเฟอร์เรเนียนซีล

จากวงจรในภาพที่ 21  $M_3$  และ  $M_4$  ทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแส โดยค่าของ  $I_{D4}$  จะขึ้นอยู่กับ  $I_{D3}$  จากวงจรจะพบว่า  $I_{D1}$  จะเท่ากับ  $I_{D3}$  และค่ากระแส  $I_{D2}$  จะเท่ากับ  $I_{D4} - I_o$  เมื่อ  $V_{GS3} = V_{GS4}$  กระแส  $I_{D1}$  มีค่าเท่ากับ  $I_{D2}$  และ  $V_{GS1} > V_{GS2}$  จะทำให้กระแส  $I_o$  มีค่าเป็นบวก แต่ถ้า  $V_{GS3} < V_{GS4}$  กระแส  $I_o$  จะมีค่าเป็นลบ

ถ้ากำหนดให้  $M_1$  และ  $M_2$  มีคุณสมบัติเหมือนกันจะสามารถเขียนสมการแรงดันอินพุตได้เป็น

$$V_{ID} = V_{GS1} - V_{GS2} = \left( \frac{2I_{D1}}{\beta_1} \right)^{1/2} - \left( \frac{2I_{D2}}{\beta_2} \right)^{1/2} \quad (3-3)$$

$$I_{SS} = I_{D1} + I_{D2} \quad (3-4)$$

ถ้ากำหนดให้  $\beta = K(W/L)$  และถ้า  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$  สามารถเขียนสมการของ  $I_{D1}$  และ  $I_{D2}$  ได้เป็น

$$I_{D1} = \frac{I_{SS}}{2} + \frac{I_{SS}}{2} \left( \frac{\beta V_{ID}^2}{I_{SS}} + \frac{\beta^2 V_{ID}^4}{4I_{SS}^2} \right)^{1/2} \quad (3-5)$$

$$I_{D2} = \frac{I_{SS}}{2} - \frac{I_{SS}}{2} \left( \frac{\beta V_{ID}^2}{I_{SS}} + \frac{\beta^2 V_{ID}^4}{4I_{SS}^2} \right)^{1/2} \quad (3-6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคิฟเฟอเรนเซียลทรานคอนแดนซ์ ( $g_{md}$ ) ได้จากสมการ

$$g_{md} = \left. \frac{\partial I_{D1}}{\partial V_{ID}} \right|_{V_{ID}=0} = \left( \frac{2KI_{D1}W_1}{L_1} \right)^{1/2} \quad (3-7)$$

ถ้ากำหนดให้ค่าทรานคอนแดนซ์ของวงจร ( $g_m$ ) มีค่าแปรตาม  $g_{m1}$  คำนึงนั้นจะได้

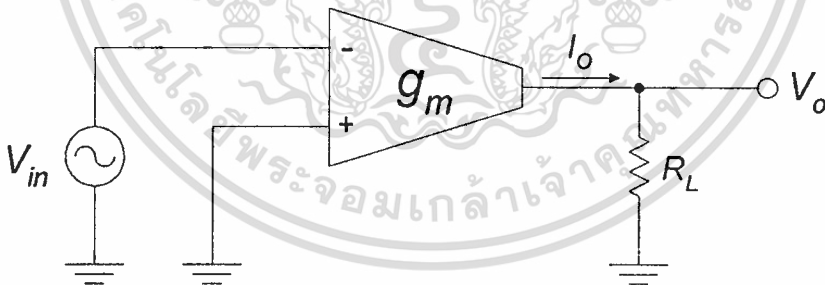
$$g_m = \sqrt{\frac{I_{SS} \mu C_{ox} W}{L}} \quad (3-8)$$

### วงจรพื้นฐานของ OTA

เนื่องจาก OTA มีลักษณะเป็นวงจรขยายที่มีรูปแบบคล้าย op-amp เพียงแต่ให้เอาพุตเป็นกระแสเท่านั้น [14],[15] จึงสามารถนำไปประยุกต์หรือสร้างวงจรประมวลผลสัญญาณได้หลายชนิด ในหัวข้อนี้จึงขอแนะนำวงจรพื้นฐานของ OTA ที่สำคัญๆ ในหลายชนิด [16], [17] เช่น

- 1.) วงจรขยายกลับขั้ว (Inverting amplifier) แสดงวงจรดังภาพที่ 22

ภาพที่ 22

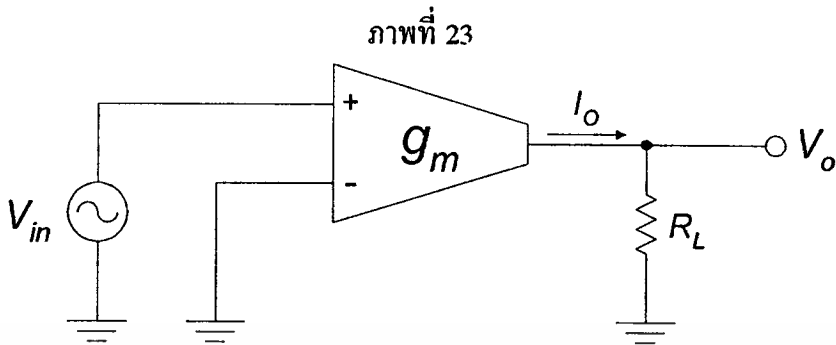


แสดงวงจรขยายกลับขั้วโดยใช้ OTA

จากภาพที่ 22 สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$H(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = -g_m R_L \quad (3-9)$$

- 2.) วงจรขยายไม่กลับขั้ว (Non-inverting amplifier) แสดงวงจรดังภาพที่ 23

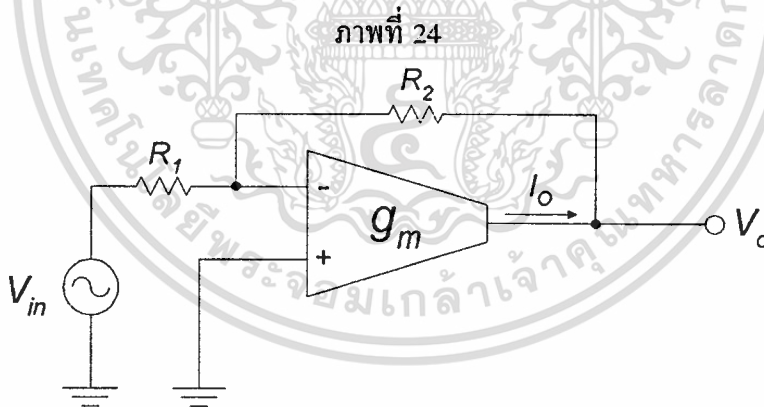


แสดงวงจรขยายไม่กลับขั้วโดยใช้ OTA

จากภาพที่ 23 สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$H(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = g_m R_L \quad (3-10)$$

3.) วงจรขยายกลับขั้วที่มีการป้อนกลับ (Inverting amplifier with feedback) เป็นวงจรขยายที่มีการป้อนกลับจากเอาต์พุตไปยังอินพุต แสดงวงจรได้ดังภาพที่ 24



แสดงวงจรขยายกลับขั้วที่มีการป้อนกลับ

จากภาพที่ 24 สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

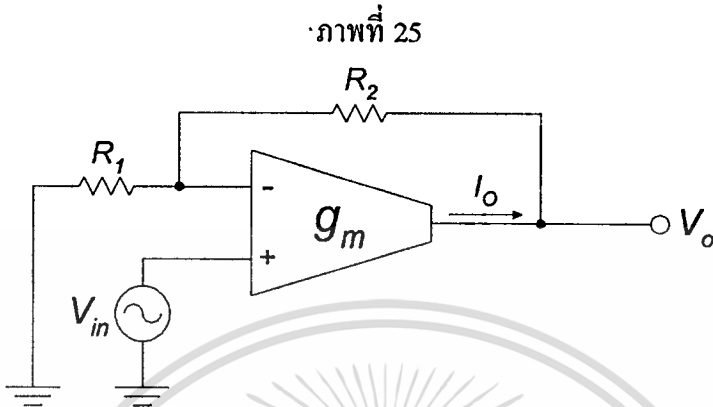
$$H(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1 - g_m R_2}{1 + g_m R_1} \quad (3-11)$$

แต่ถ้า  $g_m$  มีค่ามากๆอาจสรุปได้ว่า

$$H(s) = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3-12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.) วงจรขยายไม่กลับขั้วที่มีการป้อนกลับ (Non-inverting amplifier with feedback) เป็นวงจรขยายที่มีการป้อนกลับจากเอาต์พุตไปยังอินพุตเช่นกัน แสดงวงจรได้ดังภาพที่ 25



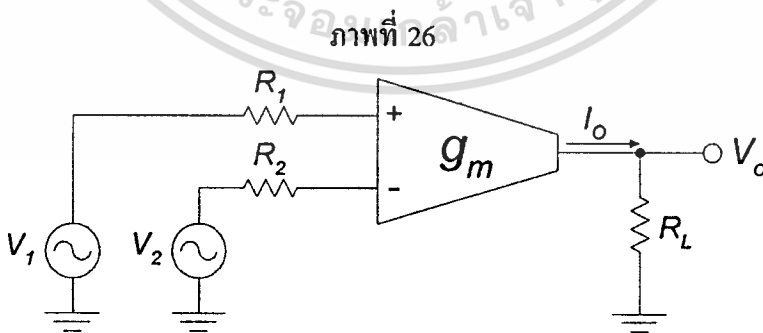
แสดงวงจรขยายไม่กลับขั้วที่มีการป้อนกลับ  
จากภาพที่ 25 สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$H(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{g_m(R_1 + R_2)}{1 + g_m R_1} \quad (3-13)$$

แต่ถ้า  $g_m$  มีค่ามากๆอาจสรุปได้ว่า

$$H(s) = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3-14)$$

5.) วงจรขยายผลต่าง (Differential amplifier) เป็นวงจรขยายพื้นฐานของ OTA โดยอินพุตของ OTA คือผลต่างของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  แสดงวงจรได้ดังภาพที่ 26



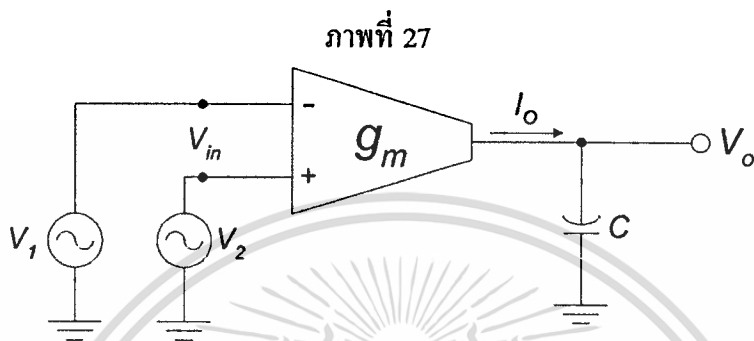
แสดงวงจรขยายผลต่างโดยใช้ OTA

จากภาพที่ 26 สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$H(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{V_1 - V_2} = g_m R_L \quad (3-15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.) วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless integrator) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นวงจรกรองสัญญาณหรือฟิลเตอร์ (Filter) ซึ่งมีช่วงการตอบสนองความถี่ตั้งแต่ช่วงกิโลเฮิรซ์จนถึงหลายร้อยเมกกะเฮิรซ์ ซึ่งวงจรประกอบไปด้วย OTA และตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เหมือนเป็นโหลด ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังแสดงวงจрдังภาพที่ 27

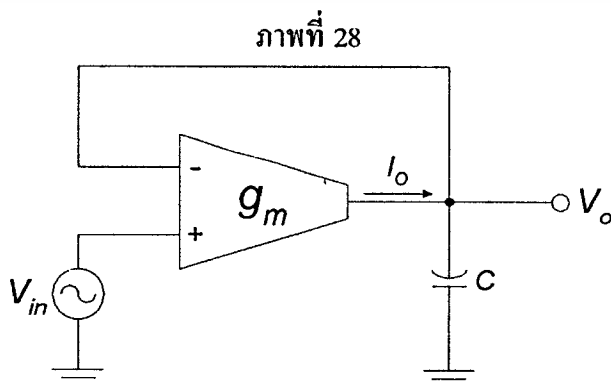


แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย

จากภาพที่ 27 ถ้ากำหนดให้  $s=j\omega$  สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$H(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{V_1 - V_2} = \frac{g_m}{sC} \quad (3-16)$$

7.) วงจรอินทิเกรเตอร์ที่มีการสูญเสีย (Lossy integrator) [18] เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นวงจรกรองสัญญาณหรือฟิลเตอร์ (filter) เช่นเดียวกับวงจรในข้อที่ 6 ซึ่งมีช่วงการตอบสนองความถี่ตั้งแต่ช่วงกิโลเฮิรซ์จนถึงหลายร้อยเมกกะเฮิรซ์ ซึ่งวงจรประกอบไปด้วย OTA และตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เหมือนเป็นโหลด โดยวงจรชนิดนี้มีโครงสร้างอยู่สองแบบคือ ชนิดที่มีการป้อนกลับ และชนิดที่ไม่มีการป้อนกลับ ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เช่นกัน ดังแสดงวงจรดังภาพที่ 28 และ 29



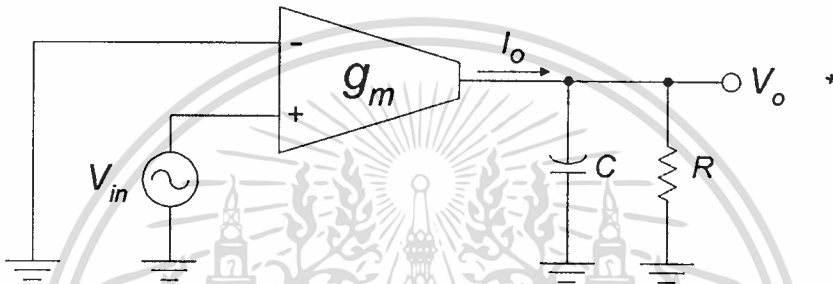
แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ที่มีการสูญเสีย ที่มีการป้อนกลับ

จากภาพที่ 28 ถ้ากำหนดให้  $s=j\omega$  สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$\frac{g_m}{sC}(V_{in} - V_o) = V_o \quad \dots \quad (3-17)$$

$$H(s) = \frac{(g_m / C)}{s + (g_m / C)} \quad (3-18)$$

ภาพที่ 29



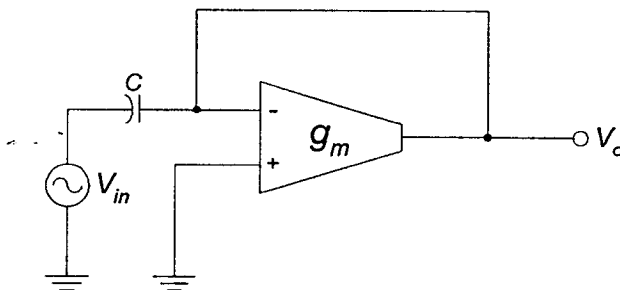
แสดงวงจรอินทรีเกรเตอร์ที่มีการสูญเสีย ที่ไม่มีการป้อนกลับ

จากภาพที่ 29 สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$H(s) = \frac{1}{(1/g_m)R + (sC/g_m)} = \frac{g_m R}{sCR + 1} \quad (3-19)$$

8.) วงจรคิฟเฟอเรนชิเอตเตอร์ (Differentiator circuit) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เสมือนเป็น วงจรกรองสัญญาณหรือฟิลเตอร์ (filter) ประเภทวงจรกรองสัญญาณความถี่สูง (High-pass filter) เช่นเดียวกับวงจรอินทรีเกรเตอร์ที่มีการสูญเสีย ซึ่งวงจรประกอบไปด้วย OTA และตัวเก็บประจุ ดังแสดงวงจรวงจรภาพที่ 30

ภาพที่ 30



แสดงวงจรคิฟเฟอเรนชิเอตเตอร์โดยใช้ OTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 30 สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(s) = \frac{sC}{sC + g_m} \quad (3-20)$$

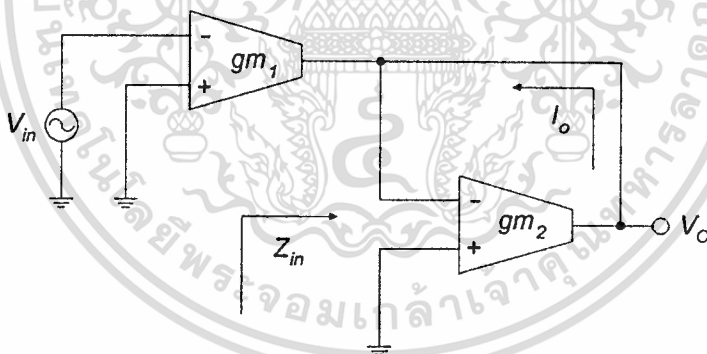
### OTA Building Blocks

1.) ในภาพที่ 31 แสดงวงจรขยายที่ใช้ OTA เป็นโหนดที่มีลักษณะการต่อแบบคู่ Darlington Pair ที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟเลย และการปรับอัตราขยายสามารถกำหนดได้จากทั้งค่า  $g_{m1}$  และ  $g_{m2}$  โดยอัตราขยายจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นแบบทวีคูณสองเท่า ดังแสดงวงจรในภาพที่ 31

ในภาพที่ 31 พบว่า OTA ตัวที่สองกระทำตัวเป็นโหนดให้กับ OTA ตัวที่หนึ่ง ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์อินพุตของ OTA ตัวที่สองก็คือค่าโหนดของวงจรซึ่งมีค่าดังสมการ

$$R_L = Z_{in} = \frac{1}{g_{m2}} \quad (3-21)$$

ภาพที่ 31

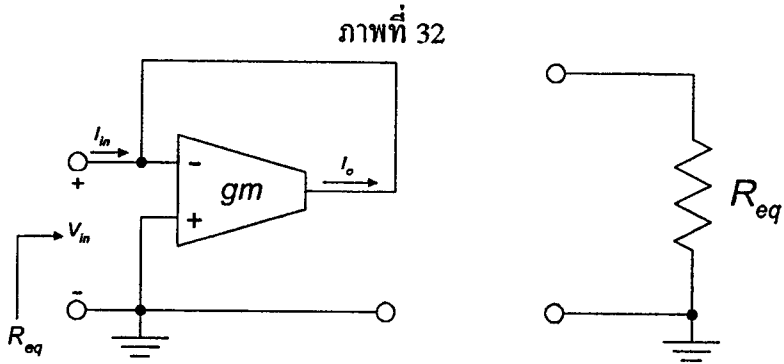


แสดงวงจรขยายที่ใช้ OTA เป็นโหนด

จากภาพที่ 31 สามารถแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$H(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \quad (3-22)$$

2.) วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ที่ปรับค่าได้ (Electronically variable grounded resistor) เป็นการสร้างวงจรเลียนแบบความต้านทานที่มีขั้วด้านหนึ่งต่อกับกราวด์ เป็นวงจรที่เหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นวงจรรวมได้อีกแบบหนึ่ง โดยแสดงวงจรดังภาพที่ 32



แสดงวงจรความต้านทานแบบต่อกราวน์ที่ปรับค่าได้

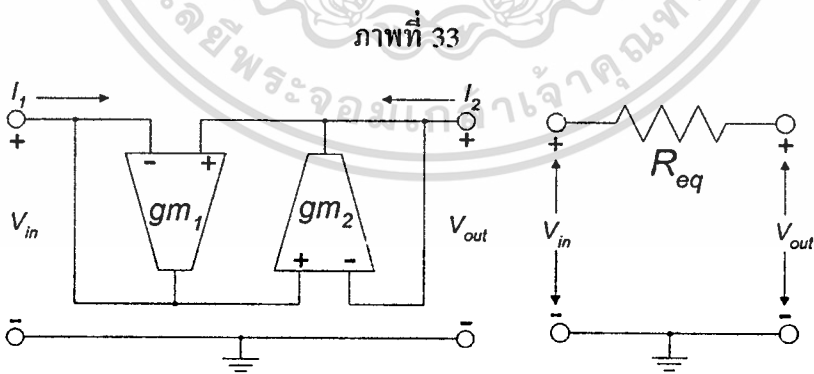
ในภาพที่ 32 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระแสอินพุตและเอาพุตได้เป็น

$$-I_{in} = I_o = g_m(-V_{in}) \tag{3-23}$$

ค่าอิมพีแดนซ์อินพุตของวงจรจะมีค่าเท่ากับ

$$R_{eq} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{1}{g_m} \tag{3-24}$$

3.) วงจรความต้านทานแบบลอยตัวที่ปรับค่าได้ (Electronically variable floating resistor) เป็นการสร้างวงจรเลียนแบบความต้านทานที่ไม่มีขั้วต่อกับกราวน์ เป็นวงจรที่เหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นวงจรรวมได้อีกแบบหนึ่ง โดยแสดงวงจรดังภาพที่ 33



แสดงวงจรความต้านทานแบบลอยตัวที่ปรับค่าได้

จากภาพที่ 33 สามารถแสดงสมการ y พารามิเตอร์แบบเครือข่ายสองพอร์ตได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{m1} & -g_{m1} \\ -g_{m2} & g_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{3-25}$$

จากสมการที่ (3-25) ถ้ากำหนดให้  $g_{m1} = g_{m2} = g_m$  สามารถหาค่าความต้านทานลอคตัวได้เป็น

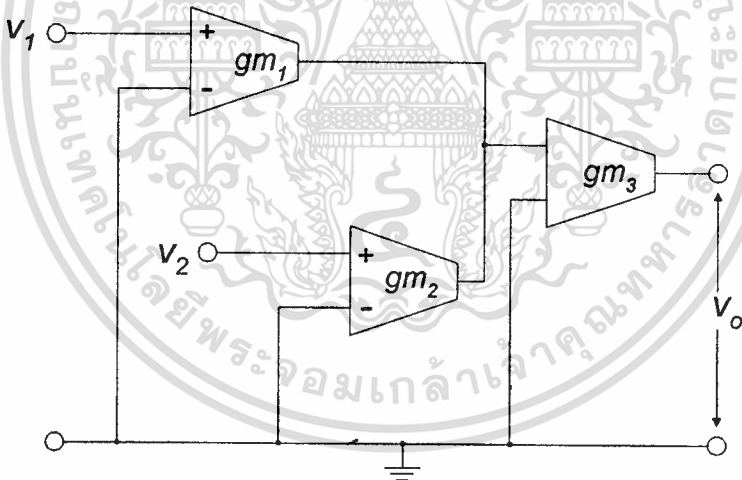
$$R_{eq} = \frac{1}{g_m} \tag{3-26}$$

3.) วงจรบวก (Summing amplifier) เป็นวงจรที่มีลักษณะคล้ายกับวงจรเลียนแบบความต้านทาน ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 34 โดย OTA ตัวที่ 3 ซึ่งเป็นวงจรความต้านทานแบบต่อกราวน์ที่ปรับค่าได้ทำหน้าที่เป็นวงจรรวมสัญญาณอินพุตจาก OTA ตัวที่หนึ่งและตัวที่สองดังสมการ

$$V_o = -\frac{I_o}{g_{m3}} = (I_1 + I_2) \left[ \frac{1}{g_{m3}} \right] = (V_1 g_{m1} + V_2 g_{m2}) \left[ \frac{1}{g_{m3}} \right]$$

$$V_o = \frac{g_{m1}}{g_{m3}} V_1 + \frac{g_{m2}}{g_{m3}} V_2 \tag{3-27}$$

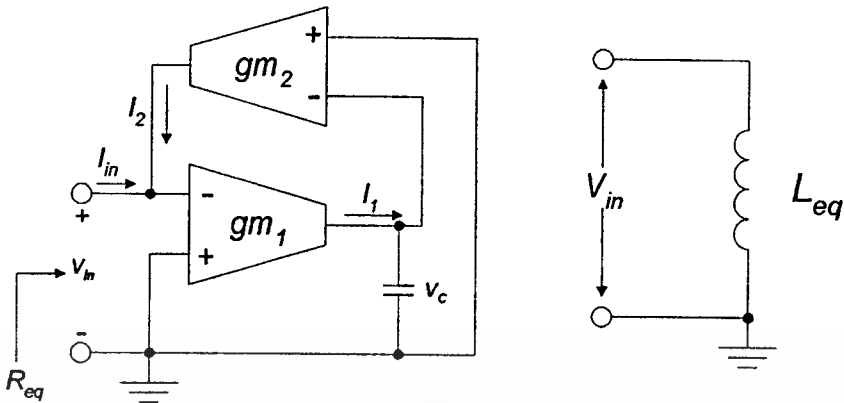
ภาพที่ 34



แสดงวงจรบวกโดยใช้ OTA

4.) การประยุกต์ใช้งานของ OTA อีกประเภทหนึ่งก็คือวงจรไจเรเตอร์ (Gyrator) [19] เป็นวงจรที่ให้คุณสมบัติในการกลับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร นั่นคืออินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรจะแปรผกผันกับค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ดังสมการ  $Z_m(s) \propto (1/ Z_L(s))$  และจากความสัมพันธ์นี้ ถ้ากำหนดให้โหลดของวงจรเป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าอิมพีแดนซ์  $Z_L(s) = (1/ sC)$  ค่า  $Z_m(s)$  ก็จะกลายเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นวงจรไจเรเตอร์ก็คือวงจรที่สามารถเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้นั่นเอง ในภาพที่ 35 เป็นการแสดงวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำชนิดต่อกราวน์ และในภาพที่ 36 เป็นการแสดงวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำชนิดลอคตัว

ภาพที่ 35



แสดงวงจร ใจเรเตอร์ที่เลียนแบบตัวเหนี่ยวนำชนิดต่อกราวน์โดยใช้ OTA

จากภาพที่ 35 หาค่ากระแสอินพุตได้เป็น

$$I_{in}(s) = -I_2(s) = (-g_{m2})[-V_c(s)] = g_{m2}I_1(s) \left[ \frac{1}{sC} \right] \quad (3-28)$$

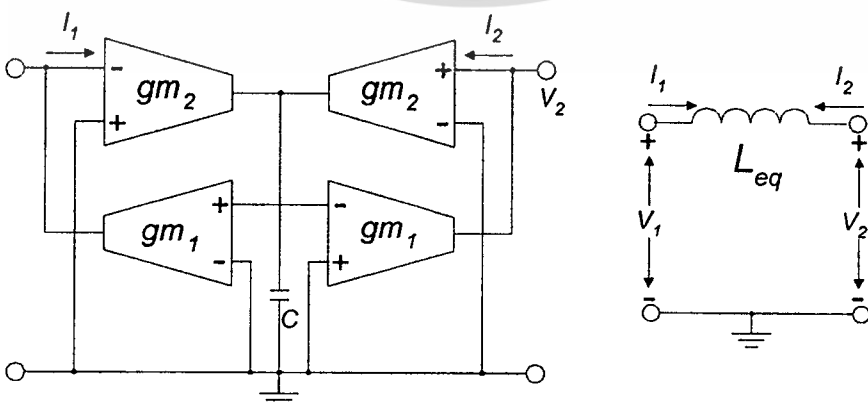
$$I_{in}(s) = g_{m1}g_{m2}V_{in}(s) \left[ \frac{1}{sC} \right] \quad (3-29)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรคือ

$$Z_{in}(s) = \frac{V_{in}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{sC}{g_{m1}g_{m2}} \quad (3-30)$$

จากสมการ (3.30) สามารถหาค่าอินดักแตนซ์ได้เป็น  $L_{eq} = (C / g_{m1}g_{m2})$

ภาพที่ 36



แสดงวงจร ใจเรเตอร์ที่เลียนแบบตัวเหนี่ยวนำชนิดลอยตัวโดยใช้ OTA

จากภาพที่ 36 สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปของเครือข่ายสองพอร์ตได้คือ

$$I_1 = \frac{(V_1 - V_2)}{sL} \quad \text{และ} \quad I_2 = \frac{(V_2 - V_1)}{sL} \quad (3-31)$$

$$I_1 = -g_{m1}V_c \quad (3-32)$$

$$g_{m2}(V_2 - V_1) = sC \cdot V_c \quad (3-33)$$

$$I_2 = g_{m1}V_c \quad (3-34)$$

แทนค่าสมการ (3.33) ลงในสมการ (3.32) และ (3.34) จะได้

$$I_1 = \left[ \frac{g_{m1}g_{m2}}{sC} \right] (V_1 - V_2) \quad (3-35)$$

$$I_2 = \left[ \frac{g_{m1}g_{m2}}{sC} \right] (V_2 - V_1) \quad (3-36)$$

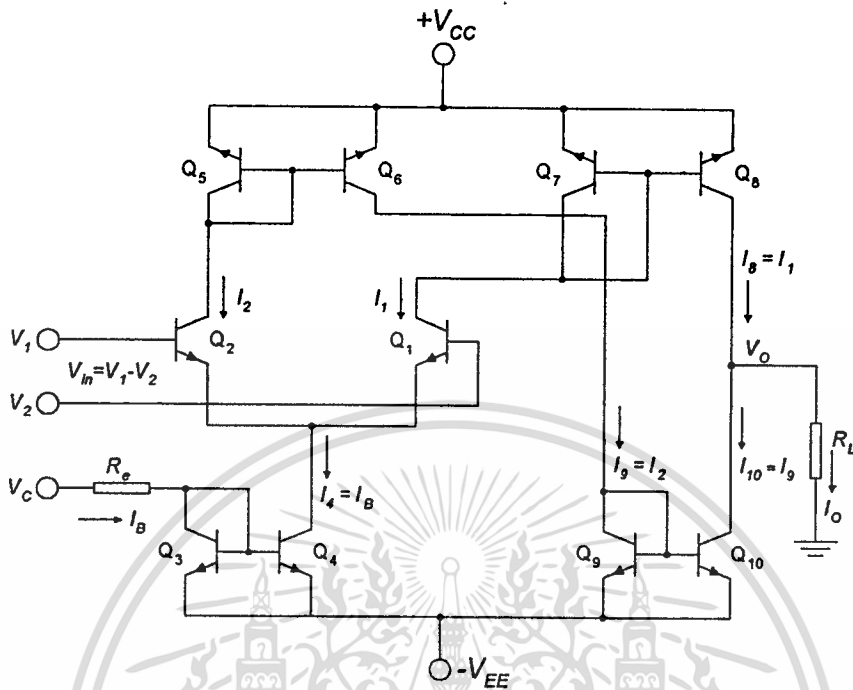
เมื่อเปรียบเทียบสมการ (3.35) กับสมการ (3.31) จะได้ค่าอินดักแตนซ์เป็น

$$L_{eq} = \left[ \frac{C}{g_{m1}g_{m2}} \right] \quad (3-37)$$

### Monolithic Transconductance Amplifier

เทคโนโลยีทางด้านวงจรรวมทำให้เกิดไอซีต่างๆได้มากมาย และที่เช่นเดียวกับวงจรรขยายทั่วไปที่ได้มีการสร้างไอซี OTA เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ในการใช้งานดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่แล้วเช่น วงจรรขยายแรงดัน, วงจรอินทิเกรเตอร์ ในการประมวลผลสัญญาณเสียง หรือการใช้งานในโหมดกระแส เช่น วงจร sample and hold โดยมีผู้ผลิตไอซี OTA อยู่หลายบริษัท เช่น CA3080 (RCA), LM13600 หรือ LM13700 (National Semiconductor), NE5517 (Signetics) โดยแสดงโคจรแอมพลิจูดภายในของไอซีได้ดังภาพที่ 37 [20]

ภาพที่ 37



แสดงวงจรภายในของไอซี OTA

จากภาพที่ 37 แสดงไดอะแกรมวงจรภายในของไอซี OTA โดยทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และ  $Q_2$  ต่อเป็นวงจรคู่อุปกรณ์เฟอเรนเซียล โดยมี  $Q_3$  และ  $Q_4$  เป็นวงจรสะท้อนกระแส ที่ทำหน้าที่ควบคุมกระแส  $I_B$  ซึ่งสามารถปรับแต่งได้โดยใช้ความต้านทานจากภายนอก  $R_e$  และค่าแรงดันควบคุม  $V_C$  ซึ่งจะทำให้  $I_4 = I_B$  โดยกระแส  $I_4$  มีค่ามาจากกระแสอิมิตเตอร์ของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  นั่นคือ

$$I_1 + I_2 = I_4 = I_B \quad (3-38)$$

วงจรสะท้อนกระแส  $Q_5$  และ  $Q_6$  ทำหน้าที่สร้างกระแส  $I_2$  และทำให้เกิด  $I_9 = I_2$  โดยกระแส  $I_2$  จะถูกนำไปเป็นอินพุตของวงจรสะท้อนกระแส  $Q_9$  และ  $Q_{10}$  ซึ่งทำให้เกิด  $I_{10} = I_9 = I_2$  ในทำนองเดียวกัน วงจรสะท้อนกระแส  $Q_7$  และ  $Q_8$  ทำให้เกิด  $I_1$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $I_8$  จากทฤษฎี Kirchoff (KVL) จะได้

$$I_O = I_8 - I_{10} = I_1 - I_2 \quad (3-39)$$

ดังนั้นอัตราขยายแรงดันของวงจร  $A_V$  สามารถเขียนได้เป็น

$$A_V = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_o R_L}{V_{in}} = g_m R_L \quad (3-40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าทรานคอนคัตแดนซ์ ( $g_m$ ) สามารถได้จากความสัมพันธ์

$$I_1 = I_s \exp(V_1 / V_T) \quad (3-41)$$

และ

$$I_2 = I_s \exp(V_2 / V_T) \quad (3-42)$$

โดยที่  $I_s$  คือกระแสย้อนกลับในย่านอ้อมตัวของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และ  $Q_2$  , และ  $V_T$  คือค่าแรงดันเทียบเท่าอุณหภูมิ ค่า  $I_B$  มีค่าเท่ากับ

$$I_B = (I_1 + I_2) = I_s [\exp(V_1 / V_T) + \exp(V_2 / V_T)] \quad (3-43)$$

$$I_s = \frac{I_B}{\exp(V_1 / V_T) + \exp(V_2 / V_T)} \quad (3-44)$$

จากสมการ (3.43) และ (3.44) จะหาค่า  $I_1$  และ  $I_2$  ได้ดังสมการ

$$I_1 = \frac{I_B \exp(V_1 / V_T)}{\exp(V_1 / V_T) + \exp(V_2 / V_T)} \quad (3-45)$$

$$I_2 = \frac{I_B \exp(V_2 / V_T)}{\exp(V_1 / V_T) + \exp(V_2 / V_T)} \quad (3-46)$$

ค่า  $(I_1 - I_2)$  จะมีค่าเท่ากับ

$$(I_1 - I_2) = I_B = \frac{\exp(V_1 / V_T) \exp(V_2 / V_T)}{\exp(V_1 / V_T) + \exp(V_2 / V_T)} \quad (3-47)$$

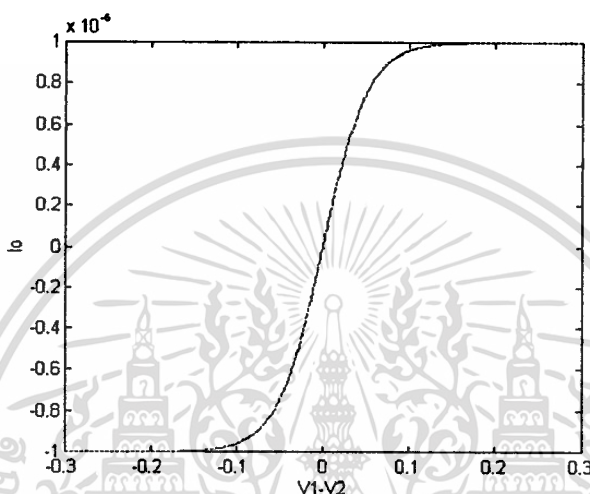
จากสมการ (3-47) คูณเศษและส่วนด้วยนิพจน์  $\exp\left(-\frac{V_1 - V_2}{2}\right)$  ก็จะได้

$$I_O = (I_1 - I_2) = I_B \frac{\exp\left(\frac{V_1 - V_2}{2V_T}\right) - \exp\left(-\frac{V_1 - V_2}{2V_T}\right)}{\exp\left(\frac{V_1 - V_2}{2V_T}\right) + \exp\left(-\frac{V_1 - V_2}{2V_T}\right)} \quad (3-48)$$

$$I_O = \tanh\left(\frac{V_1 - V_2}{2V_T}\right) \quad (3-49)$$

จากสมการที่ (3-49) สามารถเขียนกราฟค่ากระแสเข้าพุต ( $I_O$ ) กับค่าแรงดันอินพุต ( $V_1 - V_2$ ) ได้ดังภาพที่ 38 จากภาพกราฟพบว่า ค่าทรานคอนดักแตนซ์มีความสัมพันธ์อยู่ในลักษณะของ ฟังก์ชันไฮเพอร์โบล่าแทนเจนท์ (Hyperbolic-tangent) โดยในย่านเชิงเส้นจะอยู่ในช่วงแคบๆ จากนั้นก็จะเข้าสู่ย่านอิ่มตัว

ภาพที่ 38



กราฟแสดงคุณสมบัติถ่ายโอนของ OTA

ค่าทรานคอนดักแตนซ์  $g_m$  จะหาค่าได้จาก

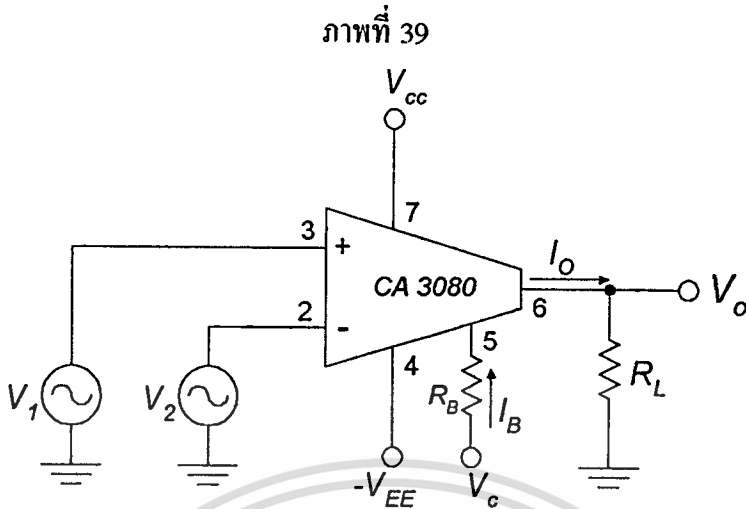
$$g_m = \left| \frac{dI_O}{dV_{in}} \right| = \frac{I_B}{2V_T} \quad (3-50)$$

ถ้ากำหนดให้สัญญาณอินพุต ( $V_1 - V_2$ ) มีค่าน้อยๆ พบว่า  $\tanh\left(\frac{V_1 - V_2}{2V_T}\right) \approx \frac{V_1 - V_2}{2V_T}$  ค่าอัตรา

ขยายแรงดันของวงจรจะมีค่าเป็น

$$A_v = g_m R_L = \frac{I_B R_L}{2V_T} \quad (3-51)$$

จากสมการที่ (3-51) แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมค่าอัตราขยายแรงดันโดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส  $I_B$



แสดงวงจรขยาย OTA โดยใช้ไอซี CA 3080

ในภาพที่ 39 เป็นการแสดงวงจรขยายโดยใช้ OTA เบอร์ CA 3080 โดยค่าทรานคอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) จะถูกควบคุมโดยค่ากระแส  $I_B$  ในขาที่ 5 ที่อุณหภูมิห้อง (กำหนด Thermal voltage;  $V_T = 26 \text{ mV}$ )

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} = \frac{I_B}{2 \times 26 \text{ mV}}$$

จะได้

$$g_m = (19.23)I_B \quad (3-52)$$

และจากสมการ (3-1) หาค่ากระแสเข้าพุทได้เป็น

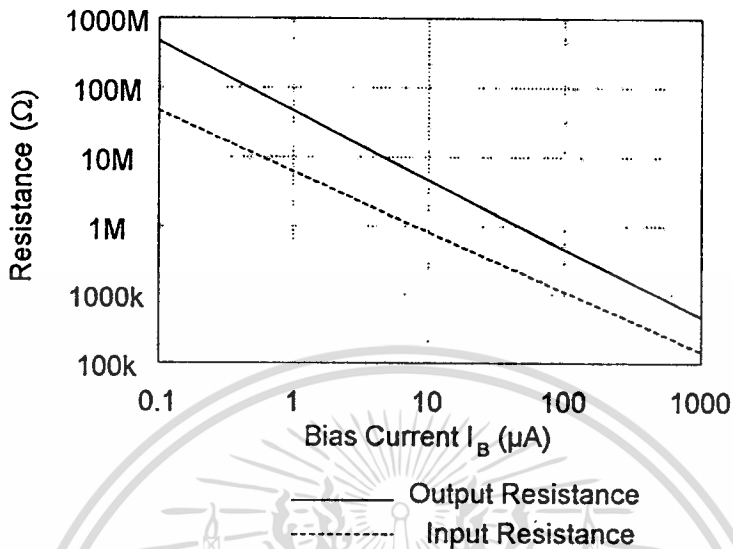
$$I_o = (19.23)I_B V_{in} \quad (3-53)$$

สำหรับค่ากระแสไบอัสสามารถหาค่าได้จาก

$$I_B = \frac{V_C - V_{EE} - V_d}{R_B} \quad (3-54)$$

โดยที่  $V_d$  คือค่าแรงดันที่รอยต่อของ เบส-อิมิตเตอร์ ของทรานซิสเตอร์  $Q_3$  ที่อยู่ในไอซี ซึ่งมีค่าประมาณ 0.6 - 0.7 โวลต์ นอกเหนือจากค่าทรานคอนดักแตนซ์ที่มีค่าแปรตามกระแสไบอัส  $I_B$  แล้ว ค่าความต้านทานอินพุท และเข้าพุทของวงจรก็ยังมีค่าแปรตามกระแสไบอัสด้วย โดยมีลักษณะแบบแปรผกผัน ดังแสดงในภาพที่ 40

ภาพที่ 40



การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอินพุตและเอาพุตกับกระแสไบอัส  $I_B$

### บทสรุป

ในบทที่ 3 เป็นการอธิบายเกี่ยวกับวงจรทรานคอนคัคเตอร์ โดยอธิบายอยู่ในรูปของวงจรขยายทรานคอนคัคแดนซ์หรือที่เรียกว่า OTA (Operational Transconductance Amplifier) หรือวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส และวงจรพื้นฐานของ OTA, OTA Building Block รวมทั้ง Monolithic Transconductance Amplifier ที่อยู่ในรูปของไอซี เช่น CA 3080 ซึ่งสามารถที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้วงจรพื้นฐานของ OTA ซึ่งจะอธิบายถึงหลักการและการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้วงจรทรานคอนคัคเตอร์ ในบทต่อไป

## บทที่ 4

### วงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้วงจรถรานคอนดัคเตอร์ แบบที่ 1

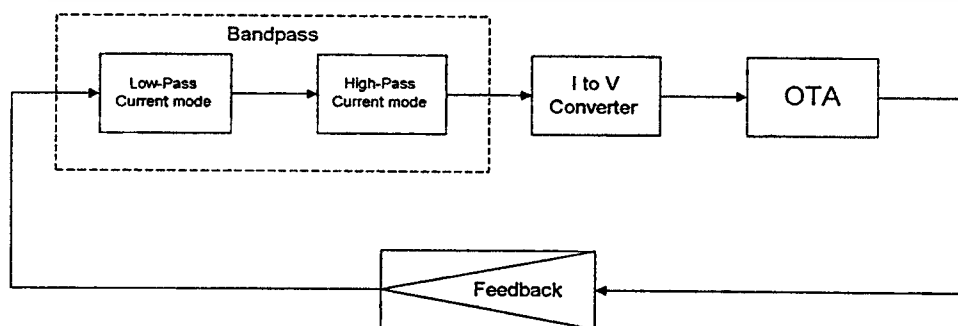
#### บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการเสนองจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบใหม่ ที่ใช้วงจรถรานคอนดัคเตอร์ หรือวงจรถานเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 รวมกับตัวเก็บประจุ ต่อร่วมกันเป็นวงจรถานอินทิเกรเตอร์แบบที่มีการสูญเสีย 3 ชุดนำมาต่อคาสเคดกัน [21],[22] และป้อนกลับด้วยสัญญาณแรงดันที่สร้างมาจากวงจรถรานคอนดัคเตอร์ 1 ตัวและมอสเฟต 2 ตัว ทำให้มีอัตราขยายแรงดัน เท่ากับ  $-8$  เพื่อให้วงจรถานสามารถกำเนิดสัญญาณได้ โดยวงจรถานจะใช้ทรานซิสเตอร์ 18 ตัว, แหล่งจ่ายกระแสคงที่ 4 ตัว และตัวเก็บประจุ 3 ตัว โดยใช้แรงดันไฟเลี้ยงที่  $\pm 3$  โวลต์ โดยการจำลองการทำงานของวงจรถานโดยใช้โปรแกรม Pspice

#### ทฤษฎีและหลักการ

หลักการการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบใหม่สามารถเขียนได้เป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้

ภาพที่ 41



แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 41 มีหลักการทำงานคือให้วงจรทำงานในโหมดกระแส โดยในช่วงแรกใช้วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำในโหมดกระแสกับวงจรกรองความถี่สูงนำมาต่อкасцепกัน เพื่อให้เป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่แถบผ่าน (Band-Pass Filter) จากนั้นจึงทำการแปลงสัญญาณที่ได้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันโดยใช้ I-V Converter และนำวงจรขยายแรงดันโดยใช้วงจรขยายแบบ OTA และส่วนที่สำคัญที่สุดคือวงจรป้อนกลับ ซึ่งจะทำการป้อนกลับสัญญาณเอาพุตที่ได้ไปยังขั้วอินพุตโดยอาศัยเงื่อนไขของการออสซิลเลต ทำให้วงจรนี้สามารถกำเนิดสัญญาณได้

จากหลักการของการออสซิลเลตที่กำหนดให้ค่าลูบเกนมีค่าเป็นหนึ่งคือ

$$A_v \beta_v = 1 \quad (4-1)$$

ถ้ากำหนดให้ฟังก์ชัน โอนย้ายของลูบเกนมีค่าเท่ากับฟังก์ชัน โพลีโนเมียลอันดับสามที่อยู่ในรูปของความสัมพันธ์  $N(s)/D(s)$  ก็จะเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$1 - A_v \beta_v = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4-2)$$

เนื่องจากวงจรที่ทำการวิเคราะห์เป็นวงจรกรองอันดับสาม และจากสมการ (4-1) พบว่า  $N(s)$  ต้องมีค่าเป็นศูนย์สมการจึงจะมีความถูกต้องโดยค่า  $N(s)$  จะอยู่ในรูป

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0 \quad (4-3)$$

ถ้ากำหนดให้สมการ (4-3) อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ โดยให้  $s = j\omega$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} N(s) &= a_0 (j\omega)^3 + a_1 (j\omega)^2 + a_2 (j\omega) + a_3 \\ 0 &= -j\omega^3 a_0 - \omega^2 a_1 + j\omega a_2 + a_3 \end{aligned}$$

จากสมการข้างบนเทียบสัมประสิทธิ์ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน  $s+j\omega$  ได้เป็นสมการในส่วนจริงจะมีค่าเป็น

$$a_3 - \omega^2 a_1 = 0 \quad (4-4)$$

$$\omega^2 = \frac{a_3}{a_1}$$

สมการในส่วนจินตภาพจะมีค่าเป็น

$$a_2 - \omega^2 a_0 = 0 \quad (4-5)$$

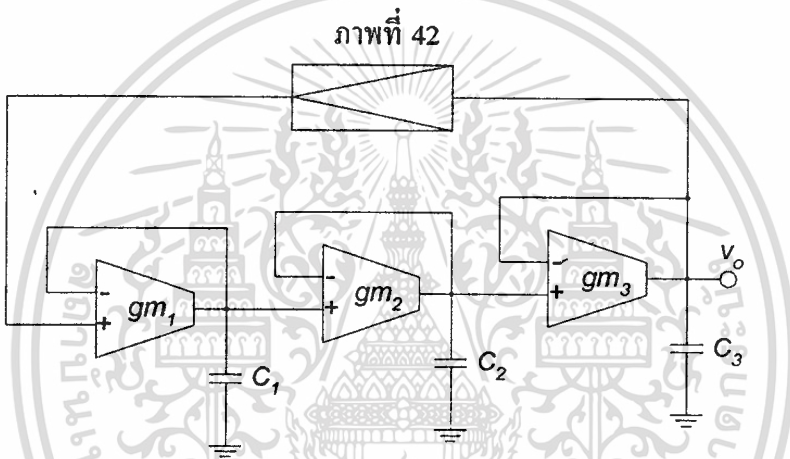
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega^2 = \frac{a_2}{a_0}$$

จากสมการ (4-3) เท่ากับ (4-4) แสดงเงื่อนไขของการออสซิลเลตได้เป็น

$$a_0 a_3 - a_2 a_1 = 0 \tag{4-6}$$

วงจรกำเนิดสัญญาณแบบใหม่ที่น่าเสนอ

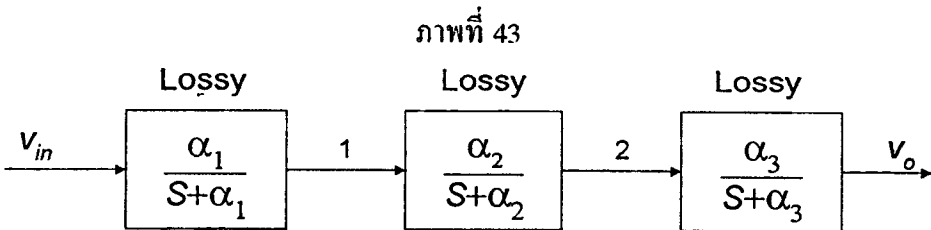


แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ OTA แบบที่หนึ่ง

พิจารณาวงจรอินทิเกรเตอร์แบบที่มีการสูญเสียหรือ Lossy Integrator ในกรณีทั่วไป ค่า ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคือ

$$H(s) = \frac{A}{s + KA} \tag{4-7}$$

โดยที่ KA คือ -3 dB cut off frequency

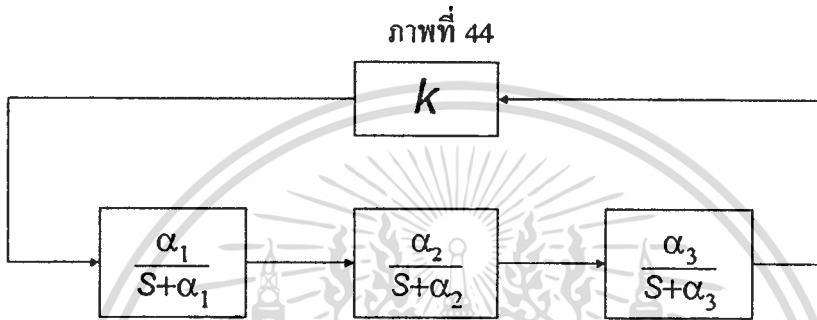


แสดงไคอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 43 สามารถเขียนเป็นสมการส่งผ่านได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{v_o}{v_{in}} = H(s) &= \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{(s + \alpha_1)(s + \alpha_2)(s + \alpha_3)} \\ &= \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{s^3 + s^2(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + s(\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_3) + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} \end{aligned} \quad (4-8)$$



แสดงไดอะแกรมของวงจรถ่ายสัญญาณที่มีส่วนของการป้อนกลับ

เมื่อนำวงจรถ่ายอันดับสาม มาต่อกับวงจรถ่ายเพื่อทำการป้อนกลับแสดงค่า Loopgain; LG ได้ดังภาพ 44 และแสดงค่าได้เป็น

$$LG = \frac{k \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{s^2 + s(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + s(\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_3) + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} \quad (4-9)$$

พิจารณาจากเงื่อนไขของการออสซิลเลต จากระบบป้อนกลับ  $1-LG$  จะได้

$$\begin{aligned} 1 - A_v \beta_v &= 1 - \frac{k \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{s^2 + s(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + s(\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_3) + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} \\ &= \frac{s^2 + s^2(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + s(\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_3) + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 - k \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{s^2 + s^2(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + s(\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_3) + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} \\ &= \frac{N(s)}{D(s)} \end{aligned} \quad (4-10)$$

พิจารณาในส่วน  $N(s) = 0$  คือ

$$s^3 - s^2(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + s(\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_3) + (1 - k)(\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3) = 0$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} a_0 &= 1 \\ a_1 &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \\ a_2 &= \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_3 \\ a_3 &= (1-k)\alpha_1\alpha_2\alpha_3 \end{aligned}$$

พิจารณาเงื่อนไขในการออสซิลเลตจากความสัมพันธ์  $a_3a_0 - a_2a_1 = 0$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} (1-k)(\alpha_1\alpha_2\alpha_3) - (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)(\alpha_1\alpha_2 + \alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_3) &= 0 \\ (1-k)(\alpha_1\alpha_2\alpha_3) &= (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)(\alpha_1\alpha_3 + \alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_3) \quad (4-11) \end{aligned}$$

จากสมการที่ (4-10) สามารถหาค่า  $k$  ได้คือ

$$1-k = \frac{3\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_1\alpha_2 + \alpha_1\alpha_1\alpha_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_2 + \alpha_2\alpha_2\alpha_3 + \alpha_2\alpha_3\alpha_3 + \alpha_1\alpha_3\alpha_3}{\alpha_1\alpha_2\alpha_3}$$

$$k = \left[ \frac{\alpha_1}{\alpha_3} + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \frac{\alpha_2}{\alpha_3} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} + \frac{\alpha_3}{\alpha_1} + \frac{\alpha_3}{\alpha_2} + 2 \right] \quad (4-12)$$

พิจารณาเงื่อนไขทางความถี่จากความสัมพันธ์  $\frac{a_3}{a_0} = \frac{a_2}{a_1} = \omega^2$  ก็จะได้

$$\omega^2 = \frac{(1-k)\alpha_1\alpha_2\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} = \frac{a_3}{a_0} \quad (4-13)$$

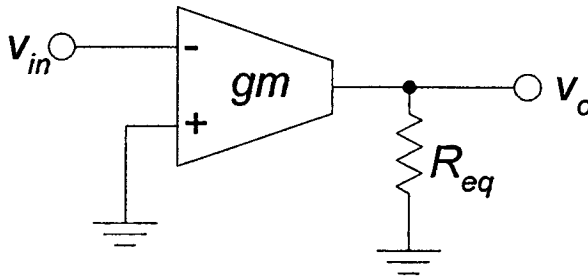
จากสมการ (4-11) ถ้ากำหนดให้  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_0$  ก็จะได้  $k = -8$

และจากสมการ (4-12) แทนค่า  $k$  จะหาค่าความถี่ของการออสซิลเลตได้เป็น

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \frac{1 - (-8)a_0^3}{3a_0} = \frac{9a_0^3}{3a_0} = 3a_0^2 \\ \omega &= a_0\sqrt{3} \quad (4-14) \end{aligned}$$

จากการวิเคราะห์พบว่าต้องมีการต่อวงจรขยายป้อนกลับที่มีอัตราขยายเท่ากับ -8 วงจรจึงจะออสซิลเลต ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างวงจรขยายที่มีอัตราขยายเท่ากับ -8 ขึ้นมาอีกวงจรหนึ่ง โดยจะใช้ OTA 1 ตัว และตัวต้านทานอีก 1 ตัว โดยแสดงได้ดังภาพที่ 45

ภาพที่ 45



แสดงวงจรขยายแรงดันโดยใช้ OTA

จากภาพที่ 45 สามารถหาค่าฟังก์ชันโอนย้ายได้คือ

$$I_o = -g_m V_{in}$$

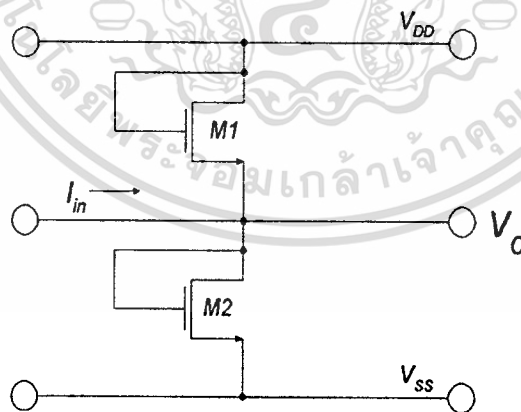
$$V_o = -g_m V_{in} R_{eq}$$

จะได้ว่า

$$\frac{V_o}{V_{in}} = H(s) = -g_m R_{eq} \quad (4-15)$$

ในส่วนของตัวต้านทานแบบอิเล็กทรอนิกส์ ( $R_{eq}$ ) สามารถสร้างขึ้นมาจากการใช้ MOSFET 2 ตัว ซึ่งมีแนวคิดมาจาก Z.Wang [23] โดยให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านอิมิตัว

ภาพที่ 46



แสดงวงจรความต้านทานทางอิเล็กทรอนิกส์

จากภาพที่ 46 คือวงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเป็นเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันโดยแสดงค่า  $R_{eq}$  ได้เป็น

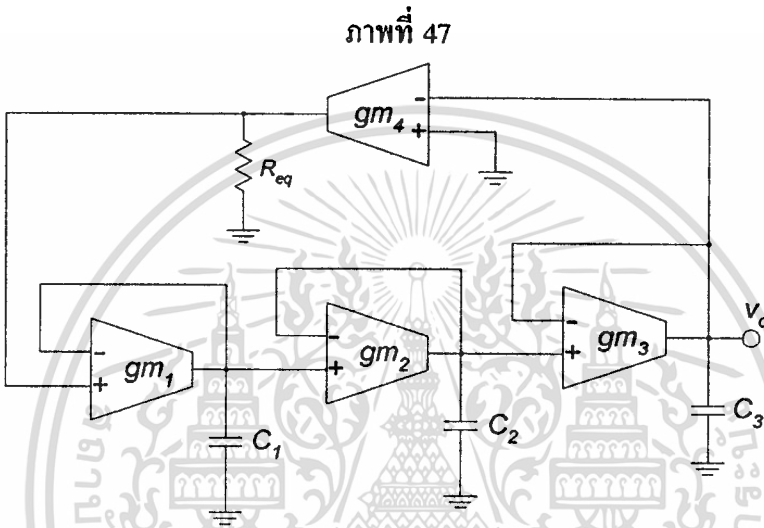
$$R_{eq} = \frac{V_o}{I_{in}} = \frac{1}{2KV_{DT}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $K = (\mu_o C_{ox} W/L)$  และ  $V_{DT} = (V_{DD} - V_T)$  หรือเท่ากับ  $-(V_{SS} + V_T)$  โดยกำหนดให้  $V_{DD} = -V_{SS}$

วงจรกำเนิดสัญญาณที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ  $-8$  ซึ่งสามารถสร้างได้จาก  $R_{eq}$  โดยกำหนดให้

$$R_{eq} = \frac{8}{g_m} \quad (4-16)$$



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์โดยใช้ OTA แบบที่หนึ่ง

ในภาพที่ 47 ถ้ากำหนดให้  $g_{m1} = g_{m2} = g_{m3} = g_m$  และให้  $C_1 = C_2 = C_3 = C$  สามารถเขียนรูปแทนได้เป็น

$$A_v \beta_v = \frac{-8g_m^3 / C^3}{s^3 + 3s^2 \left(\frac{g_m}{C}\right) + 3s \left(\frac{g_m^2}{C^2}\right) + \frac{g_m^3}{C^3}} \quad (4-17)$$

พิจารณาในระบบป้อนกลับจะได้ว่า

$$1 - A_v \beta_v = \frac{s^3 + s^2 \left(\frac{3g_m}{C}\right) + s \left(\frac{3g_m^2}{C^2}\right) + \frac{g_m^3}{C^3} + \frac{8g_m^3}{C^3}}{s^3 + s^2 \left(\frac{3g_m}{C}\right) + s \left(\frac{3g_m^2}{C^2}\right) + \frac{g_m^3}{C^3}} = N(s) \quad (4-18)$$

พิจารณาให้  $N(s) = 0$  จะได้ว่า

$$s^3 + s^2 \left(\frac{3g_m}{C}\right) + s \left(\frac{3g_m^2}{C^2}\right) + \frac{9g_m^3}{C^3} = 0 \quad (4-19)$$

จากสมการที่ (4-19) พิจารณาสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในภาพโพลีโนเมียลอันดับสามก็จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 1 \\
 a_1 &= 3g_m / C \\
 a_2 &= 3g_m^2 / C^2 \\
 a_3 &= 9g_m^3 / C^3
 \end{aligned}$$

อธิบายเงื่อนไขของการออสซิลเลตได้จาก  $(a_3 a_0 - a_1 a_2) = 0$  จะได้

$$\frac{9g_m^3}{C^3} - \frac{9g_m^2}{C^3} = 0 \tag{4-20}$$

จะเห็นว่าเงื่อนไขนี้เป็นจริง

และอธิบายเงื่อนไขทางความถี่ได้จาก  $\omega^2 = \frac{a_3}{a_1} = \frac{a_2}{a_0}$  จะได้ว่า

$$\omega^2 = \frac{a_3}{a_1} = \frac{3g_m^2}{C^2} \quad \text{จะได้} \quad \omega = \frac{\sqrt{3}g_m}{C} \tag{4-21}$$

**การวิเคราะห์ค่าความไว (Sensitivity) ของวงจร**

ในการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่โดยทั่วไป มักนิยามอธิบายในลักษณะของความไว (Sensitivity) ของวงจร ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติบางอย่างที่จะมีผลต่อส่วนประกอบส่วนใดส่วนหนึ่งหรือหลายๆส่วนในวงจรนั้นๆ ซึ่งในการออกแบบวงจรกรองความถี่ควรที่จะให้มีความไวต่ำที่สุด เพื่อรักษาเสถียรภาพของวงจร โดยสมการความไวของวงจรสามารถเขียนได้ดังสมการอนุพันธ์

$$S_x^y = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln x} = \frac{dy/y}{dx/x} \tag{4-22}$$

จากสมการที่ (4-22) หมายความว่า ความไวของตัวแปร  $y$  เมื่อเทียบกับตัวแปร  $x$  ซึ่งอาจจะอยู่ในภาพของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยของ  $y$  ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยของ  $x$  ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่า  $y$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของ  $x$  ที่เปลี่ยนแปลงไป

วงจรกำเนิดสัญญาณในภาพที่ 47 นั้นสามารถวิเคราะห์ค่าความไวซึ่งเป็นตัวบอกประสิทธิภาพของวงจรได้โดยแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ

- ความไวของตัวแปรพาสซีฟเทียบกับความถี่เข้าพุท โดยตัวแปรประกอบไปด้วยตัวเก็บ

**ประจุ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความไวของตัวแปรแอสซิมป์เทียบกับความถี่เข้าพุท โดยตัวแปรประกอบไปด้วยวงจรรานคอนดักเตอร์

สมการความไวของตัวแปรพาสซีฟคือ

$$S_c^\omega = \frac{\partial \omega}{\partial C} \left( \frac{C}{\omega} \right) \quad (4-23)$$

จากสมการ (4-23) สามารถหาค่าความไวของตัวเก็บประจุเทียบกับความถี่เข้าพุท ได้เป็น

$$S_c^\omega = \frac{\partial}{\partial C} \left( \frac{\sqrt{3}g_m}{C} \right) = \frac{\sqrt{3}g_m}{C^2} \cdot \frac{C^2}{\sqrt{3}g_m} = -1 \quad (4-24)$$

และจากสมการ (4-23) สามารถหาค่าสมการความไวของวงจรรานคอนดักเตอร์ ( $g_m$ ) เทียบกับความถี่เข้าพุทได้เป็น

$$S_{1/g_m}^\omega = \frac{\partial \omega}{\partial (1/g_m)} \left( \frac{1}{g_m \omega} \right) \quad (4-25)$$

จากสมการ (4-25) ก็จะได้

$$S_{1/g_m}^\omega = \frac{\partial}{\partial (1/g_m)} \left( \frac{\sqrt{3}g_m}{C} \right) = \frac{-\sqrt{3}g_m^2}{C} \cdot \frac{C}{\sqrt{3}g_m^2} = -1 \quad (4-26)$$

จากสมการ (4-24) และ (4-26) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองชนิดคือทั้ง  $C$  และ  $g_m$  ล้วนมีผลต่อการทำงานของวงจรถึ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรรานคอนดักเตอร์สามารถทำได้โดยการแก้ไขที่ตัวแปรทั้งสองส่วนนี้

การวิเคราะห์ค่าความไวอีกประเภทหนึ่ง คือการวิเคราะห์ค่าความไวเทียบกับคุณภาพ ( $Q$ ) ของวงจรถึ่งจะแยกออกได้เป็นสองชนิดเช่นกันคือ

- ความไวของตัวแปรพาสซีฟเทียบกับค่าคุณภาพของวงจรถึ่งโดยตัวแปรประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ

- ความไวของตัวแปรพาสซีฟเทียบกับค่าคุณภาพของวงจรถึ่งโดยตัวแปรประกอบไปด้วยวงจรรานคอนดักเตอร์

พิจารณาค่าความไวในกรณีของวงจรรองอันดับสามคือ

$$S_x^Q = S_x^{b_0} - S_x^{b_1} - S_x^{b_2} \quad (4-27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $b_1$ ,  $b_2$  และ  $b_3$  คือสัมประสิทธิ์โพลิโนเมียล  $D(s)$  โดยที่โพลิโนเมียลของสมการส่งผ่านอันดับสามในสมการที่ (4-3) มีค่าเท่ากับ

$$D(s) = s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0$$

โดยที่สมการโอนย้ายคือ

$$H(s) = \frac{g_m^3 / C^3}{s^3 + s^2(3g_m/C) + s(3g_m^2/C^2) + s(g_m^3/C^3)} \quad (4-28)$$

เทียบสัมประสิทธิ์ในสมการ (4-28) ได้

$$b_0 = \frac{g_m^3}{C^3}, \quad b_1 = \frac{3g_m^2}{C^2}, \quad b_2 = \frac{3g_m}{C}$$

ดังนั้นจากสมการ (4-27) สามารถหาค่าความไวของตัวเก็บประจุเทียบกับค่าคุณภาพของวงจรได้เป็น

$$\begin{aligned} S_C^Q &= \frac{\partial}{\partial C} \left[ \frac{C}{b_0} \right] - \frac{\partial}{\partial C} \left[ \frac{C}{b_1} \right] - \frac{\partial}{\partial C} \left[ \frac{C}{b_2} \right] \\ &= g_m^3 \frac{\partial}{\partial C} \left[ \frac{1}{C^3} \right] \cdot \frac{C^4}{g_m^3} - 3g_m^2 \frac{\partial}{\partial C} \left[ \frac{1}{C^2} \right] \cdot \frac{C^3}{3g_m^2} - 3g_m \frac{\partial}{\partial C} \left[ \frac{1}{C} \right] \cdot \frac{C^2}{3g_m} = 0 \end{aligned} \quad (4-29)$$

และในกรณีเดียวกันก็สามารถหาค่าความไวของวงจรทรานคอนดักเตอร์เทียบกับค่าคุณภาพของวงจรได้เป็น

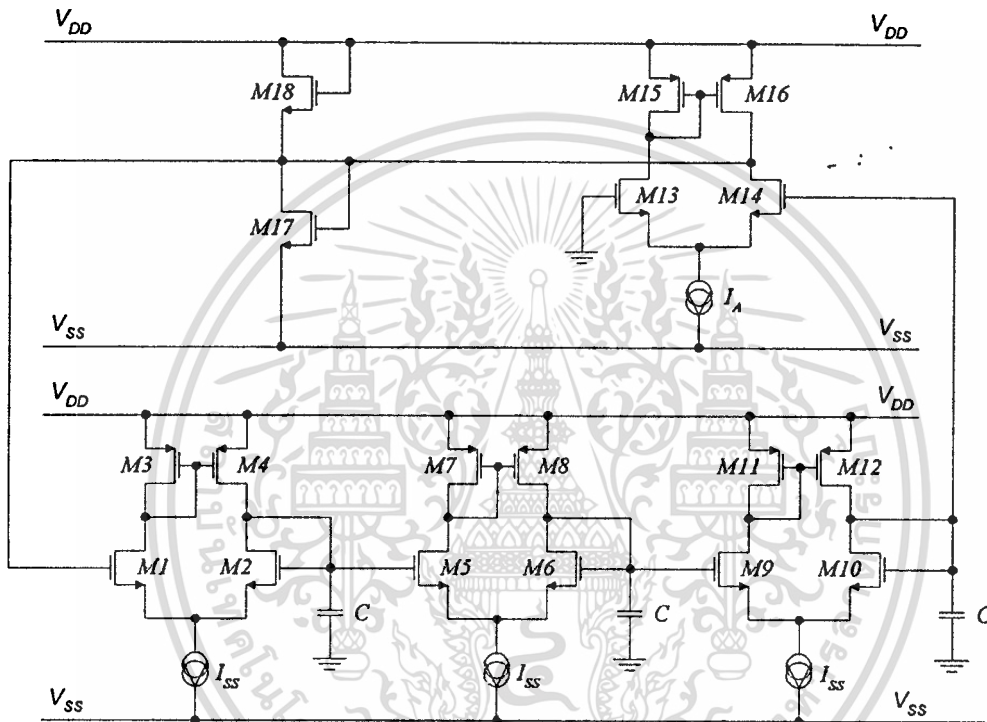
$$\begin{aligned} S_{1/g_m}^Q &= -S_{g_m}^Q \\ S_{g_m}^Q &= \frac{-\partial}{\partial g_m} \left( \frac{g_m}{b_0} \right) + \frac{\partial}{\partial g_m} \left( \frac{g_m}{b_1} \right) + \frac{\partial}{\partial g_m} \left( \frac{g_m}{b_2} \right) \\ &= \frac{-\partial}{\partial g_m} \left( \frac{g_m^3}{C^3} \right) \cdot \frac{C^3}{g_m^2} + \frac{\partial}{\partial g_m} \left[ \frac{3g_m^2}{C^2} \right] \cdot \frac{C^2}{3g_m} + \frac{\partial}{\partial g_m} \left( \frac{3g_m}{C} \right) \cdot \frac{C}{3} = 0 \end{aligned} \quad (4.30)$$

จากสมการ (4-29) และ (4-30) จึงสรุปได้ว่าตัวแปรทุกตัวจะไม่มีผลต่อคุณภาพของวงจรทำให้วงจรนี้มีเสถียรภาพดีมาก

### การทดสอบและผลการทดสอบ

จากวงจรในภาพที่ 47 สามารถสร้างเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้วงจรถานคอนคัตเตอร์แบบง่ายโดยแสดงได้ดังภาพที่ 48

ภาพที่ 48



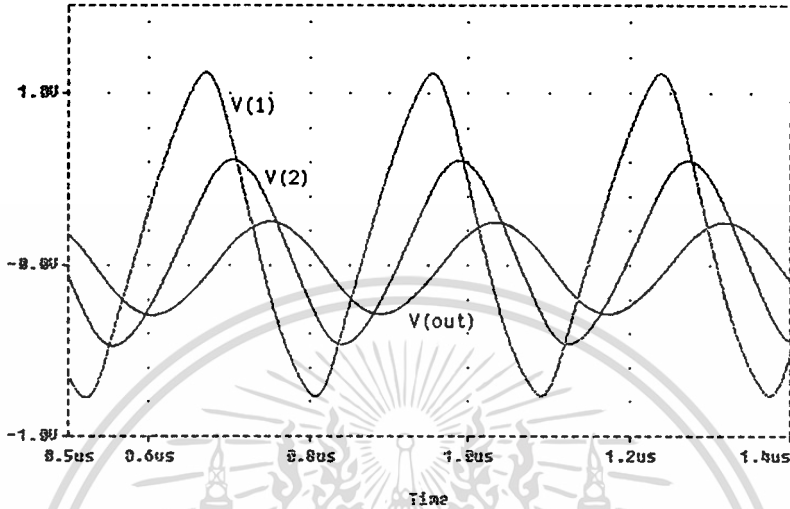
แสดงวงจรถานกำเนิดสัญญาณโดยใช้วงจรถานคอนคัตเตอร์แบบง่ายแบบที่หนึ่ง

ในภาพที่ 48 แสดงวงจรถานกำเนิดสัญญาณที่ใช้วงจรถานคอนคัตเตอร์แบบง่ายที่ประกอบด้วยวงจรถานคู่ดิฟเฟอเรนเชียล 4 ชุด ตัวต้านทานแบบอิลคทรอนิกส์ 1 ชุด แหล่งจ่ายกระแสแสดงที่ 4 ชุด และตัวเก็บประจุ 4 ตัว การทดสอบในตอนหนึ่งสามารถจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice โดยใช้โมเดลทรานซิสเตอร์แบบ Worst Case ของ European Silicon Structure (ES2) [24] ซึ่งค่า W/L ของค่าทรานซิสเตอร์ทั้งหมดจะมีค่าดังนี้ (W/L)=(30 $\mu$ m/5 $\mu$ m) ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ M1, M2, M3, M5, M6, M7, M9, M10, M11, (W/L)=(25 $\mu$ m/5 $\mu$ m) ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ M4, M8, M12, (W/L)=(600 $\mu$ m/5 $\mu$ m) ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ M13, M14, (W/L)=(500 $\mu$ m/5 $\mu$ m) ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ M15, (W/L)=(490 $\mu$ m/5 $\mu$ m) ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ M16 และ (W/L)=(5 $\mu$ m/5 $\mu$ m) ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ M17, M18 โดยผลการทดลองในตอนหนึ่งสามารถแสดงรูปคลื่นสัญญาณที่กำเนิดได้ ณ จุดต่างๆ โดยอ้างอิงจากภาพที่ 43 ซึ่งประกอบไปด้วย V(1),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V(2)$  และ  $V(out)$  ดังภาพที่ 49 ซึ่งจากภาพจะพิจารณาได้ว่าสัญญาณทั้งสามจุดจะมีค่าเฟสต่างกัน  
จุดละ 90 องศา

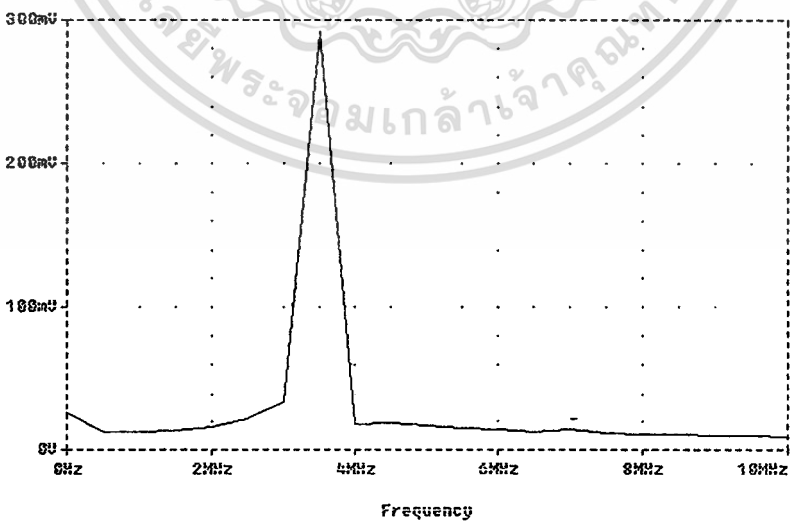
ภาพที่ 49



แสดงรูปสัญญาณที่กำเนิดได้ ณ จุดต่างๆสามจุดของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งโดยการ  
จำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการเขียนแบบการทดสอบในภาพที่ 50 เป็นการแสดงรูปสัญญาณเข้าพุดที่กำเนิดได้ใน  
รูปของอาณาจักรความถี่ (Frequency Domain) โดยแสดงค่าความถี่ของวงจรที่กำเนิดได้

ภาพที่ 50



แสดงรูปคลื่นสัญญาณที่กำเนิดได้ในรูปของอาณาจักรความถี่ ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่ง  
โดยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice

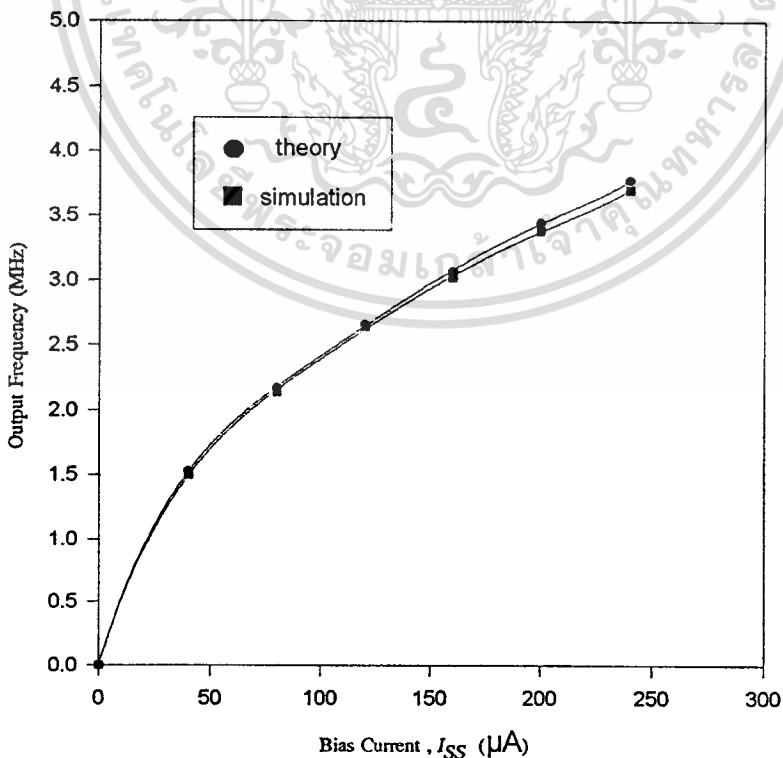
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาพที่ 51 เป็นผลการทดลองแสดงค่าความถี่เข้าพุทของวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณของภาพที่ 48 โดยการปรับค่ากระแสไบอัส  $I_{SS}$  ของวงจรถ่ายที่ค่าต่างๆ ในช่วง  $50\mu\text{A}$ - $250\mu\text{A}$  โดยให้ค่าตัวเก็บประจุ  $C$  ในวงจรมีค่าคงที่เท่ากับ  $10\text{pF}$  เทียบกับค่าความถี่เข้าพุทที่ได้ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice และในภาพที่ 52 เป็นผลการทดลองแสดงค่าความถี่เข้าพุทของ วงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณของภาพที่ 48 โดยการปรับค่าตัวเก็บประจุ  $C$  ของวงจรถ่ายที่ค่าต่างๆ ในช่วง  $10\text{pF}$ - $50\text{pF}$  โดยให้ค่ากระแสไบอัสในวงจรมีค่าคงที่เท่ากับ  $200\mu\text{A}$  เทียบกับค่าความถี่เข้าพุทที่ได้ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice

ในภาพที่ 51 ค่าความถี่เข้าพุทของวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณในทางทฤษฎีจะมีค่าเท่ากับสมการที่ (4-21) และค่า  $g_m$  จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (3-8) นั่นคือ

$$f = \frac{\sqrt{\frac{3I_{SS} \mu C_{ox} W_1}{L_1}}}{2\pi C} \quad (4-31)$$

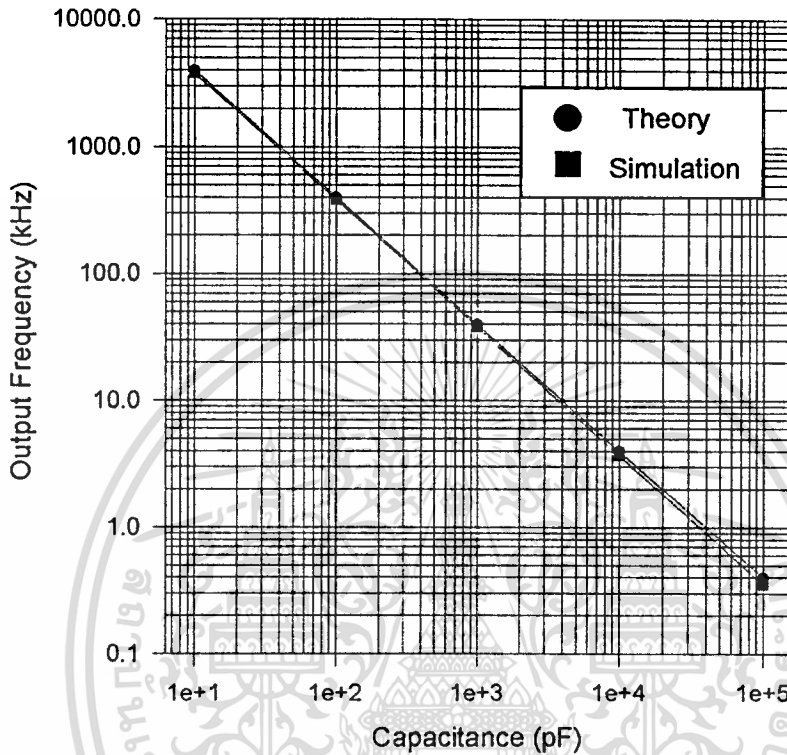
ภาพที่ 51



กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุทของวงจรถ่ายเมื่อปรับค่ากระแสไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

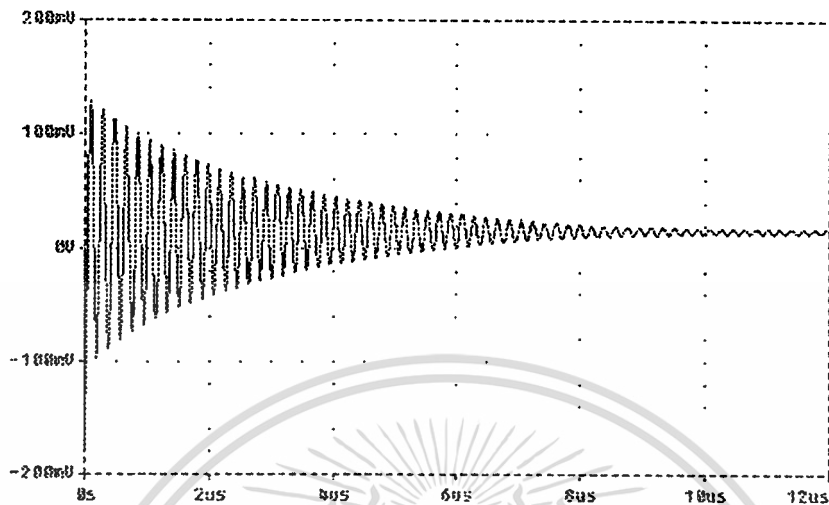
ภาพที่ 52



กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุดของวงจรเมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุ

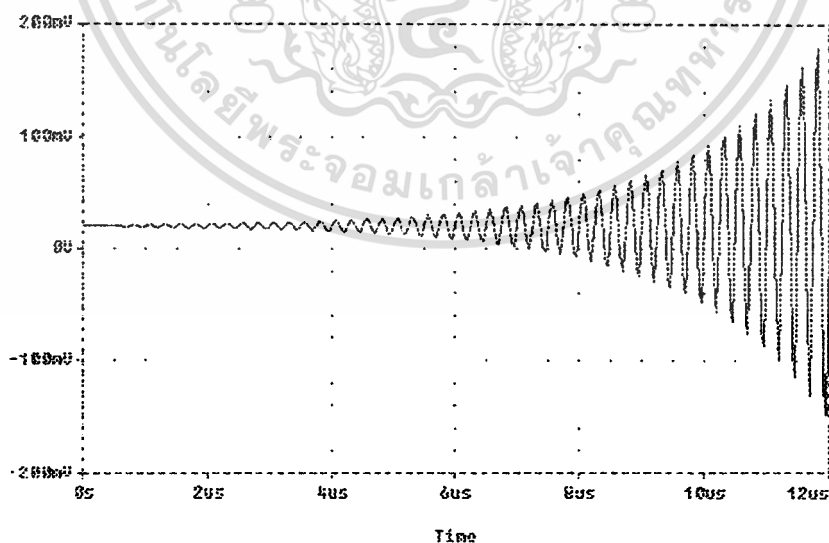
นอกจากนี้ในรูปที่ 53 เป็นการแสดงรูปคลื่นของวงจรกำเนิดสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ Underdamped Oscillation ซึ่งเกิดจากเงื่อนไข  $A\beta < 1$  ของวงจรในภาพที่ 48 โดยมีค่ากระแสไบอัสในวงจรมีค่า  $200 \mu\text{A}$ . พบว่าขนาดหรือแอมพลิจูดของสัญญาณมีขนาดลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องมาจากค่ากระแสไบอัสในส่วนของวงจรขยายในวงจรมีค่าต่ำเกินไป และส่วนในรูปที่ 54 เป็นการแสดงรูปคลื่นของวงจรกำเนิดสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ Overdamped Oscillation ซึ่งเกิดจากเงื่อนไข  $A\beta > 1$  ของวงจรในภาพที่ 48 โดยมีค่ากระแสไบอัสในวงจรมีค่า  $200 \mu\text{A}$ . โดยจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice เช่นกัน พบว่าขนาดหรือแอมพลิจูดของสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอาจมีค่าเท่ากับไฟเลี้ยงของวงจร เนื่องมาจากค่ากระแสไบอัสในส่วนของวงจรขยายในวงจรมีค่ามากเกินไป

ภาพที่ 53



แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Underdamped Oscillation ของวงจรในภาพที่ 48

ภาพที่ 54



แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Overdamped Oscillation ของวงจรในภาพที่ 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทสรุป

ในบทที่ 4 นี้ เป็นการเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้วงจรถานคอนดักเตอร์ในแบบแรกซึ่งมีโครงสร้างที่ง่าย ประกอบไปด้วยวงจรถานคอนดักเตอร์ 3 ตัว และวงจรถายอีกหนึ่งตัว และได้ทดสอบการทำงานโดยใช้โปรแกรมจำลองการทำงาน Pspice โดยใช้วงจรแบบคูติฟเฟอร์เรเนียนที่มีโครงสร้างแบบง่าย และจากการทดสอบสามารถปรับความถี่ได้ทั้งจากการปรับค่ากระแสไบอัส และการปรับค่าตัวเก็บประจุในวงจร ซึ่งจะได้ทำการทดลองต่อวงจรโดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3080E ในบทที่ 7 ต่อไป



## บทที่ 5

### วงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้วงจรทรานคอนดักเตอร์แบบที่สอง

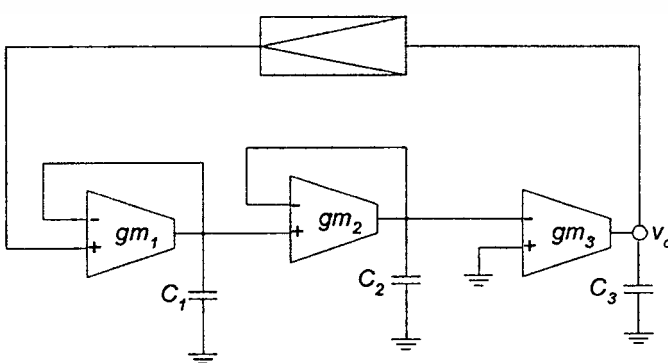
#### บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบใหม่อีกชนิดหนึ่ง โดยใช้วงจรทรานคอนดักเตอร์เช่นเดียวกับกับวงจรที่เสนอไว้ในบทที่ 4 โดยวงจรประกอบไปด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์แบบที่มีการสูญเสียสองวงจร และนำวงจรอินทิเกรเตอร์แบบที่ไม่มีการสูญเสียอีกหนึ่งวงจรมาต่อคาบคอดกันและใช้หลักการป้อนกลับสัญญาณซึ่งใช้วงจรทรานคอนดักเตอร์ที่มีค่าทรานคอนดักแตนซ์เป็นสองเท่าของค่าทรานคอนดักแตนซ์ปกติ เพื่อให้วงจรกำเนิดสัญญาณได้ โดยวงจรนี้ใช้ทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 16 ตัว, แหล่งจ่ายกระแสคงที่ 4 ตัว และตัวเก็บประจุ 3 ตัว และใช้แรงดันไฟเลี้ยงที่  $\pm 3$  โวลต์ โดยจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice

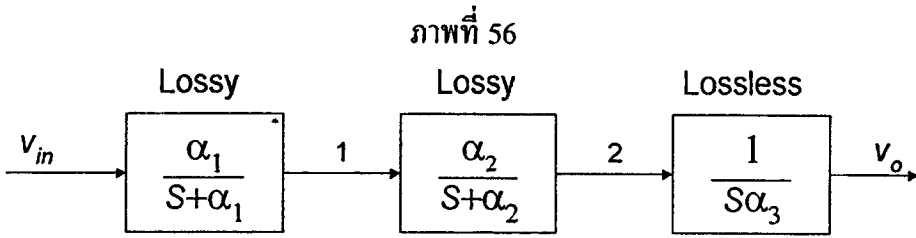
#### ทฤษฎีและหลักการ

ทฤษฎีและหลักการของวงจรนี้ยังคงใช้หลักการเดิมเช่นเดียวกับกับวงจรที่เสนอในบทที่ 4 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบใหม่ที่น่าเสนอ

ภาพที่ 55



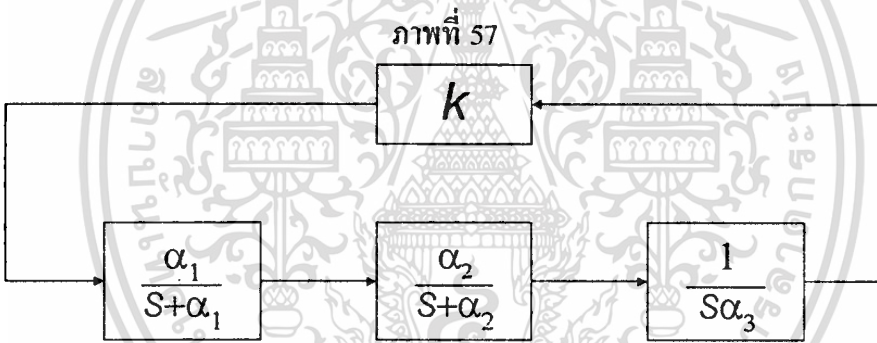
แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ OTA แบบที่สอง



แสดงไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สอง

จากภาพที่ 56 สามารถเขียนเป็นสมการส่งผ่านได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{v_o}{v_{in}} = H(s) &= \frac{\alpha_1 \alpha_2}{(s + \alpha_1) + (s + \alpha_2) + (s + \alpha_3)} \\ &= \frac{\alpha_1 \alpha_2 / \alpha_3}{s^3 + s^2(\alpha_1 + \alpha_2) + s(\alpha_1 \alpha_2)} \end{aligned} \quad (5-1)$$



แสดงไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีส่วนของการป้อนกลับ

เมื่อพิจารณาในส่วนของ  $g_{m1}$  และ  $g_{m2}$  จะเขียนได้ดังสมการ

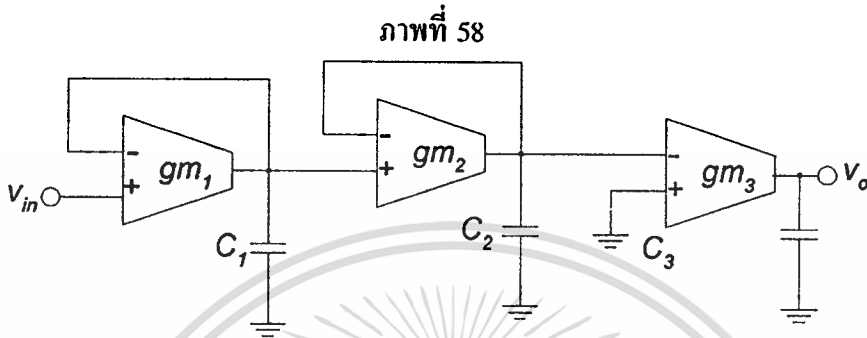
$$\frac{v_{o2}}{v_{in}} = \frac{g_{m1} g_{m2} / C_1 C_2}{s^2 + \left[ \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \right] s + \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right]} \quad (5-2)$$

เมื่อพิจารณาในส่วนของ Lossless Integrator ที่เข้าพุด จะได้ค่าฟังก์ชันโอนย้ายได้เป็น

$$H(s) = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{-g_{m1} g_{m2} g_{m3} / C_1 C_2 C_3}{s^3 + \left[ \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \right] s^2 + \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right] s} \quad (5-3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (5-3) คือสมการโอนย้ายของวงจรกรองอันดับสามที่ประกอบไปด้วยวงจรมินิเกรเตอร์แบบที่มีการสูญเสีย (Lossy Integrator) 2 ตัว และวงจรมินิเกรเตอร์แบบที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Integrator) 1 ตัว นำมาต่อคาบคอดกันซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 58



แสดงวงจรกรองอันดับสาม

จากสมการที่ (5-3) เมื่อต่อจุด  $V_o$  ผ่านวงจรขยายป้อนกลับและนำไปเชื่อมกับ  $V_{in}$  ก็จะทำให้วงจรกรองอันดับสามดังแสดงในภาพที่ 58 กลายเป็นวงจรมินิเกรเตอร์อันดับสามได้ ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 55 ซึ่งวงจรจะมีลักษณะเป็นลููปปิดซึ่งมีอัตราขยาย (Loop Gain) เท่ากับหนึ่ง จากสมการเงื่อนไขระบบป้อนกลับ

$$1 - A_v \beta_v = 0$$

แทนค่า  $A_v \beta_v = H(s)$  ก็จะได้

$$1 - \frac{-g_{m1}g_{m2}g_{m3} / C_1C_2C_3}{s^3 + \left[ \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \right] s^2 + \left[ \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \right] s} = 0$$

$$\frac{s^3 + \left[ \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \right] s^2 + \left[ \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \right] s + \frac{g_{m1}g_{m2}g_{m3}}{C_1C_2C_3}}{s^3 + \left[ \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \right] s^2 + \left[ \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \right] s} = 0$$

แยกสัมประสิทธิ์สมการข้างบนได้เป็น

$$s^3 + \left[ \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \right] s^2 + \left[ \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \right] s + \left[ \frac{g_{m1}g_{m2}g_{m3}}{C_1C_2C_3} \right] = 0 \quad (5-4)$$

จากสมการ (5-4) สามารถพิจารณาแยกสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในภาพของโพลีโนเมียลอันดับสามก็จะได้

ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_0 = 1$$

$$a_1 = \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2}$$

$$a_2 = \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}$$

$$a_3 = \frac{g_{m1}g_{m2}g_{m3}}{C_1C_2C_3}$$

จากสมการเงื่อนไขของการออสซิลเลต  $a_3a_0 - a_2a_1 = 0$  จะหาเงื่อนไขได้คือ

$$\frac{g_{m1}g_{m2}g_{m3}}{C_1C_2C_3} - \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \left[ \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \right] = 0$$

$$\frac{g_{m3}}{C_3} - \left[ \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \right] = 0$$

จะได้เงื่อนไขของการออสซิลเลตคือ

$$\frac{g_{m3}}{C_3} = \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \quad (5-5)$$

และจากสมการเงื่อนไขทางความถี่  $\omega^2 = \frac{a_2}{a_0}$  สามารถหาเงื่อนไขทางความถี่ได้เป็น

$$\omega^2 = \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (5-6)$$

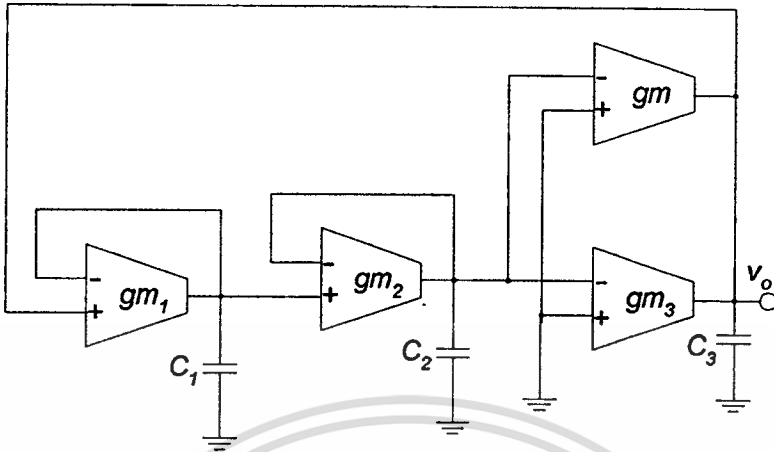
จากสมการ (5-5) พบว่าเงื่อนไขของการออสซิลเลตคือ

$$\frac{g_{m3}}{C_3} = \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2}$$

ถ้ากำหนดให้  $g_{m1} = g_{m2} = g_{m3} = g_m$  และ  $C_1 = C_2 = C_3 = C$  ก็จะได้เงื่อนไขของการออสซิลเลตเป็น  $g_{m2} = 2g_m$  นั่นคือค่า  $k$  จะต้องมีค่าเป็นสองเท่าของค่าของทรานคอนดักแตนซ์ของ  $g_{m1}$  หรือ  $g_{m2}$  วงจรจึงจะสามารถออสซิลเลตได้ โดยวงจรจริงในทางปฏิบัติอาจสร้างได้โดยทำวงจร OTA อีกตัวหนึ่งมาต่อขนานกับวงจร  $g_{m3}$  โดยให้มีค่าคอนดักแตนซ์เท่ากับ  $g_{m3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 59



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์แบบที่สองที่ประกอบด้วยการป้อนกลับที่มีค่าทรานคอน  
คัตแดนซ์สองเท่า

### การวิเคราะห์ค่าความไว (Sensitivity) ของวงจร

วงจรกำเนิดสัญญาณในภาพที่ 59 นั้นสามารถวิเคราะห์ค่าความไวซึ่งเป็นตัวบอกประสิทธิภาพของวงจรได้โดยแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ

- ความไวของตัวแปรพาสซีฟเทียบกับความถี่เข้าหุด โดยตัวแปรประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ
- ความไวของตัวแปรแอคทีฟเทียบกับความถี่เข้าหุด โดยตัวแปรประกอบไปด้วยค่าทรานคอนคัตแดนซ์

สมการความไวของตัวแปรพาสซีฟคือ

$$S_C^{\omega} = \frac{\partial \omega(C)}{\partial C} \left( \frac{C}{\omega} \right)$$

แต่เนื่องจากค่า  $\omega = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}$  ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรมากกว่า 1 ตัว จึงต้องแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือ  $S_{C_1}^{\omega}$  และ  $S_{C_2}^{\omega}$  ซึ่งจะหาค่าความไวของตัวแปรพาสซีฟได้เป็น

$$S_{C_1}^{\omega} = \frac{\partial \omega}{\partial C_1} \left( \frac{C_1}{\omega} \right) \quad (5-7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{C_1}^\omega = \frac{\partial}{\partial C_1} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right]^{1/2} \left[ \frac{C_1}{\omega} \right] = \frac{-1}{2} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right]^{-1} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right] = -\frac{1}{2} \quad (5-8)$$

นั่นคือค่าความไวของ  $C_1$  เมื่อเทียบกับความถี่เข้าพุทมีค่าเท่ากับ  $-0.5$  และค่าความไวของ  $C_2$  เมื่อเทียบกับความถี่เข้าพุทจะมีค่าเท่ากับ

$$S_{C_2}^\omega = \frac{\partial \omega}{\partial C_2} \left( \frac{C_2}{\omega} \right) \quad (5-9)$$

$$S_{C_2}^\omega = \frac{\partial}{\partial C_2} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right]^{1/2} \left[ \frac{C_2}{\omega} \right] = -\frac{1}{2} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right]^{-1} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right] = -\frac{1}{2} \quad (5-10)$$

สมการความไวของตัวแปรแอกทีฟคือ

$$S_{1/g_m}^\omega = \frac{\partial \omega}{\partial 1/g_m} \left[ \frac{1}{g_m \omega} \right] \quad (5-11)$$

แต่เนื่องจากค่า  $\omega = \sqrt{\frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}}$  ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรมากกว่า 1 ตัว จึงต้องแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนเช่นกันคือ  $S_{1/g_{m1}}^\omega$  และ  $S_{1/g_{m2}}^\omega$  ซึ่งจะหาค่าความไวของตัวแปรแอกทีฟได้เป็น

$$S_{1/g_{m1}}^\omega = \frac{\partial \omega}{\partial 1/g_{m1}} \left( \frac{1}{g_{m1} \omega} \right) \quad (5-12)$$

$$S_{1/g_{m1}}^\omega = \frac{\partial}{\partial 1/g_{m1}} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right]^{1/2} \left[ \frac{1}{g_{m1} \omega} \right] = -\frac{1}{2} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right]^{-1} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right] = -\frac{1}{2} \quad (5-13)$$

นั่นคือค่าความไวของ  $g_{m1}$  เมื่อเทียบกับความถี่เข้าพุทมีค่าเท่ากับ  $-0.5$  และค่าความไวของ  $g_{m2}$  เมื่อเทียบกับความถี่เข้าพุทจะมีค่าเท่ากับ

$$S_{1/g_{m2}}^\omega = \frac{\partial \omega}{\partial 1/g_{m2}} \left( \frac{1}{g_{m2} \omega} \right) \quad (5-14)$$

$$S_{1/g_{m2}}^\omega = \frac{\partial}{\partial 1/g_{m2}} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right]^{1/2} \left[ \frac{1}{g_{m2} \omega} \right] = -\frac{1}{2} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right]^{-1} \left[ \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right] = -\frac{1}{2} \quad (5-15)$$

จากสมการที่ (5-8) และ (5-10) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรพาสซีฟของวงจรถือตัวเก็บประจุมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของวงจร และจากสมการที่ (5-13) และ (5-15) ก็แสดงให้เห็นว่าตัวแปรแอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ฟของวงจรถือค้ำทรานคอนดักแตนซ์ ( $g_{m1}$  และ  $g_{m2}$ ) ซึ่งมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของวงจรถนเคียวกัน

การวิเคราะห์ค้ำความไวอีกประเภทหนึ่ง ก็คือการวิเคราะห์ค้ำความไวของวงจรถียบกับคุณภาพ (Q) ของวงจรถึ่งก็ประกอบไปค้ำด้วยสองชนิดเช่นกันคือ

- ความไวของค้ำแปรพาสซีฟเทียบกับค้ำคุณภาพของวงจรถโดยค้ำแปรประกอบไปค้ำด้วยค้ำเก็บประจุ

- ความไวของค้ำแปรแอคทีฟเทียบกับค้ำคุณภาพของวงจรถโดยค้ำแปรประกอบไปค้ำด้วยค้ำทรานคอนดักแตนซ์

สมการความไวในกรณีของวงจรถรองอันดับสองคือ

$$S_x^Q = \frac{1}{2} S_x^{b_0} - S_x^{b_1} \quad (5-16)$$

โดยที่  $b_0$  และ  $b_1$  คือค้ำสัมประสิทธิ์โพลิโนเมียลของสมการส่งผ่านอันดับสามในสมการที่ (5-3) ซึ่งมีค้ำเท่ากับ

$$D(s) = s^3 + b_1 s^2 + b_0 s \quad (5-17)$$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการที่ (5-13) ก็จะได้ค้ำ  $b_1$  และ  $b_0$  เป็น

$$b_1 = \left( \frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m2}}{C_2} \right) \quad (5-18)$$

$$\text{และ} \quad b_0 = \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \quad (5-19)$$

จากสมการที่ (5-18) และ (5-19) ถ้ากำหนดให้  $g_{m1} = g_{m2} = g_m$  และ  $C_1 = C_2 = C$  จะสามารถหาค้ำความไวเทียบกับค้ำคุณภาพของวงจรถจากสมการที่ (5-16) ได้เป็น

$$S_C^Q = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial C} \left( \frac{C}{b_0} \right) - \frac{\partial}{\partial C} \left( \frac{C}{b_1} \right) \quad (5-20)$$

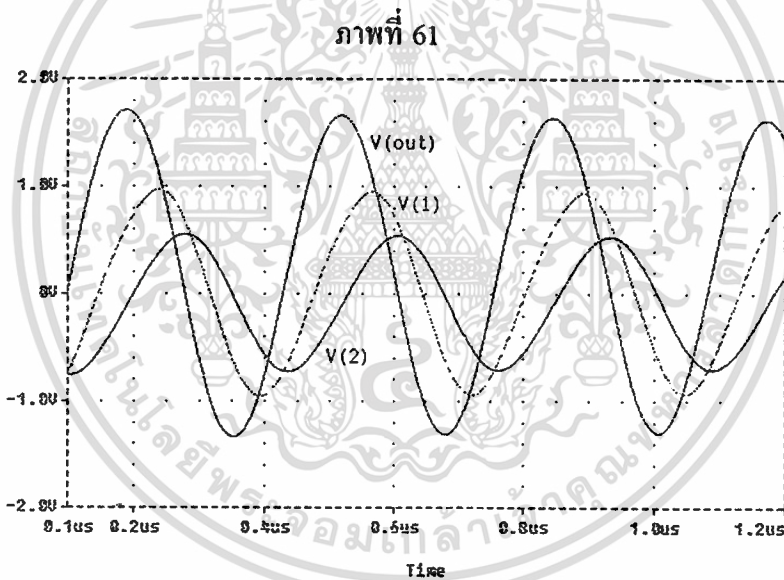
$$S_C^Q = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial C} \left( \frac{2g_m}{C^2} \right) \left( \frac{C^3}{2g_m} \right) - \frac{\partial}{\partial C} \left( \frac{2g_m}{C} \right) \left( \frac{C^2}{2g_m} \right) = 0 \quad (5-21)$$

นั่นคือค้ำความไวของ  $C$  เมื่อเทียบกับคุณภาพของวงจรถมีค้ำเป็นศูนย์ และค้ำความไวของ  $g_m$  เมื่อเทียบกับคุณภาพของวงจรถจะมีค้ำเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



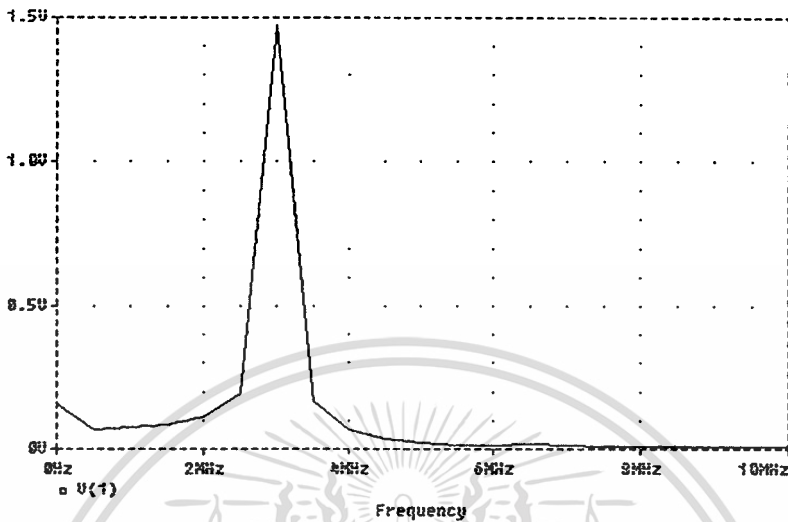
ในภาพที่ 60 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้วงจรทรานคอนคัตเตอร์แบบง่ายที่ประกอบด้วยวงจรถูกคิฟเฟอเรนเชียล 4 ชุด แหล่งจ่ายกระแสคงที่ 4 ชุด และตัวเก็บประจุ 3 ตัว การทดสอบในตอนหนึ่งสามารถจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice โดยใช้โมเดลทรานซิสเตอร์แบบ Worst Case ของ European Silicon Structure (ES2) [24] ซึ่งค่า W/L ของค่าทรานซิสเตอร์ทั้งหมดจะมีค่าดังนี้  $(W/L)=(30\mu\text{m}/5\mu\text{m})$  ได้แก่ทรานซิสเตอร์ M1, M2, M3, M5, M6, M7, M12, M16,  $(W/L)=(25\mu\text{m}/5\mu\text{m})$  ได้แก่ทรานซิสเตอร์ M4, M8, M11, M15,  $(W/L)=(50\mu\text{m}/5\mu\text{m})$  ได้แก่ทรานซิสเตอร์ M9, M10, M13, M14 โดยผลการทดลองในตอนหนึ่งสามารถแสดงรูปคลื่นสัญญาณที่กำเนิดได้ ณ จุดต่างๆ โดยอ้างอิงจากภาพที่ 56 ซึ่งประกอบไปด้วย V(1), V(2) และ V(out) ดังภาพที่ 61 ซึ่งจากภาพจะพิจารณาได้ว่าสัญญาณทั้งสามจุดจะมีค่าเฟสต่างกันจุดละ 90 องศา



แสดงรูปสัญญาณที่กำเนิดได้ ณ จุดต่างๆสามจุดของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สองโดยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการทดลองในภาพที่ 62 เป็นการแสดงรูปสัญญาณเข้าชุดที่กำเนิดได้ในรูปของอาณาจักรความถี่ (Frequency Domain) โดยแสดงค่าความถี่ของวงจรที่กำเนิดได้

ภาพที่ 62



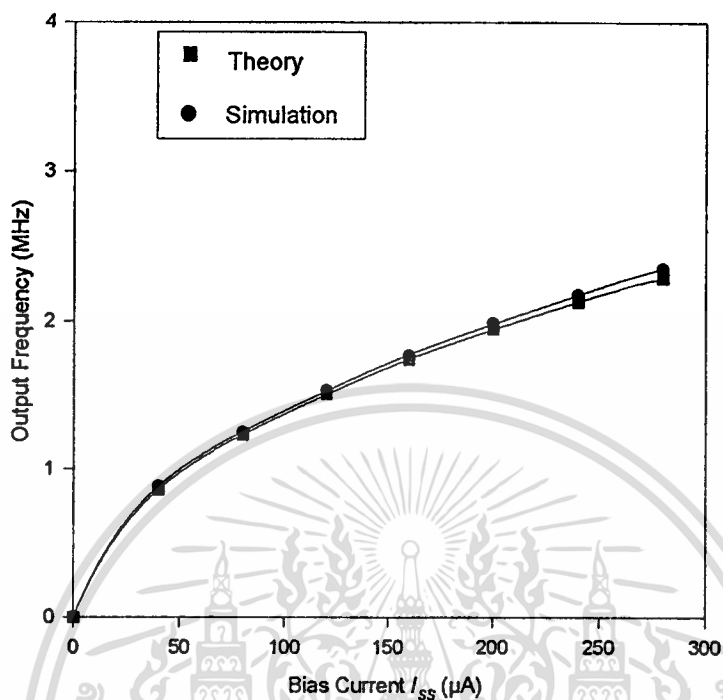
แสดงรูปคลื่นสัญญาณที่กำเนิดได้ในรูปของอาณาจักรความถี่ ของวงจรถ้าเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่ง โดยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice

ในภาพที่ 63 เป็นผลการทดลองแสดงค่าความถี่เข้าพุทของวงจรถ้าเนิดสัญญาณของภาพที่ 60 โดยการปรับค่ากระแสไบอัส  $I_{SS}$  ของวงจรถ้าค่าต่างๆ ในช่วง  $40\mu\text{A}$ - $280\mu\text{A}$  โดยให้ค่าตัวเก็บประจุ  $C$  ในวงจรมีค่าคงที่เท่ากับ  $10\text{pF}$  เทียบกับค่าความถี่เข้าพุทที่ได้ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice และในภาพที่ 64 เป็นผลการทดลองแสดงค่าความถี่เข้าพุทของ วงจรถ้าเนิดสัญญาณของภาพที่ 60 โดยการปรับค่าตัวเก็บประจุ  $C$  ของวงจรถ้าค่าต่างๆ ในช่วง  $10\text{pF}$ - $100,000\text{pF}$  โดยให้ค่ากระแสไบอัสในวงจรมีค่าคงที่เท่ากับ  $250\mu\text{A}$  เทียบกับค่าความถี่เข้าพุทที่ได้ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice

ในภาพที่ 63 ค่าความถี่เข้าพุทของวงจรถ้าเนิดสัญญาณในทางทฤษฎีจะมีค่าเท่ากับสมการที่ (5-6) และค่า  $g_m$  จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (3-8) นั่นคือ

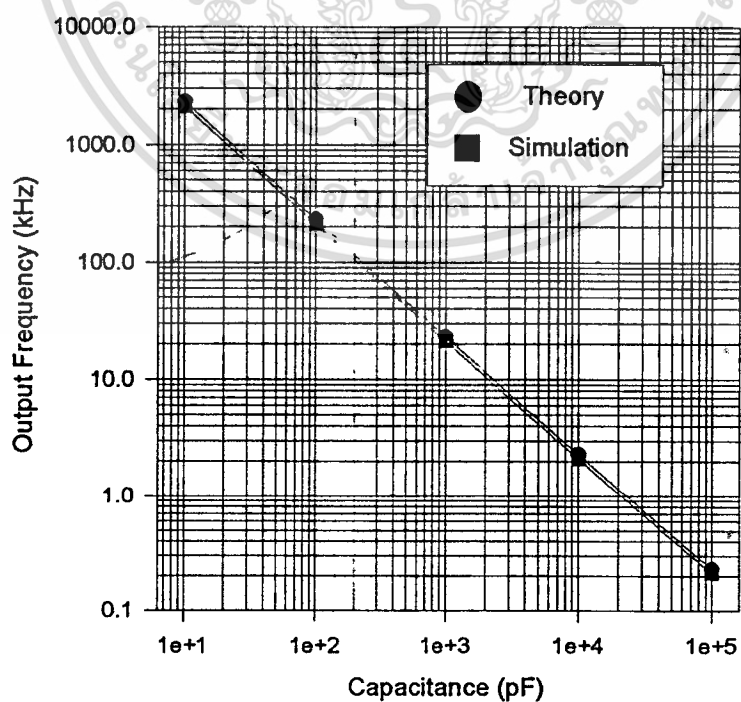
$$f = \frac{\sqrt{\frac{I_{ss} \mu C_{ox} W_1}{L_1}}}{2\pi C} \quad (5-24)$$

ภาพที่ 63



กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุทของวงจรเมื่อปรับค่ากระแสไบอัส

ภาพที่ 64

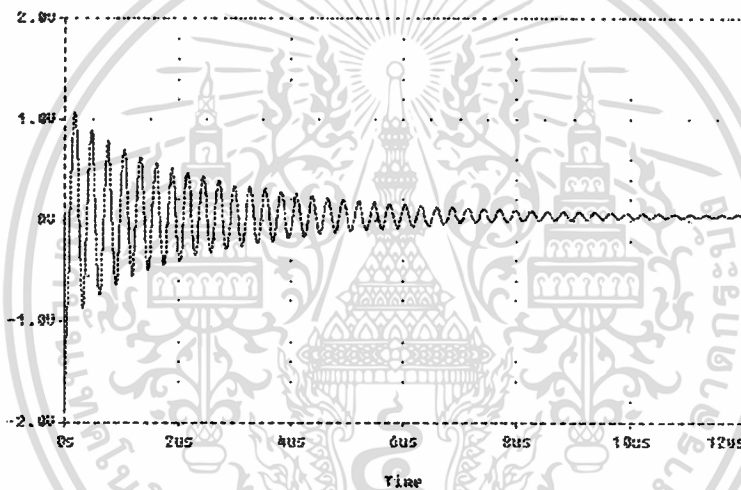


กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุทของวงจรเมื่อปรับค่าตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

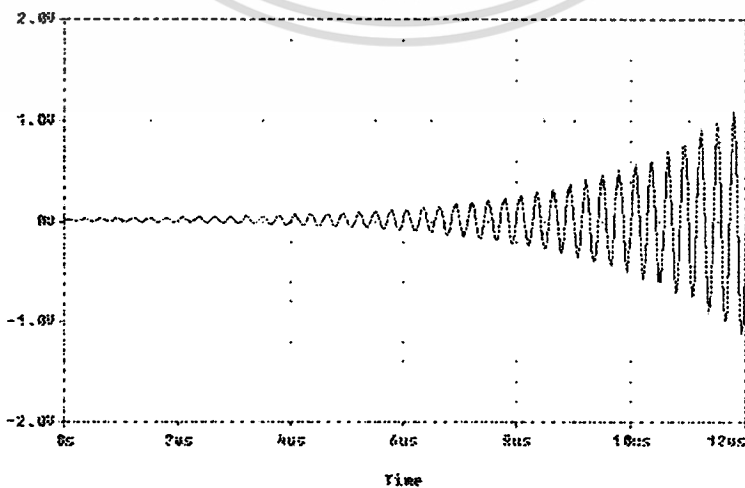
นอกจากนี้ในรูปที่ 65 เป็นการแสดงรูปคลื่นของวงจรกำเนิดสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ Underdamped Oscillation ซึ่งเกิดจากเงื่อนไข  $A\beta < 1$  ของวงจรในภาพที่ 60 พบว่าขนาดหรือแอมพลิจูดของสัญญาณมีขนาดลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากค่ากระแสไบอัสในส่วน of วงจรขยายในวงจรมีค่าต่ำหรือสูงจนเกินไป และส่วนในรูปที่ 66 เป็นการแสดงรูปคลื่นของวงจรกำเนิดสัญญาณที่เกิดปรากฏการณ์ Overdamped Oscillation ซึ่งเกิดจากเงื่อนไข  $A\beta > 1$  ของวงจรในภาพที่ 60 พบว่าขนาดหรือแอมพลิจูดของสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอาจมีค่าเท่ากับไฟเลี้ยงของวงจร เนื่องมาจากการไม่แมทซ์ (match) กันของทรานซิสเตอร์ภายในวงจร โดยจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice เช่นกัน

ภาพที่ 65



แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Underdamped Oscillation ของวงจรในภาพที่ 60

ภาพที่ 66



แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Overdamped Oscillation ของวงจรในภาพที่ 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทสรุป

ในบทที่ 5 นี้ เป็นการเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้วงจรถานคอนดักเตอร์ในแบบแรกซึ่งมีโครงสร้างที่ง่าย ประกอบไปด้วยวงจรถานคอนดักเตอร์ 4 ตัว และได้ทดสอบการทำงานโดยใช้โปรแกรมจำลองการทำงาน Pspice โดยใช้วงจรแบบคู่คิพเฟอร์เร็นเชียลที่มีโครงสร้างแบบง่าย และจากการทดสอบสามารถปรับความถี่ได้ทั้งจากการปรับค่ากระแสไบอัส และการปรับค่าตัวเก็บประจุในวงจร ซึ่งจะได้ทำการทดลองต่อวงจรโดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3080E ในบทที่ 7 ต่อไป



## บทที่ 6

### การทดลองและผลการทดลอง

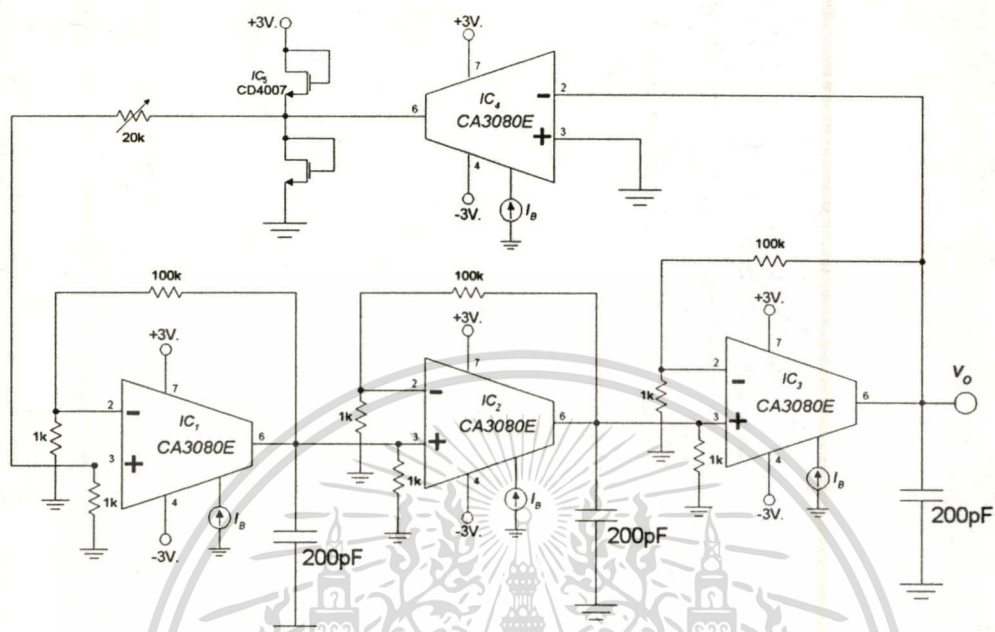
#### บทนำ

จากบทที่ 4 และบทที่ 5 ที่ได้ทำการเสนอมวงจรถ้าเนิดสัญญาณทั้งสองแบบ โดยได้อธิบายถึงทฤษฎีและหลักการของวงจร และได้จำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice ไปแล้วนั้น เพื่อทำการยืนยันหลักการให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ในบทที่ 6 นี้ จะเป็นการทดลองต่อวงจรถ้าเนิดสัญญาณทั้งสองวงจรมี โดยทำการต่อวงจรลงในแผ่นโปรโตบอร์ด และทำการต่อวงจรลงในแผ่นปริ้นแอนกประสงค์ โดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3080E

#### การทดลองและผลการทดลองของวงจรที่หนึ่ง

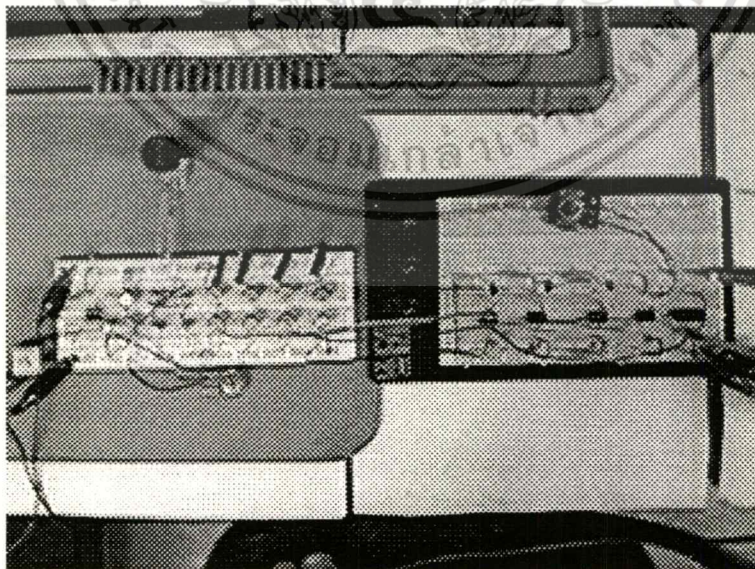
การทดลองต่อวงจรถ้าเนิดสัญญาณในแบบที่หนึ่ง ในตอนแรกได้ต่อวงจรลงในโปรโตบอร์ด เนื่องจากต่อได้รวดเร็วและประหยัดเวลา โดยใช้ไอซี OTA CA3080E ทั้งหมด 4 ตัว โดยไอซีหนึ่งตัวประกอบไปด้วย OTA 1 ตัว และจ่ายกระแสไบอัสให้กับไอซีโดยใช้วงจรจ่ายกระแสคงตัว (Current Mirror) ที่สามารถปรับค่ากระแสได้ โดยจ่ายให้กับไอซีแต่ละตัวเท่าๆกัน และใช้ไอซีมอสเฟตเบอร์ 4007 ต่อเป็นตัวต้านทานอิมพีแดนซ์อินพุตหนึ่งตัว โดยให้ไฟเลี้ยงของวงจรหรือ  $V_{cc}$  เท่ากับ  $\pm 3$  V. โดยใช้วงจรในภาพที่ 67 และแสดงรูปถ่ายของวงจรที่ทดลองดังภาพที่ 68 จากนั้นทำการทดลองหาค่าความถี่เข้าพุทที่ได้ โดยแสดงรูปคลื่นสัญญาณเข้าพุทจากจอภาพของออสซิลอสโคปได้ดังภาพที่ 69 ในหน้าถัดไป

ภาพที่ 67



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งโดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3080E

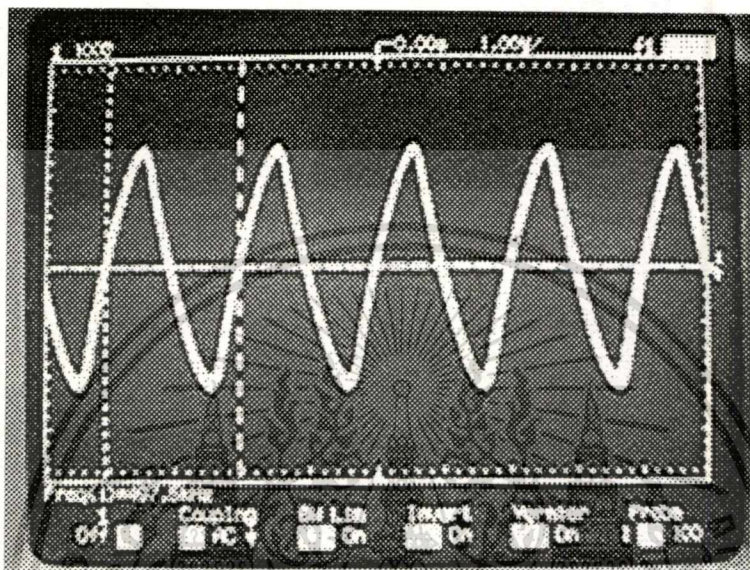
ภาพที่ 68



แสดงภาพวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่ง พร้อมวงจรจ่ายกระแสแสดงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 69

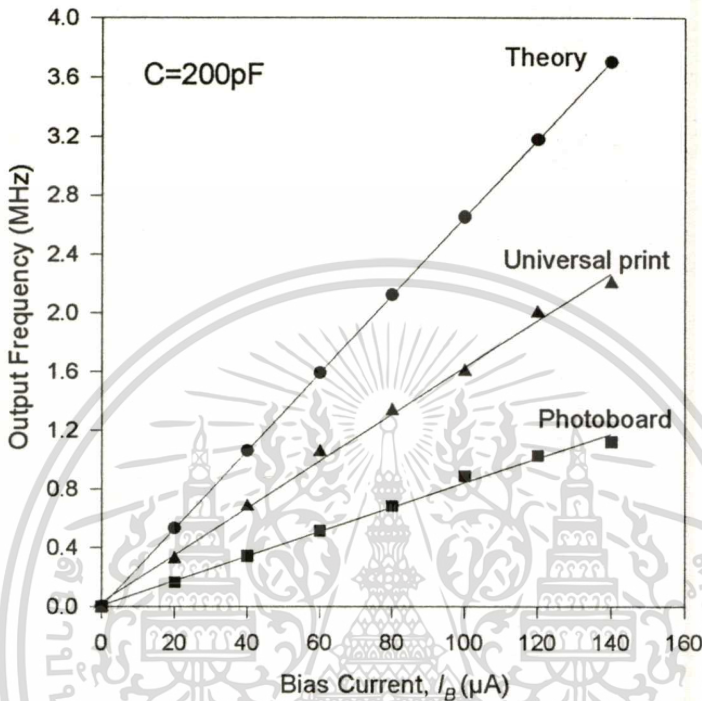


แสดงรูปคลื่นสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งจากจอภาพออสซิลอสโคป

ในภาพที่ 70 เป็นกราฟที่แสดงค่าความถี่เข้าพุทของวงจร โดยการปรับค่ากระแสไบอัสให้มีค่าตั้งแต่  $20\mu\text{A}$  -  $140\mu\text{A}$  โดยให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ  $200\text{ pF}$  และเปรียบเทียบกับค่าความถี่ในทางทฤษฎี โดยค่าความถี่ในทางทฤษฎีของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งนี้หาค่าได้จากสมการ (4-21) และค่าทรานคอนดักแตนซ์หรือ  $g_m$  ได้มาจากสมการ (3-51) ดังนั้นค่าความถี่ในทางทฤษฎีของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งจึงมีค่าเท่ากับ

$$f = \frac{\sqrt{3}(19.23.I_B)}{2\pi C} \quad (6-1)$$

ภาพที่ 70



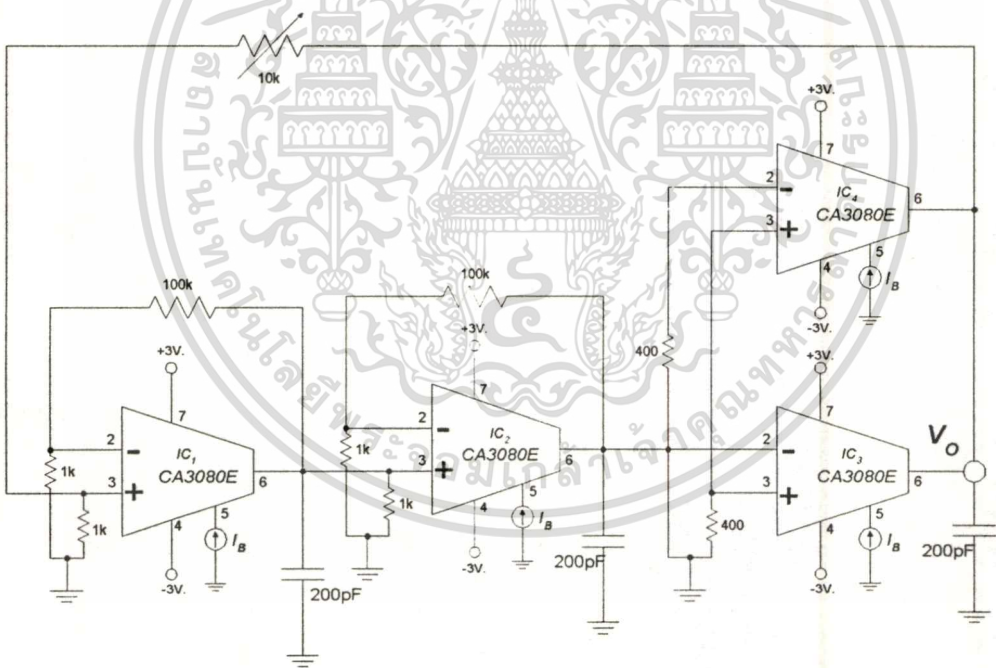
กราฟแสดงค่าความถี่เข้าพุทของวงจรที่หนึ่งเมื่อปรับค่ากระแสไบอัส

จากผลการทดลองพบว่าในช่วงที่กระแสไบอัสมีค่าต่ำๆ (0-20 $\mu\text{A}$ ) ค่าความถี่ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี (ในช่วงความถี่ 300 kHz) แต่เมื่อกระแสไบอัสมีค่าสูงขึ้น ค่าความถี่ที่ได้จะมีความแตกต่างจากค่าทางทฤษฎีไปอย่างมาก เนื่องจากอาจเกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝงในส่วนของโปรโตบอร์ด แต่ค่าความถี่ที่ได้ยังมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นอยู่ และเพื่อยืนยันสมมุติฐานนี้จึงได้ทำการทดลองในตอนที่สอง โดยทำการต่อวงจรลงบนปรินต์เอนกประสงค์ (universal print) โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดลองเหมือนกับการทดลองครั้งแรกทุกประการ ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าความถี่ที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าความถี่ทางทฤษฎีมากกว่าการทดลองในตอนแรก และเมื่อเทียบกับผลการทดลองในภาพที่ 51 ก็จะพบว่าค่าความถี่ที่ได้จากทฤษฎีก็ยังมีค่าสูงกว่าค่าความถี่ที่ได้จากการเลียนแบบโดย Pspice เมื่อค่ากระแสไบอัส  $I_{ss}$  มีค่าสูงขึ้น จึงพอจะกล่าวได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบในบทที่ 4 และจากการต่อวงจรจริงในบทนี้มีความใกล้เคียงกัน

### การทดลองและผลการทดลองของวงจรที่สอง

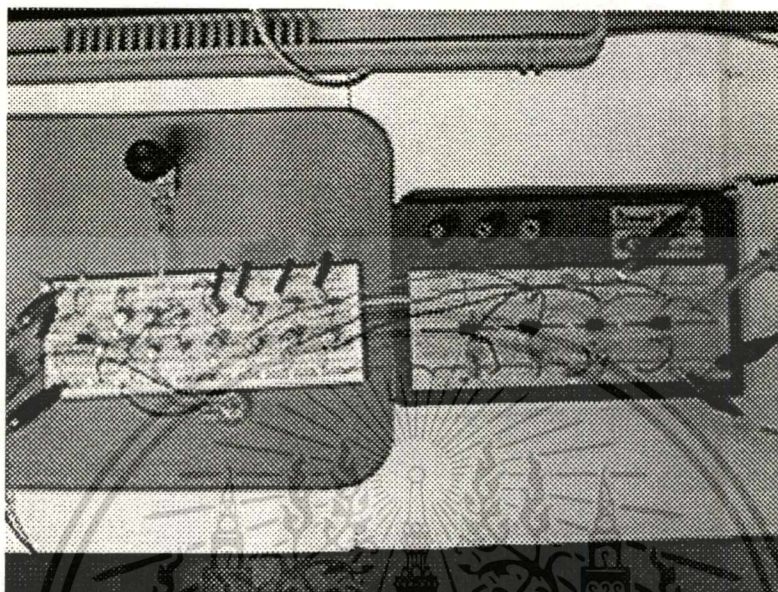
การทดลองต่อวงจรกำเนิดสัญญาณในแบบที่สอง ในตอนแรกได้ต่อวงจรลงในโปรโตบอร์ด เนื่องจากต่อได้รวดเร็วและประหยัดเวลา โดยใช้ไอซี OTA CA3080E ทั้งหมด 4 ตัว โดยไอซีหนึ่งตัวประกอบไปด้วย OTA 1 ตัว และจ่ายกระแสไบอัสให้กับไอซีโดยใช้วงจรจ่ายกระแสคงตัว (Current Mirror) ที่สามารถปรับค่ากระแสได้ โดยจ่ายให้กับไอซีแต่ละตัวเท่าๆกัน โดยให้ไฟเลี้ยงของวงจรหรือ  $V_{cc}$  เท่ากับ  $\pm 3$  V. โดยใช้วงจรในภาพที่ 71 และแสดงรูปถ่ายของวงจรที่ทดลองดังภาพที่ 72 จากนั้นทำการทดลองหาค่าความถี่เอาพุตที่ได้ โดยแสดงรูปคลื่นสัญญาณเอาพุตจากจอภาพของออสซิลอสโคปได้ดังภาพที่ 73

ภาพที่ 71



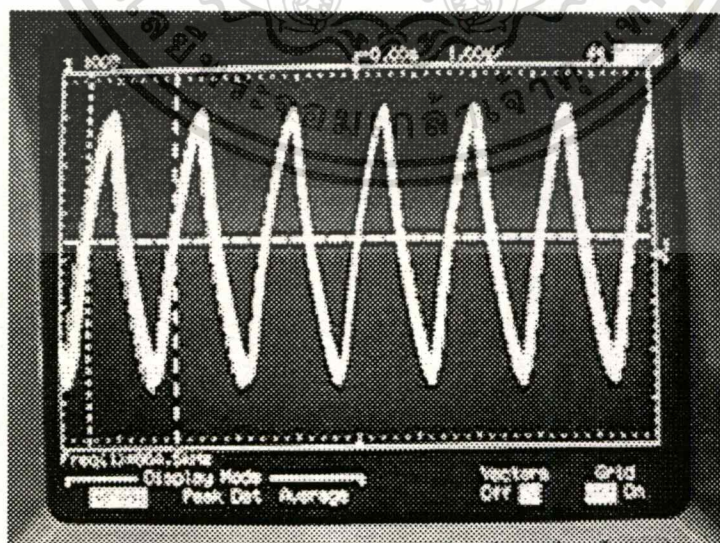
แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สองโดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3080E

ภาพที่ 72



แสดงภาพวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่สอง พร้อมวงจรจ่ายกระแสคงตัว

ภาพที่ 73



แสดงรูปคลื่นสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณที่สองจากจอภาพออสซิลอโคป

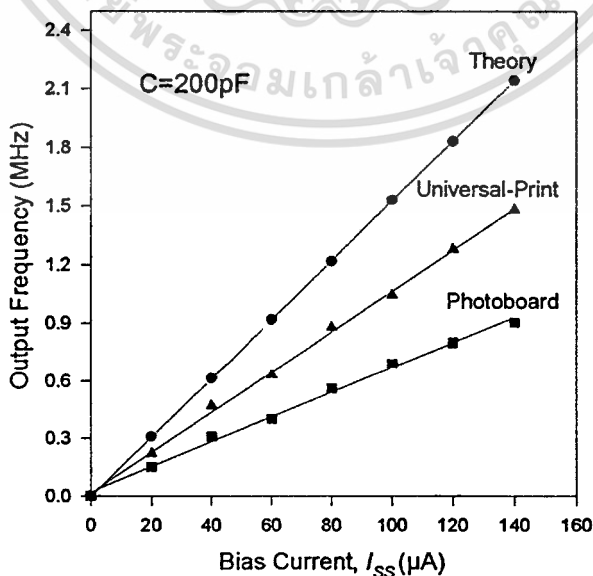
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาพที่ 74 เป็นกราฟที่แสดงค่าความถี่เอาต์พุตของวงจร โดยการปรับค่ากระแสไบอัสให้มีค่าตั้งแต่  $20\mu\text{A}$  -  $140\mu\text{A}$  โดยให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ  $200\text{ pF}$  และเปรียบเทียบกับค่าความถี่ในทางทฤษฎี โดยค่าความถี่ในทางทฤษฎีของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งนี้หาค่าได้จากสมการ (5-6) และค่าทรานคอนดักแตนซ์หรือ  $g_m$  ได้มาจากสมการ (3-51) ดังนั้นค่าความถี่ในทางทฤษฎีของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งจึงมีค่าเท่ากับ

$$f = \frac{(19.23 \cdot I_B)}{2\pi C} \quad (6-2)$$

จากผลการทดลองในภาพที่ 72 พบว่าในช่วงที่กระแสไบอัสมีค่าต่ำๆ ( $0-20\mu\text{A}$ ) ค่าความถี่ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี (ในช่วงความถี่  $300\text{ kHz}$ ) แต่เมื่อกระแสไบอัสมีค่าสูงขึ้น ค่าความถี่ที่ได้จะมีความแตกต่างจากค่าทางทฤษฎีไปอย่างมาก เนื่องจากอาจเกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝงในส่วนของโปรโตบอร์ด แต่ค่าความถี่ที่ได้ยังมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นอยู่ และเพื่อยืนยันสมมุติฐานนี้จึงได้ทำการทดลองในตอนที่สอง โดยทำการต่อวงจรลงบนปริ้นเอนกประสงค์ (universal print) โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดลองเหมือนกับการทดลองคอนแรกทุกประการ ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าความถี่ที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าความถี่ทางทฤษฎีมาก

ภาพที่ 74



กราฟแสดงค่าความถี่เอาต์พุตของวงจรที่สองเมื่อปรับค่ากระแสไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าการทดลองในตอนแรก และเมื่อเทียบกับผลการทดลองในภาพที่ 63 ก็จะพบว่าค่าความถี่ที่ได้จากทฤษฎีก็ยังมีค่า สูงกว่าค่าความถี่ที่ได้จากการเลียนแบบโดย Pspice เมื่อค่ากระแสไบอัส  $I_{B}$  มีค่าสูงขึ้น จึงพอจะกล่าวได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการเลียนแบบในบทที่ 5 และจากการต่อวงจรจริงในบทนี้มีความใกล้เคียงกัน

### บทสรุป

ในบทที่ 6 นี้เป็นการทดลองต่อวงจรกำเนิดสัญญาณที่ได้เสนอหลักการในบทที่ 4 และ 5 โดยในแต่ละวงจรได้แบ่งการต่อวงจรออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการต่อโดยใช้โปรโตบอร์ด และในส่วนที่สองเป็นการต่อโดยใช้ปริ้นเอนกประสงค์ ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าความถี่ที่ได้ยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง เช่นค่าความถี่ที่ได้ยังมีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีอยู่มากในย่านที่ความถี่สูงๆ หรือลักษณะรูปคลื่นที่ได้ยังไม่สวยงามนักเมื่อเทียบกับรูปคลื่นชาวนับริสุทซ์ แต่วงจรทั้งสองนี้ก็สามารถให้ความถี่ไซน์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งจะได้ทำการสรุปผลของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในบทต่อไป

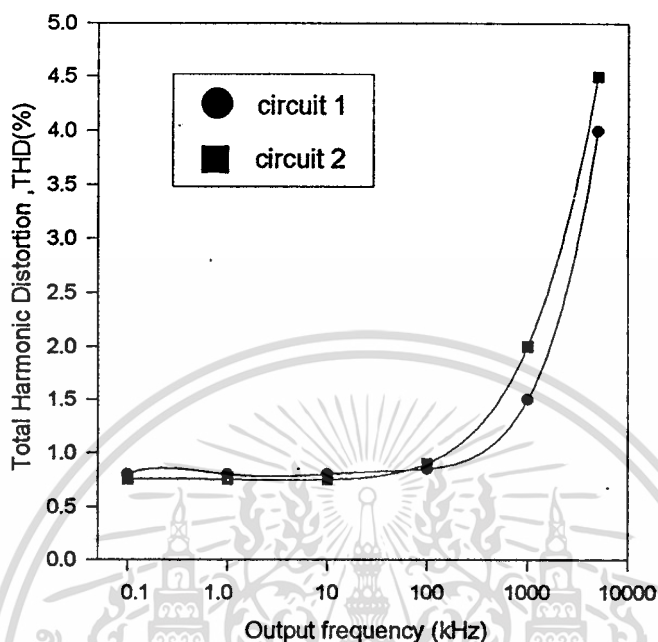
## บทที่ 7

### สรุปผลและแนะแนวทางการพัฒนา

#### สรุปผลการวิจัย

จากหลักการพร้อมกับการทดสอบและการทดลองในบทต่างๆที่ผ่านมา สามารถสรุปได้ว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรซีมอสทรานคอนดักเตอร์ โดยใช้หลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส จำนวนสองวงจร โดยวงจรแรกประกอบไปด้วยวงจรอินทรีเกรเตอร์แบบที่มีการสูญเสีย 3 ชุดนำมาต่อคาสเคดกัน และป้อนกลับด้วยสัญญาณแรงดันที่สร้างมาจากวงจรทรานคอนดักเตอร์ 1 ตัวและมอสเฟต 2 ตัว และวงจรที่สองประกอบไปด้วยวงจรอินทรีเกรเตอร์แบบที่มีการสูญเสียสองวงจร และนำวงจรอินทรีเกรเตอร์แบบที่ไม่มีการสูญเสียอีกหนึ่งวงจรมาต่อคาสเคดกันและใช้หลักการป้อนกลับสัญญาณซึ่งใช้วงจรทรานคอนดักเตอร์ที่มีค่าทรานคอนดักแตนซ์เป็นสองเท่าของค่าทรานคอนดักแตนซ์ปกติ และจากการวิเคราะห์หาค่าความไวซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณภาพของวงจรพบว่าค่าความจุไฟฟ้าและค่าทรานคอนดักแตนซ์ของวงจรไม่มีผลต่อค่าคุณภาพ (Q) ของวงจร ซึ่งวงจรกำเนิดสัญญาณทั้งสองวงจรมีแนวโน้มเป็นแนวทางใหม่ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบวงจรทั้งสองวงจรมีโดยใช้โครงสร้างวงจรทรานคอนดักเตอร์แบบง่ายโดยใช้โปรแกรม Pspice โมเดลที่ใช้เป็นแบบ Worse Case ของ European Silicon Structure (ES2) ซึ่งสรุปได้ว่าวงจรสามารถนำไปใช้งานได้จริงจากผลการทดสอบ และยังมีความเหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่าย โดยไม่มีการใช้ตัวต้านทานเลข และยังสามารถปรับค่าความถี่ได้ง่ายโดยเป็นการปรับทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจรทรานคอนดักเตอร์ โดยกระแสที่ปรับจะอยู่ในช่วง  $40\mu\text{A} - 240\mu\text{A}$  และยังมีความเพี้ยนต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ โดยในภาพที่ 75 เป็นผลการทดลองโดยแสดงกราฟค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิรวม (Total Harmonic Distortion) หรือ THD ของวงจรที่ค่าความถี่ต่างๆที่ค่ากระแสไบอัส  $240\mu\text{A}$ . โดยใช้โปรแกรม Pspice จากกราฟจะพบว่าค่า THD ของวงจรทั้งสองวงจรมีค่าต่ำกว่าหนึ่งเปอร์เซ็นต์ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 100 kHz แต่ในช่วงที่ความถี่สูงกว่านี้ ค่า THD จะเริ่มมีค่าสูงขึ้น

ภาพที่ 75



กราฟแสดงค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบที่หนึ่งและสองจากการทดสอบโดยใช้โปรแกรม Pspice

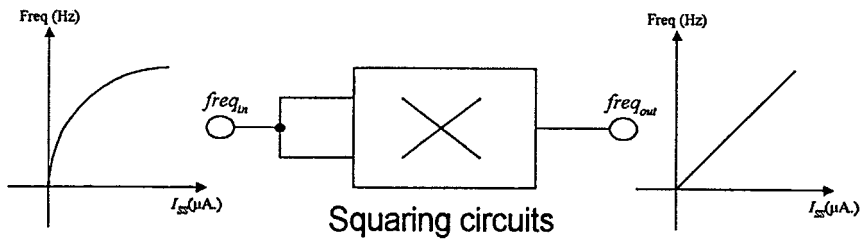
นอกจากนี้ในบทที่ 6 ได้ทำการทดลองวงจรทั้งสองวงจรโดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3080E โดยในตอนแรกทำการต่อวงจรลงบนโปรโตบอร์ด ส่วนในตอนที่สองต่อวงจรลงบนปริ้นเอนกประสงค์ ซึ่งวงจรก็สามารถกำเนิดความถี่ได้เช่นกัน ซึ่งสรุปได้ว่าวงจรสามารถนำไปใช้งานได้จริงจากผลการทดลอง

จากการทดสอบและการทดลองของงานวิจัยชิ้นนี้ได้พบปัญหาในการวิจัยอยู่บ้าง ซึ่งพอจะสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไขได้ดังนี้

1. ในการทดสอบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice และจากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ของค่ากระแสไบอัสกับค่าความถี่เข้าพุทของวงจรทั้งสองวงจรมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง (ไม่เป็นเชิงเส้น) เนื่องจากโครงสร้างของวงจรทรานคอนคัคเตอร์ที่เป็นแบบคูดิฟเฟอร์เรชียลมีค่าสมการค่าคอนคัคแดนซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่แล้ว จึงทำให้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไบอัสกับค่าความถี่เข้าพุทของวงจรไม่เป็นสมการกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ (4-31) และ (5-24) แนวทางแก้ไขอาจทำได้สองวิธี วิธีแรกคือนำวงจรรยกกกำลังสองมาต่ออาศัยคคคกันอีกวงจรหนึ่งเพื่อปรับให้ค่าความถี่ที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นกับกระแสไบอัสของวงจร ดังแสดงไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 76



แสดงแนวทางการปรับปรุงวงจรให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยใช้วงจรยกกำลังสอง

แนวทางการแก้ไขในอีกวิธีหนึ่ง นั่นคือจะต้องปรับปรุงโครงสร้างของวงจรถานคอนคัคเตอร์ให้มีความเป็นเชิงเส้นมากยิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนวงจรใหม่ให้ดีขึ้น ซึ่งอาจทำให้ได้วงจรก่าเนิดสัญญาณที่ดีขึ้นกว่าเดิมก็เป็นได้ [25]

2. ในการทดลองต่อวงจรก่าเนิดสัญญาณ โดยใช้ไอซี OTA ในบทที่ 6 พบว่าผลการทดลองค่าความถี่เข้าพุทที่ได้ไม่ว่าจะเป็นการต่อวงจรถานคอนคัคเตอร์หรือต่อจากปรินเอนกประสงค์ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าที่ควรจะได้อย่างมาก ซึ่งอาจเกิดจากค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่อยู่ในโปรโตบอร์ด ซึ่งจะปรากฏผลเมื่อนำไปใช้ที่ความถี่สูง (ประมาณ 1 MHz) ทำให้ค่าความถี่ที่ได้ต่ำกว่าที่จะได้ หรือเกิดจากคุณภาพของปรินเอนกประสงค์ แต่ก็ยังให้ความถี่สูงขึ้นเล็กน้อย แนวทางแก้ไขอาจจะต้องสร้างเป็นวงจรรวมแบบโมโนลิทิกเพื่อลดค่าความจุไฟฟ้าแฝง

3. ในการสร้างวงจรถานคอนคัคเตอร์โดยใช้วงจรสะท้อนกระแสพบว่า ค่ากระแสเข้าพุทของวงจรถานคอนคัคเตอร์ในแต่ละเข้าพุทมีค่าไม่เท่ากัน (ต่างกันเพียงเล็กน้อย) แต่ทำให้วงจรไม่ผลิตรูปคลื่นสัญญาณออกมาได้ หรือทำให้ได้สัญญาณไซน์ที่ไม่บริสุทธิ์ มีความเพี้ยนสูง ซึ่งอาจเกิดจากทรานซิสเตอร์ที่ใช้สร้างเป็นวงจรถานคอนคัคเตอร์ไม่มีความสมพงษ์กันหรือค่าตัวต้านทานที่มีค่าผิดพลาด โดยแนวทางแก้ไขอาจจะต้องปรับปรุงวงจรถานคอนคัคเตอร์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หรืออาจใช้วงจรถานคอนคัคเตอร์ที่เป็นแบบวงจรรวมไอซี ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดของอุปกรณ์ได้

#### แนวทางการพัฒนา

วงจรก่าเนิดสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรถานคอนคัคเตอร์ยังคงสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกมาก [26] แนวทางที่น่าสนใจคือการปรับปรุงวงจรให้มีความถี่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้วงจรใช้งานได้อย่างกว้างขวางขึ้นจนถึงย่านความถี่สูง หรืออาจปรับปรุงวงจรให้มีความเพี้ยนต่ำลง เมื่อใช้งานในย่านความถี่สูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

## โปรแกรม Pspice ที่ใช้วิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์

Oscillator Circuit by OTA best case type unit-4 (OSC-OTA1.CIR)

```

VDD 20 0 DC 3
VSS 30 0 DC -3
M1 2 1 3 3 NMOS L=5U W=30U
M2 4 4 3 3 NMOS L=5U W=30U
M3 2 2 20 20 PMOS L=5U W=30U
M4 4 2 20 20 PMOS L=5U W=25U
I1 3 30 100U
M5 5 4 6 6 NMOS L=5U W=30U
M6 7 7 6 6 NMOS L=5U W=30U
M7 5 5 20 20 PMOS L=5U W=30U
M8 7 5 20 20 PMOS L=5U W=25U
I2 6 30 100U
M9 8 7 9 9 NMOS L=5U W=30U
M10 10 10 9 9 NMOS L=5U W=30U
M11 8 8 20 20 PMOS L=5U W=30U
M12 10 8 20 20 PMOS L=5U W=25U
I3 9 30 100U
M13 11 0 12 12 NMOS L=5U W=600U
M14 1 10 12 12 NMOS L=5U W=600U
M15 11 11 20 20 PMOS L=5U W=500U
M16 1 11 20 20 PMOS L=5U W=490U
IA 12 30 600U
M17 1 1 30 30 NMOS L=5U W=5U
M18 20 20 1 1 NMOS L=5U W=5U

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C1 4 0 10P

C2 7 0 10P

C3 10 14 10P

VPULSE 14 0 PULSE( 0.2 0 0 0 0.1P )

\*-----ES-2- BEST CASE MODEL-----\*

.MODEL NMOS NMOS LEVEL=2 VTO=+1.5 GAMMA=1.4 LAMBDA=0.01

+MJ=0.5 RSH=25 UO=580 AF=1.2 KF=1E-26 MJSW=0.3 CGBO=0.2N CGSO=0.350N

+CGDO=0.350N CJ=0.3M CJSW=0.5N LD=0.4U TOX=80N

\*-----\*

.MODEL PMOS PMOS LEVEL=2 VTO=-1.2 GAMMA=0.4 LAMBDA=0.01

+MJ=0.5 RSH=90 UO=230 AF=1.2 KF=1E-26 MJSW=0.25 CGBO=0.2N CGSO=0.350N

+CGDO=0.350N CJ=150M CGSW=0.4N LD=0.5U TOX=80N

\*-----\*

.TRAN 0.05N 2U 0 10N

\*.FOUR 3.6001MEG V(10)

.PROBE

.END

หมายเหตุ กรณีที่เกิด Underdamped Oscillation กำหนดให้  $I_1 = I_2 = I_3 = 100\mu\text{A}$ . และ  
 $I_A = 200\mu\text{A}$

กรณีที่เกิด Overdamped Oscillation กำหนดให้  $I_1 = I_2 = I_3 = 100\mu\text{A}$ . และ  
 $I_A = 1000\mu\text{A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Oscillator Circuit by OTA best case type unit-5 (OSC-OTA2.CIR)

VDD 20 0 DC 3

VSS 30 0 DC -3

M1 2 1 4 4 NMOS L=5U W=30U

M2 3 3 4 4 NMOS L=5U W=30U

M3 2 2 20 20 PMOS L=5U W=30U

M4 3 2 20 20 PMOS L=5U W=25U

I1 4 30 100U

M5 5 3 6 6 NMOS L=5U W=30U

M6 7 7 6 6 NMOS L=5U W=30U

M7 5 5 20 20 PMOS L=5U W=30U

M8 7 5 20 20 PMOS L=5U W=25U

I2 6 30 100U

M9 1 7 8 8 NMOS L=5U W=50U

M10 9 0 8 8 NMOS L=5U W=50U

M11 1 9 20 20 PMOS L=5U W=25U

M12 9 9 20 20 PMOS L=5U W=30U

I3 8 30 100U

M13 1 7 10 10 NMOS L=5U W=50U

M14 11 0 10 10 NMOS L=5U W=50U

M15 1 11 20 20 PMOS L=5U W=25U

M16 11 11 20 20 PMOS L=5U W=30U

I4 10 30 100U

C1 1 100 10P

C2 3 0 10P

C3 7 0 10P

VPULSE 100 0 PULSE(2.0 0 0 0 0.1P)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*-----ES-2- BEST CASE MODEL-----\*

.MODEL NMOS NMOS LEVEL=2 VTO=+1.5 GAMMA=1.4 LAMBDA=0.01  
 +MJ=0.5 RSH=25 UO=580 AF=1.2 KF=1E-26 MJSW=0.3 CGBO=0.2N CGSO=0.350N  
 +CGDO=0.350N CJ=0.3M CJSW=0.5N LD=0.4U TOX=80N

\*-----\*

.MODEL PMOS PMOS LEVEL=2 VTO=-1.2 GAMMA=0.4 LAMBDA=0.01  
 +MJ=0.5 RSH=90 UO=230 AF=1.2 KF=1E-26 MJSW=0.25 CGBO=0.2N CGSO=0.350N  
 +CGDO=0.350N CJ=150M CGSW=0.4N LD=0.5U TOX=80N

\*-----\*

.IC V(10)=0

.TRAN 1N 1U 0 10N

.PROBE

.END



**หมายเหตุ** กรณีที่เกิด Underdamped Oscillation กำหนดให้  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , และ  $I_4$  มีค่ากระแส  
 ไม่เท่ากัน

กรณีที่เกิด Overdamped Oscillation กำหนดให้  $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 1000\mu\text{A}$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] A. Grebene, "Monolithic waveform generation," *IEEE Spectrum*, pp. 34-40, April, 1972.
- [2] K. Dejhan, F. Cheevasuvit and S. Sdangrit, "A bipolar simple integrable, linear, wide variable range sinusoidal oscillator," *Proceedings, Int. Conference on ROVPIA '94*, Universiti Sains Malaysia, pp.616-622, 1994.
- [3] M.T. Abuelmaatti and R.H. Almaskati, "A new OTA-based active-C oscillator," *Int. J. Electronic.*, Vol63., pp.331-334, 1987.
- [4] D. O. Pererson, and K. Mayaram, "Analog Integrated Circuit for Communication," Kluwer Academic Publisher, 1991.
- [5] L. P. Huelsman, "Active and Passive Analog Filter Design : An Introduction," McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [6] M.E. Van Valkenburg, "Analog Filter Design," Holt, Rinehart and Winston, 1982.
- [7] P.R. Gray and R.G. Meyer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits," 2nd Edition, John Wiley & Sons, Singapore 1984.
- [8] J.S. Martinez, M. Steyaert and W. Sansen, "High-Performance CMOS Continuous-time Filters," Kluwer Academic Publisher, 1993.
- [9] R. L.Geiger and E. Sanchez-Sinencio, "Active filter design using Operational Transconductance Amplifier: A Tutorial," *IEEE Circuit and Device Magazine*, Vol.1, pp.20-32, March 1985.
- [10] R. Mauro, "Engineering Electronics : a Practical Approach," Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [11] J.E. Kardontchik, "Introduction to the Design of Transconductance-Capacitor Filter," Kluwer Academic Publisher, 1992.
- [12] P.E. Allen and D.R. Holberg, "CMOS Analog Circuit Design," Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [13] R.L. Geiger, P.E. Allen and N.R. Strader, "VLSI Design Techniques for Analog and Digital Circuits," McGraw-Hill, Inc., 1990.
- [14] C. Toumazou, F.J. Lidgely and D.G. Haigh, "Analogue IC Design : the current mode approach," Peter Peregrinus Ltd. 1990.

- [15] R.A Gayakwad, "Op-Amps and Linear Integrated Circuits," Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [16] R. J. Traister, "Operational Amplifier Circuit Manual," Academic Press, Inc., 1989.
- [17] R. L. Geiger, E. S. Sinencio and H.N. Lozno, "Generation of Continuous-Time two Integrator loop OTA filter structure," *IEEE Trans. Circuit Syst.*, Vol.35, pp.936-946., Aug 1988.
- [18] M.H. Malvar, "Electronically Controlled Active Filter with Transconductance Amplifier," *IEEE Trans. Circuit Syst.*, Vol.CAS-29, pp.336-346.,1982.
- [19] R.H. Schaumann, M.S. Ghauri and K.R. Laker, "Design of Analog Filter : passive active RC, and switched capacitor," Prentice-Hall, Inc., 1990.
- [20] Operational Amplifier Linear Databook, Harris Inc., 1995.
- [21] J.J. Chen, C.C. Chen, H.W. Tsao and S.I. Liu, "Current-mode oscillator using single current follower," *Electron Lett.*, Vol.27, pp.2056-2059., Oct. 1991.
- [22] A.R. Vazquez, B.L. Barranco, J.L. Huertas and E.Sanchez-Sinencio, "On the design of voltage-controlled sinusoidal oscillators using OTA's," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, Vol.37, pp. 198-211., Feb.1990.
- [23] Z. Wang, "2-MOSFET Transistors with extremely low distortion for output reaching supply voltage," *Electron Lett.*, Vol.26, pp.951-951., June.1990.
- [24] European Silicon Structure, "2  $\mu$  CMOS Design Rules," Sophia Antipolis, France, 1988.
- [25] H. Kuntman, "Simple and accurate nonlinear OTA macromodel for simulation of CMOS OTA-C active filters," *Electron Lett.*, Vol.77, pp.993-1006., Jan. 1994.
- [26] D.R. Bhaskar, M.P. Tripathi and R. Senani, "A class of three-OTA-two-capacitor with non-interacting controls," *Electron Lett.*, Vol.74, pp.459-463., Oct.1993.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นายปิติกันต์ รักราชการ  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 27 สิงหาคม พ.ศ. 2514  
 ที่อยู่นักศึกษาที่ติดต่อดี เลขที่ 781 ถนนอรุณอมรินทร์ แขวงศิริราช  
 เขตบางกอกน้อย กรุงเทพฯ 10700  
 วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถานที่สำเร็จการศึกษา มหาวิทยาลัยสยาม  
 ปีการศึกษา 2537

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ :

เรื่อง “ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ชนิดเลื่อนเฟสแบบใหม่ปรับความถี่ได้โดยวิธี  
 ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้วงจรซิมอสทรานคอนดักเตอร์ ” วิศวกรรมลาดกระบัง, หน้า 72-77, ปีที่  
 13 ฉบับที่ 1 กรกฎาคม 2539

เรื่อง “ การนำ FAX และระบบโทรศัพท์มาใช้งานร่วมกับโครงข่ายวิทยุมือถือ  
 ย่าน UHF ” วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง, หน้า 1-7, ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 กันยายน 2538