

การปรับปรุงวงจรวัดความถี่และวงจรรยกกำลังที่ใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณ

IMPROVEMENT OF FREQUENCY MEASUREMENT AND POWER LAW
CIRCUITS BASED ON SAMPLING TECHNIQUES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-456-7

การปรับปรุงวงจรวัดความถี่และวงจรรยกกำลังที่ใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณ

IMPROVEMENT OF FREQUENCY MEASUREMENT AND POWER LAW
CIRCUITS BASED ON SAMPLING TECHNIQUES



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 41513
วัน, เดือน, ปี..... 19 ก.พ. 2545

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2544

ISBN 974-648-456-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IMPROVEMENT OF FREQUENCY MEASUREMENT AND POWER LAW
CIRCUITS BASED ON SAMPLING TECHNIQUES**



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

2001

ISBN 974-648-456-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงวงจรวัดความถี่และวงจรถักกำลังที่ใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณ
IMPROVEMENT OF FREQUENCY MEASUREMENT AND POWER
LAW CIRCUITS BASED ON SAMPLING TECHNIQUES

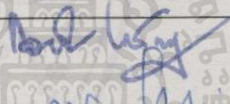
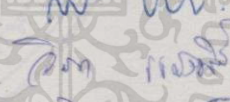
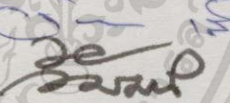
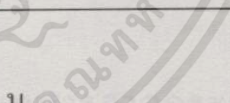
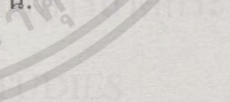
ชื่อนักศึกษา นางวิภาวัลย์ นาคทรัพย์

รหัสประจำตัว 38621221

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กอบชัย	เดชหาญ	
รศ.สมยศ	จุมณะปิยะ	
ผศ.วิภา	แสงพิสิทธิ์	
ผศ.ดร.จริยา	เลิศจรัสอร่ามดี	
ศ.ดร.วิวัฒน์	กิรานนท์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 24 ตุลาคม 2544 เวลา 13.30-15.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-402)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว


(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 16 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2544

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงวงจรวัดความถี่และวงจรยกกำลังที่ใช้วิธีการสุ่ม
ค่าสัญญาณ

นักศึกษา

นางวิภาวัลย์ นาคทรัพย์

รหัสประจำตัว

38621221

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2544

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการเสนอเกี่ยวกับการนำเทคนิคการสุ่มค่าสัญญาณมาใช้ในการออกแบบเพื่อปรับปรุงวงจรวัดความถี่และวงจรยกกำลัง โดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการทำงาน วงจรวัดความถี่ที่นำเสนอมีความเป็นเชิงเส้นในการเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน มีผลตอบสนองที่รวดเร็วสามารถระบุค่าเอาต์พุตได้ตั้งแต่รอบแรกของการทำงานและเอาต์พุตที่ได้เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ไม่มีการกระเพื่อม ข้อดีอีกประการหนึ่งของวงจรวัดความถี่คือสามารถนำวงจรไปสร้างในรูปแบบของสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่สมบูรณ์ได้ ส่วนวงจรยกกำลังสามารถกำเนิดสัญญาณนาฬิกาได้เองเพื่อใช้ในการรีเซตวงจรอินทิเกรเตอร์ ได้มีการแสดงตัวอย่างการออกแบบและทดลองวงจรหลายลักษณะเช่น วงจรยกกำลังสอง วงจรยกกำลังสาม วงจรถอดรอกที่สอง วงจรถอดรอกที่สาม และวงจรคูณและหารสัญญาณ จากผลการทดลองจะให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าสูง ซึ่งยืนยันได้จากการต่อวงจรจริงในทางปฏิบัติ

Thesis Title	Improvement of Frequency Measurement and Power Law Circuits Based on Sampling Techniques
Student	Ms.Wipawan Naksub
Student ID.	38621221
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Professor Dr. Wiwat Kiranon

ABSTRACT

This thesis presents a sampling techniques used for frequency measurement and power law circuits by using integrator circuits as a main device. The proposed frequency measurement offers numerous favorable characteristics as the resulting circuit linearly converts a signal frequency into a smooth DC output with remarkably rapid response. The method can also be easily modified in a completed switched-capacitor version. For power law circuits, various applications of the circuits are demonstrated; some examples are squarer, cuber, squarer-rooter, 3rd-rooter and multiplier/divider. The advantages are that the method gives high output and does not use any external clock signal. The thesis shows the results of the experiments to verify the theory.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยการอบรมสั่งสอนและเกี่ยวเนื่องจากศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์
กีรานนท์ ซึ่งข้าพเจ้าซาบซึ้งเป็นอย่างมากและดีใจมากที่ได้มีโอกาสเข้ามาเป็นลูกศิษย์ซึ่งทำให้ได้
ความรู้เพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นทางโลกหรือทางธรรมจึงกราบขอบคุณมา ณ ที่นี้ ขอกราบขอบคุณ
ถึงคุณพ่อประสิทธิ์-คุณแม่วิไล สุพรรณโมกษ์ และขอขอบคุณคมจักร นาคทรัพย์และลูกๆ ที่คอย
ให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณ รศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน ผศ.ดร. จริยา เลิศจรีสอร่วมดี
ผศ.วิภา แสงพิสิทธิ์ และขอขอบคุณอาจารย์วีจิตรา เพ็ชรกิจ อาจารย์มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์วินัย สิตารวม อาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยแนะนำแก้ไขบทความและ
วิทยานิพนธ์ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ขอขอบคุณน้องๆทุกคนที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ซึ่งคอยให้
กำลังใจ ความรัก ความอบอุ่นตลอดระยะเวลาที่เรียนด้วยกัน ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรม
ไฟฟ้าและภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยามที่ให้อนุเคราะห์เครื่อง
มือวัดต่างๆและสุดท้ายนี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

วิภาวัลย์ นาคทรัพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 การวัดความถี่และวงจรถัดที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 วงจร โมโนสเตเบิล.....	3
2.3 การวัดความถี่รูปแบบเดิม.....	6
2.3.1 หลักการป้อนประจุ.....	6
2.3.2 การวัดความถี่โดยใช้เทคนิคการสุ่ม.....	9
บทที่ 3 วงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	14
3.1 กล่าวนำ.....	14
3.2 ทฤษฎีการสุ่มค่าสัญญาณ.....	14
3.3 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ.....	15
3.4 อนุภาคสวิตช์.....	18
3.5 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์เบื้องต้น.....	21
3.6 วงจรอินทิเกรเตอร์.....	27
3.6.1 วงจรมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์.....	27
3.6.2 วงจรดีโอบอินทิเกรเตอร์.....	29

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.7 วงจรอาร์ซี.....	32
3.8 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	34
3.8.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบรูปเปิด.....	34
3.8.1.1 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์แบบไม่กลับเฟส.....	35
3.8.1.2 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์แบบกลับเฟส.....	36
3.8.1.3 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบไม่กลับเฟสที่แรงดันอ้างอิง มีค่าไม่เป็นศูนย์.....	37
3.8.1.4 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบกลับเฟสที่แรงดันอ้างอิง มีค่าไม่เป็นศูนย์.....	38
3.8.2 วงจรเปรียบเทียบแรงดันที่ป้อนกลับแบบบวก.....	39
3.8.2.1 วงจรขมิตท์ทริกเกอร์แบบกลับเฟส.....	40
3.8.2.2 วงจรขมิตท์ทริกเกอร์แบบไม่กลับเฟส.....	41
บทที่ 4 วงจรวัดความถี่ที่นำเสนอ.....	43
4.1 กล่าวนำ.....	43
4.2 หลักการ.....	43
4.3 การออกแบบวงจร.....	47
4.3.1 วงจรวัดความถี่ที่ใช้ดีโอบอินทิเกรเตอร์.....	47
4.3.2 วงจรวัดความถี่ที่ใช้มัลติเพลอร์อินทิเกรเตอร์.....	49
4.3.3 วงจรวัดความถี่ที่ใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ทั้งสองแบบทำงานร่วมกัน.....	51
4.4 การทดลองและสรุปผลลัพธ์.....	53
4.5 สรุป.....	58
บทที่ 5 วงจรยกกำลัง.....	60
5.1 กล่าวนำ.....	60
5.2 หลักการ.....	63

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2.1 วงจรยกกำลังรูปแบบที่ 1	63
5.2.2 วงจรยกกำลังรูปแบบที่ 2	68
5.3 การออกแบบวงจร.....	72
5.3.1 วงจรยกกำลังสอง.....	72
5.3.2 วงจรยกกำลังสาม.....	74
5.3.3 วงจรถอดรากที่สอง.....	75
5.3.4 วงจรถอดรากที่สาม.....	77
5.3.5 วงจรคูณและหารสัญญาณ.....	78
5.4 การทดลองและสรุปผลลัพธ์.....	80
5.3.1 วงจรยกกำลังสอง.....	80
5.3.2 วงจรยกกำลังสาม.....	82
5.3.3 วงจรถอดรากที่สอง.....	84
5.3.4 วงจรถอดรากที่สาม.....	86
5.3.5 วงจรคูณและหารสัญญาณ.....	88
5.5 สรุป.....	91
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	114

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.3 วงจรโมโนสเตเบิล.....	3
2.4 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆของวงจร โมโนสเตเบิล.....	4
2.5 วงจรวัดความถี่ที่ใช้หลักการป้อนประจุแบบพื้นฐาน.....	6
2.6 วงจรวัดความถี่ที่ใช้หลักการป้อนประจุโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์แบบแอกทิฟ.....	7
2.5 วงจรวัดความถี่ที่ใช้หลักการป้อนประจุโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์แบบแอกทิฟที่มีการใช้วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ.....	8
2.6 วงจรวัดความถี่ที่นำเสนอโดย J.S. Reynolds.....	9
2.7 วงจรวัดความถี่ที่นำเสนอโดย D.H.Shin และ G.H.Cho.....	10
2.8 แผนผังการทำงานของวงจรวัดความถี่ที่เสนอโดย C.A. Karybakas และ T.L. Laopulos(ค.ศ.1989).....	11
2.9 วงจรวัดคาบเวลาที่เสนอโดย C.A. Karybakas และ T.L. Laopulos (ค.ศ.1989).....	12
2.10 วงจรวัดความถี่ที่เสนอโดย C.A. Karybakas และ T.L. Laopulos (ค.ศ.1990).....	12
3.1 การสุ่มตัวอย่างแบบอนุกรม.....	14
3.2 แผนผังของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ.....	16
3.3 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ.....	17
3.4 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณในทางปฏิบัติ.....	17
3.5 สัญลักษณ์ของสวิตช์.....	18
3.6 สวิตช์ในอุดมคติและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V).....	19
3.7 โครงสร้างภายในของไอซีเบอร์ 4066.....	20
3.8 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์พื้นฐาน.....	21
3.9 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ในทางปฏิบัติ.....	23
3.10 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์อินทิเกรเตอร์.....	24
3.11 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่ใช้สวิตช์เป็นคู่เพื่อแก้ปัญหาเรื่องค่าตัวเก็บประจุแฝง.....	25
3.12 วงจรสมมูลย์ของวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์อินทิเกรเตอร์โดยลดผลของค่าตัวเก็บประจุแฝง.....	26
3.13 วงจรมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์.....	27
3.14 วงจรมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์ที่ต่อสวิตช์เข้าไปในวงจร.....	28
3.15 รูปคลื่นสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรตามรูปที่ 3.14.....	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 วงจรดีโอบอินทิเกรเตอร์.....	29
3.17 วงจรดีโอบอินทิเกรเตอร์ที่ต่อสวิตช์เข้าในวงจร.....	31
3.18 รูปคลื่นสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรตามรูปที่ 3.17	32
3.19 วงจรอาร์ชี.....	32
3.20 ออปแอมป์ทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	34
3.21 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์แบบไม่กลับเฟส.....	36
3.22 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์แบบกลับเฟส.....	37
3.23 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบไม่กลับเฟสที่แรงดันอ้างอิงมีค่าไม่เป็นศูนย์.....	37
3.24 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบกลับเฟสที่แรงดันอ้างอิงมีค่าไม่เป็นศูนย์.....	38
3.25 วงจรเปรียบเทียบแรงดันที่มีอินพุตประกอบด้วยสัญญาณรบกวน.....	39
3.26 วงจรซมิตท์ทริกเกอร์แบบกลับเฟส.....	40
3.27 วงจรซมิตท์ทริกเกอร์แบบไม่กลับเฟส.....	41
4.1 แผนผังของวงจรวัดความถี่.....	43
4.2 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆของแผนผังตามรูปที่ 4.1.....	44
4.3 วงจรวัดความถี่ที่ใช้ดีโอบอินทิเกรเตอร์.....	47
4.4 วงจรวัดความถี่ที่ใช้มัลติเพล็กซ์อินทิเกรเตอร์.....	49
4.5 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆของวงจรวัดความถี่ตามรูปที่ 4.4.....	49
4.6 วงจรวัดความถี่ที่ใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ทั้งสองแบบทำงานร่วมกัน.....	51
4.7 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆของวงจรวัดความถี่ตามรูปที่ 4.6.....	51
4.8 วงจรวัดความถี่ที่ใช้ในการทดลอง.....	53
4.9 ผลการทดลองที่วัดตามจุดที่สำคัญของวงจรวัดความถี่.....	55
4.10 ผลการทดลองของวงจรวัดความถี่เมื่อมีการเปลี่ยนความถี่อินพุต.....	56
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุตเมื่อ $V_{r2} = 0.2 \text{ V}, 0.3 \text{ V}$ และ 0.4 V	56
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุตเมื่อ $V_{r1} = 2.5 \text{ V}, 4.0 \text{ V}$ และ 4.5 V	57
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุตเมื่อ $V_{r3} = 1.5 \text{ V}, 2.0 \text{ V}$ และ 2.5 V	57
4.14 วงจรวัดความถี่ที่เขียนแทนด้วยวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์.....	59
5.1 วงจรยกกำลังที่ใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอกมาวีเซต.....	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 วงจรยกกำลังรูปแบบที่ 1	63
5.3 ตัวอย่างรูปคลื่นตามจุดต่างๆของวงจรยกกำลัง.....	64
5.4 วงจรยกกำลังในรูปแบบที่ 2.....	69
5.5 วงจรยกกำลังสองที่ใช้ดีโอบอินทิเกรเตอร์.....	73
5.6 วงจรยกกำลังสามที่ใช้ดีโอบอินทิเกรเตอร์.....	74
5.7 วงจรลดครากที่สองที่ใช้ดีโอบอินทิเกรเตอร์.....	76
5.8 วงจรลดครากที่สามที่ใช้ดีโอบอินทิเกรเตอร์.....	77
5.9 วงจรคูณและหารสัญญาณที่ใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ทั้งสองแบบทำงานร่วมกัน.....	79
5.10 วงจรยกกำลังสองที่ใช้ในการทดลอง.....	80
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอินพุต V_i ของวงจรยกกำลังสอง เมื่อ $V_x = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์.....	81
5.12 ผลการทดลองของวงจรยกกำลังสองเมื่ออินพุต V_i เป็นสัญญาณฟันเลื่อยและเอาต์พุต	82
5.13 วงจรยกกำลังสามที่ใช้ในการทดลอง.....	82
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอินพุต V_i ของวงจรยกกำลังสาม เมื่อ $V_x = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์.....	83
5.15 ผลการทดลองของวงจรยกกำลังสามเมื่ออินพุต V_i เป็นสัญญาณฟันเลื่อยและเอาต์พุต	84
5.16 วงจรลดครากที่สองที่ใช้ในการทดลอง.....	84
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอินพุต V_i ของวงจรลดครากที่สอง เมื่อ $V_x = 3.0, 3.5, 4.0$ และ 4.5 โวลต์.....	85
5.18 ผลการทดลองของวงจรลดครากที่สองเมื่ออินพุต V_i เป็นสัญญาณฟันเลื่อยและเอาต์พุต.....	85
5.19 วงจรลดครากที่สามที่ใช้ในการทดลอง.....	86
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอินพุต V_i ของวงจรลดครากที่สาม เมื่อ $V_x = 3.0, 3.5, 4.0$ และ 4.5 โวลต์.....	87
5.21 ผลการทดลองของวงจรลดครากที่สามเมื่ออินพุต V_i เป็นสัญญาณฟันเลื่อยและเอาต์พุต....	87
5.22 วงจรคูณและหารสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง.....	88
5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอ้างอิง V_i ของวงจรคูณสัญญาณ เมื่อ $V_y = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์ โดยที่ $V_x = 1$ โวลต์.....	89

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 ผลการทดลองของวงจรถูกสัญญาณเมื่ออินพุต V_Y และ V_Z เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม และเอาต์พุต.....	89
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอ้างอิง V_X ของวงจรถูกสัญญาณ เมื่อ $V_Y = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์ โดยที่ $V_Z = -1$ โวลต์.....	90
5.26 ผลการทดลองของวงจรรหารสัญญาณ เมื่ออินพุต V_X เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม และเอาต์พุต.....	91



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการปรับปรุงวงจรวัดความถี่และวงจรถักกำลังให้สามารถทำงานได้ดีขึ้น โดยรายละเอียดของการปรับปรุงแต่ละวงจรจะได้กล่าวถึงตามลำดับดังนี้

วงจรวัดความถี่หรือวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน (frequency-to-voltage converter : F/V) เป็นวงจรที่ให้แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของสัญญาณอินพุตนั้นพบว่าการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางเป็นต้นว่าในระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ระบบการวัดต่างๆ ระบบควบคุมกำลัง เป็นต้น [1-9] โดยคุณสมบัติพื้นฐานของวงจรวัดความถี่ที่ดีคือให้แรงดันเอาต์พุตเป็นไฟตรงที่ราบเรียบและมีความเป็นเชิงเส้นกับความถี่ของสัญญาณอินพุตในย่านความถี่ที่กว้างรวมทั้งให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาในการสร้างวงจรวัดความถี่มีหลักการที่นิยมนำมาใช้ด้วยกัน 2 วิธีคือ วิธีเรกอสแทรกการอัดและขยายประจุด้วยระดับแรงดันที่มีความถี่ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณอินพุต ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อว่า การปั๊มประจุ (charge-pumping method) [1] ในทางปฏิบัติถึงแม้ว่าวงจรวัดความถี่ที่สร้างด้วยวิธีนี้จะสามารถใช้งานในย่านความถี่ที่กว้าง แต่ช่วงความเป็นเชิงเส้นของเอาต์พุตกับความถี่ของสัญญาณอินพุตค่อนข้างน้อยและมีการกระเพื่อมสูง นอกจากนี้ยังให้ผลตอบสนองที่ช้า อย่างไรก็ตามสามารถลดปัญหาเหล่านี้ได้โดยใช้เทคนิคการสุ่มสัญญาณ แต่กระนั้นจะต้องใช้งานในย่านความถี่ที่สูงกว่า 1 kHz ขึ้นไป และวงจรยังมีความซับซ้อนพอสมควรด้วย [2] ส่วนวิธีที่สองทำการวัดความถี่โดยใช้เทคนิคการสุ่มที่แตกต่างกัน [3-7] ซึ่งวงจรวัดความถี่แบบนี้มีข้อดีคือให้แรงดันเอาต์พุตเป็นเชิงเส้นกับความถี่ของสัญญาณอินพุตและมีการกระเพื่อมต่ำ นอกจากนี้ยังมีผลตอบสนองที่ค่อนข้างเร็วแต่มีข้อจำกัดคือมีย่านความถี่การใช้งานค่อนข้างแคบและวงจรยังค่อนข้างความซับซ้อน ดังนั้นหากสามารถลดข้อด้อยต่างๆดังกล่าวข้างต้นลงได้ การสร้างวงจรวัดความถี่จะมีความน่าสนใจยิ่งขึ้น

ส่วนวงจรถักกำลังเป็นวงจรที่มีความสำคัญในการประมวลผลสัญญาณทางอนาล็อกซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายสาขาเช่นสาขาอิเล็กทรอนิกส์ สาขาเครื่องมือวัด และสาขาโทรคมนาคม เป็นต้น [10-16] ที่ผ่านมามีผู้คิดค้นและสร้างวงจรถักกำลังขึ้นมาหลายรูปแบบคือรูปแบบแรกสร้างขึ้นโดยอาศัยวงจรคูณสัญญาณ [10] ข้อเสียคือมีความยุ่งยากในการปรับแต่งเพื่อหาจุดทำงานที่เหมาะสมของวงจรเนื่องจากผลของความไม่เป็นอุดมคติของวงจรคูณสัญญาณ [11] รูปแบบที่สองอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานสคอนดักแตนซ์ g_m กับค่ากระแสไบอัส I_o ของ OTA [12] และในรูปแบบที่สามอาศัยคุณสมบัติของทรานสลิเนียร์ [13,14] ข้อดีของวงจรในรูปแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สองและรูปแบบที่สามคือสามารถที่จะนำไปออกแบบเป็นวงจรต่างๆได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ภายในวงจรมักขึ้นกับอุณหภูมิทำให้เกิดผลเสียเวลาอุณหภูมิไม่คงที่ ส่วนรูปแบบที่สี่เป็นวงจรยกกำลังที่อาศัยเทคนิคการสุ่มค่าสัญญาณ [15] ถึงแม้ว่าวงจรจะมีข้อดีที่ให้เอาต์พุตได้สูง แต่วงจรที่ได้เสนอไว้นั้นต้องอาศัยสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกมาช่วยเซตวงจรในแต่ละรอบของการทำงาน จึงทำให้ขาดความสะดวกเมื่อนำวงจรไปใช้งาน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวงจรยกกำลังที่ใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณโดยปรับปรุงวงจรเดิม [15] ให้สามารถกำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายในวงจรได้ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

จากข้อดีต่างๆของวงจรวัดความถี่ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.1 วิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาและวิจัยการสร้างวงจรวัดความถี่โดยใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณที่มีแรงดันเป็นไฟตรงซึ่งไม่มีการกระเพื่อมและให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วโดยวงจรมีความเรียบง่ายไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณในการสร้างวงจรยกกำลังโดยไม่ต้องมีวงจรสัญญาณนาฬิกาเหมือนเดิมอีกด้วย

1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายในการนำเสนอการปรับปรุงวงจรวัดความถี่และวงจรยกกำลังที่ใช้เทคนิคการสุ่มค่าสัญญาณ โดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการออกแบบวงจร สำหรับวงจรวัดความถี่นั้นได้นำวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์มาใช้ในการควบคุมจังหวะการทำงานของวงจร จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยได้หลีกเลี่ยงการใช้วงจรโมโนสเตเบิล ส่วนวงจรยกกำลังนั้นได้ปรับปรุงการออกแบบวงจรให้กำเนิดสัญญาณนาฬิกาได้เองโดยใช้วงจรอาร์ชีทำงานร่วมกับวงจรมิกซ์ทริกเกอร์เพื่อใช้ในการรีเซตวงจรอินทิเกรเตอร์ ซึ่งเป็นการสะดวกในการนำไปใช้งาน

บทที่ 2

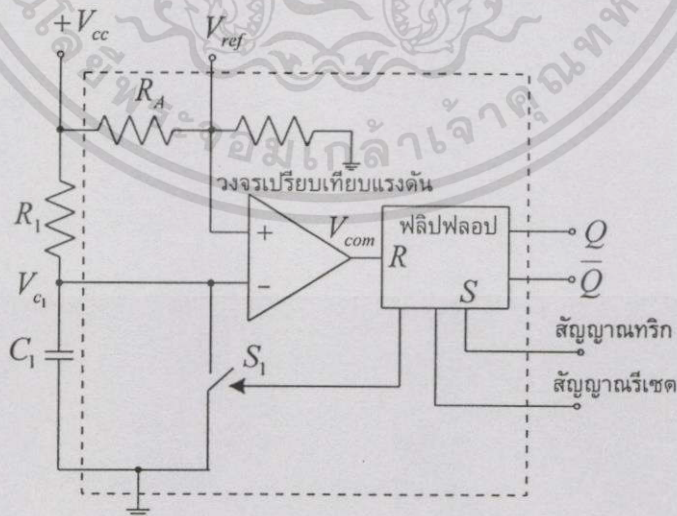
การวัดความถี่และวงจรที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นเพื่อที่จะทำการศึกษาและวิจัยเรื่องวงจรวัดความถี่ ในบทนี้จึงขอกล่าวถึงหลักการเดิมของการการความถี่และวงจรที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งชี้ให้เห็นข้อดีและข้อเสียของวิธีการเหล่านี้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนางจรวัดความถี่ ซึ่งจะได้นำเสนอในบทต่อไป และเนื่องจากวงจรวัดความถี่ที่จะกล่าวถึงนี้มักจะใช้วงจร โมโนสเตเบิลเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงวงจร โมโนสเตเบิลก่อนเพื่อให้ง่ายในการทำความเข้าใจวงจรวัดความถี่ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

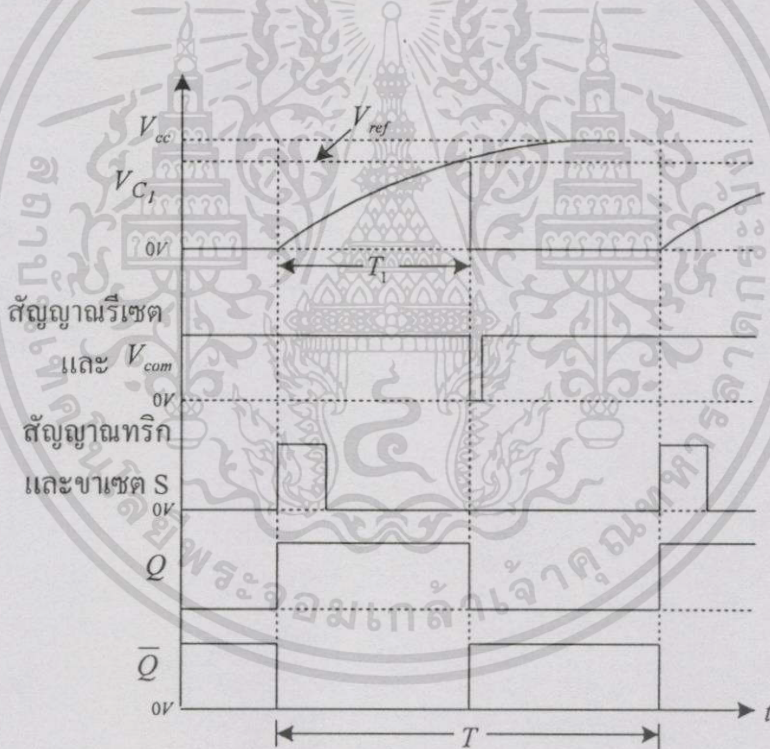
2.2 วงจรโมโนสเตเบิล (monostable)

วงจรโมโนสเตเบิลหรือวงจรวันช็อต (one shot) เป็นวงจรที่สร้างหรือกำเนิดสัญญาณเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมครึ่งละหนึ่งพัลส์ โดยต้องมีสัญญาณทริกจากภายนอกเป็นตัวกำหนดจำนวนของพัลส์เอาต์พุต ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรมีสามารถกำหนดความกว้างของพัลส์ได้จากค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ภายนอกตัวไอซี วงจร โมโนสเตเบิลมีวงจรพื้นฐานดังรูปที่ 2.1 [1]



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของโมโนสเตเบิล

จากรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนที่อยู่ในเส้นประได้แก่ ความต้านทาน R_A และ R_B วงจรเปรียบเทียบแรงดัน ฟลิปฟลอป และสวิตช์ ซึ่งจะอยู่ภายในวงจรรวมหรือไอซี และใน ส่วนของ R_1 และ C_1 จะต่ออยู่นอกไอซี การทำงานของวงจรรอชบายโดยสังเขปได้ดังนี้ เมื่อ วงจรอยู่ในสภาวะรีเซต สวิตช์ S_1 จะปิดวงจรและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 หรือ V_{C_1} จะมี ค่าเป็นศูนย์ ต่อมาเมื่อมีสัญญาณทริกจากภายนอกแสดงดังในรูปที่ 2.2 ไปเขตฟลิปฟลอป นั่นคือ $Q = 1$ และ $\bar{Q} = 0$ ให้สวิตช์ S_1 เปิดวงจร ซึ่งจะทำให้ตัวเก็บประจุ C_1 ที่ต่ออยู่กับตัวต้านทาน R_1 เริ่มประจุแรงดันจากแหล่งจ่าย $+V_{cc}$ จนมีประจุพอเพียงทำให้แรงดันตกคร่อม C_1 เพิ่มขึ้นแบบ เอ็กซ์โปเนนเชียล ด้วยค่าคงตัวเวลา $R_1 C_1$ เมื่อระดับแรงดัน V_{C_1} มีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิง V_{ref} ทำให้อาต์พุตวงจรเปรียบเทียบแรงดัน V_{com} เปลี่ยนสภาวะการทำงานจากบวกเป็นศูนย์ เพื่อไป รีเซตฟลิปฟลอป ทำให้เกิดการรีเซตฟลิปฟลอปและสวิตช์ S_1 ปิด การทำงานในหนึ่งรอบก็จะสิ้นสุดลง โดยที่เอาต์พุตของวงจรถู่นำมาจาก Q หรือ \bar{Q} ก็ได้



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆของวงจร โมโนสเตเบิล

เมื่อสมมติให้ช่วงเวลาที่ C_1 เริ่มประจุแรงดันจนถึงช่วงเวลาที่แรงดัน V_{C_1} มีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิง V_{ref} มีค่าเป็น T_1 สามารถหาค่าแรงดันตกคร่อม C_1 โดยกำหนดให้แรงดันเริ่มต้นเป็นศูนย์โวลต์ และแรงดันค่าสุดท้ายเป็น $+V_{cc}$ จะได้ [17]

$$V_{C_1}(T_1) = V_{cc} - V_{cc} e^{-\frac{T_1}{R_1 C_1}} \quad (2.1)$$

ทำการแทนค่า $V_{C_1}(T_1) = V_{ref}$ ลงในสมการ (2.1) จะได้

$$V_{ref} = V_{cc} - V_{cc} e^{-\frac{T_1}{R_1 C_1}} \quad (2.2)$$

และหาค่า T_1 ได้เป็น

$$e^{-\frac{T_1}{R_1 C_1}} = \frac{V_{cc} - V_{ref}}{V_{cc}}$$

$$e^{\frac{T_1}{R_1 C_1}} = \frac{V_{cc}}{V_{cc} - V_{ref}}$$

$$\frac{T_1}{R_1 C_1} = \ln\left(\frac{V_{cc}}{V_{cc} - V_{ref}}\right)$$

$$T_1 = R_1 C_1 \ln\left(\frac{V_{cc}}{V_{cc} - V_{ref}}\right) \quad (2.3)$$

ซึ่งช่วงเวลา T_1 นี้เป็นช่วงความกว้างของพัลส์เอาต์พุตนั่นเอง แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยที่แรงดันอ้างอิง V_{ref} หาได้จากการแบ่งแรงดันของตัวต้านทาน R_A และ R_B ที่ขึ้นอยู่กับค่าของแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร $+V_{cc}$ มีค่าเป็นดังนี้

$$V_{ref} = \left(\frac{R_B}{R_A + R_B}\right) V_{cc} \quad (2.4)$$

แทนสมการ (2.4) ลงใน (2.3) จะได้

$$T_1 = R_1 C_1 \ln\left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.5) จะเห็นได้ว่าช่วงความกว้างของพัลส์เอาต์พุตหรือช่วงเวลา T_1 นี้จะขึ้นกับผลคูณของตัวต้านทาน R_1 และตัวเก็บประจุ C_1 ที่ต่ออยู่นอก ช่วงเวลาดังกล่าวนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง $+V_{cc}$ ส่วนความต้านทาน R_A และ R_B จะอยู่ในตัวไอซี ซึ่งอัตราส่วนของตัวต้านทานทั้งสองนี้จะถูกกำหนดภายใต้เงื่อนไขของการออกแบบไอซีที่มีค่าความผิดพลาดได้ไม่เกิน $\pm 1\%$ และไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ตัวอย่างของไอซีโมโนสเตเบิลได้แก่ 74LS122 74LS123 เป็นต้น

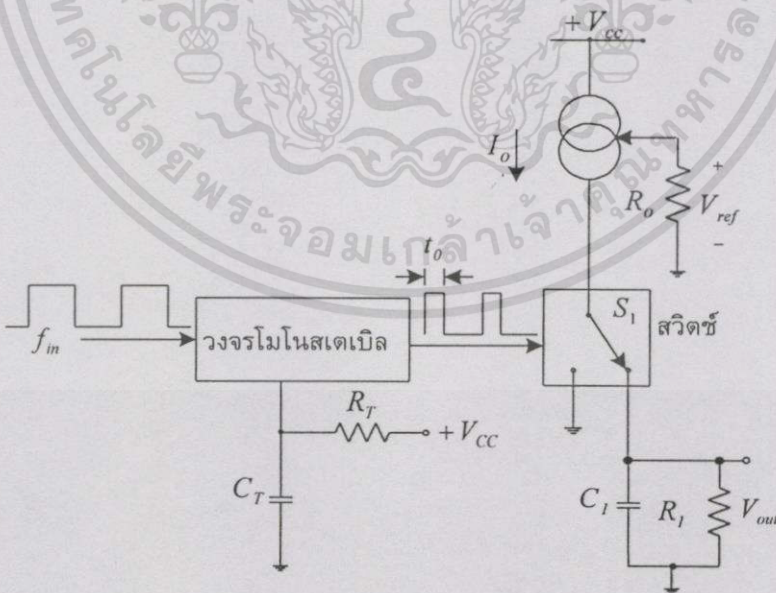
จากหลักการทำงานของวงจรโมโนสเตเบิลที่ได้กล่าวไปแล้ว สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวงจรวัดความถี่ได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3 การวัดความถี่รูปแบบเดิม

จากบทที่ 1 ได้กล่าวไปแล้วว่าหลักการเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่นิยมนำมาสร้างเป็นวงจรวัดความถี่แบบอนาลอกมีด้วยกัน 2 วิธีคือ

2.3.1 หลักการปัมประจุ

การวัดความถี่ที่อาศัยหลักการปัมประจุจะทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของสัญญาณอินพุต ทำได้โดยการอินทิเกรตพัลส์ที่เกิดจากวงจรโมโนสเตเบิล ซึ่งถูกทริกด้วยสัญญาณอินพุตแบบมีคาบเวลาซึ่งมีวงจรพื้นฐานดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรวัดความถี่ที่ใช้หลักการปัมประจุแบบพื้นฐาน

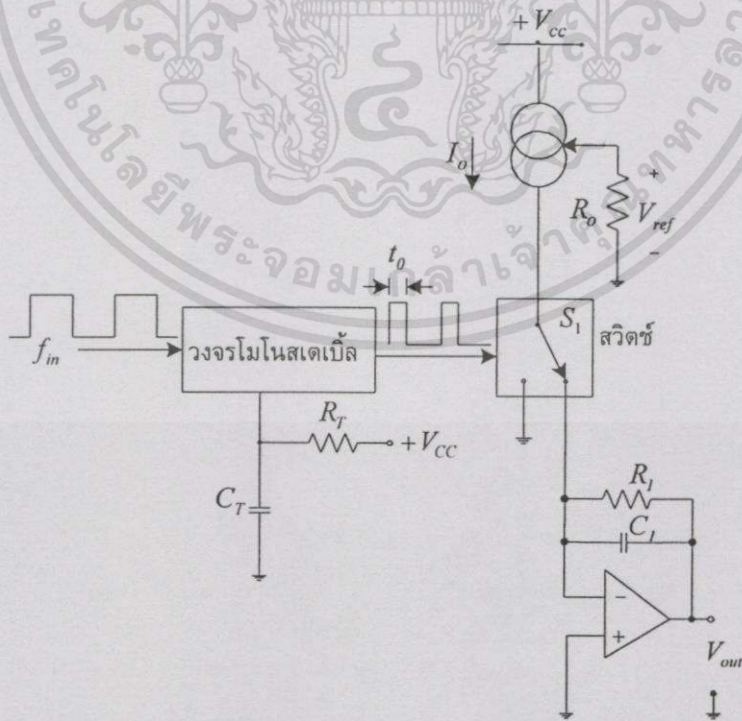
เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ f_m Hz ให้กับวงจรโมโนสเตเบิลจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง t_p วินาที แล้วนำสัญญาณพัลส์นี้ไปควบคุมสวิตช์ S_1 เพื่อตัดต่อ

แหล่งจ่ายกระแส I_0 ทำให้ได้ประจุ Q_0 ไปป้อนให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน R_I และตัวเก็บประจุ C_I นั่นคือ [1]

$$V_{out} = \left(\frac{R_T}{R_o} V_{ref} k_T R_I C_T \right) f_{in} \quad (2.6)$$

โดยที่ k_T เป็นค่าคงที่ที่ถูกกำหนดโดยระดับแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold voltage level) ของวงจรโมโนสเตเบิล หลักการป้อนประจูปแบบนี้เมื่อนำมาสร้างเป็นวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันแล้วมีข้อดีคือวงจรไม่ซับซ้อน และมีย่านความถี่ใช้งานกว้าง อย่างไรก็ตามก็มีข้อด้อยที่สำคัญคือแรงดันเอาต์พุตมักจะมีการกระเพื่อม เนื่องจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_I ซึ่งสามารถลดปัญหานี้โดยการเพิ่มค่า C_I หรือใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ แต่กระนั้นจะยังทำให้วงจรมีผลตอบสนองที่ช้ามากขึ้นอีก และความไม่เป็นเชิงเส้นอันเนื่องมาจากค่าความนำที่เอาต์พุตมีค่าจำกัดของแหล่งจ่ายกระแสที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์ ซึ่งในปัจจุบันวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันแบบนี้พบในไอซีเบอร์ NJM4151

จากข้อด้อยของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันตามรูปที่ 2.3 สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้อีกโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์แบบแอกทิฟ ดังรูปที่ 2.4 [1]



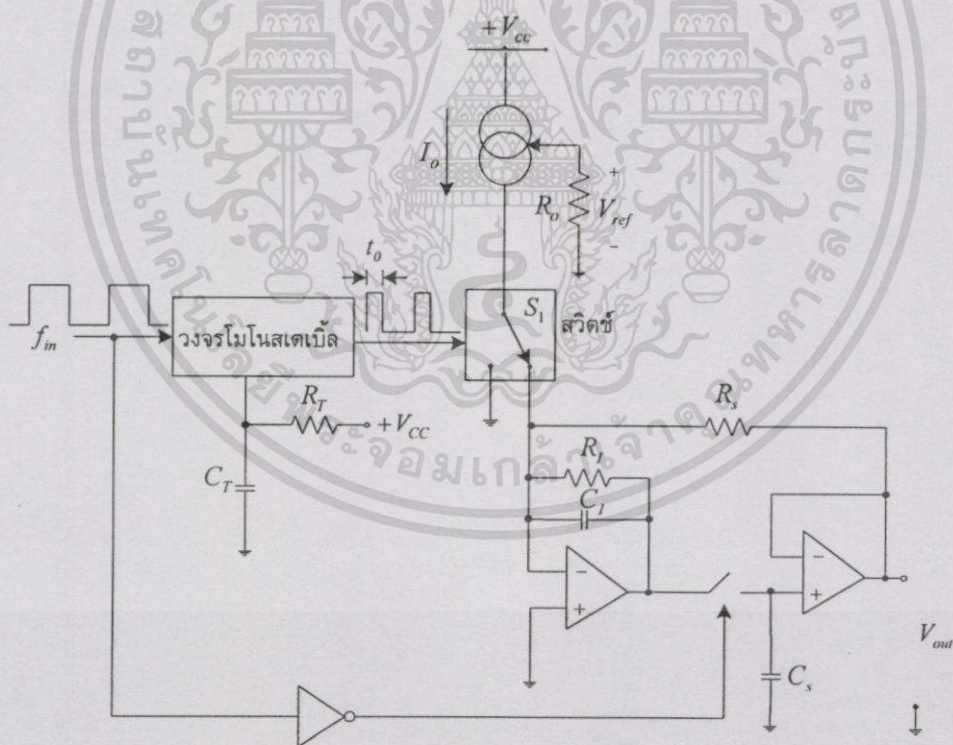
รูปที่ 2.4 วงจรวัดความถี่ที่หลักการป้อนประจุโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์แบบแอกทิฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้รับความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตกับความถี่ของอินพุตมีค่าเป็น

$$V_{out} = -\left(\frac{R_T}{R_o} V_{ref} k_T R_I C_T\right) f_{in} \quad (2.7)$$

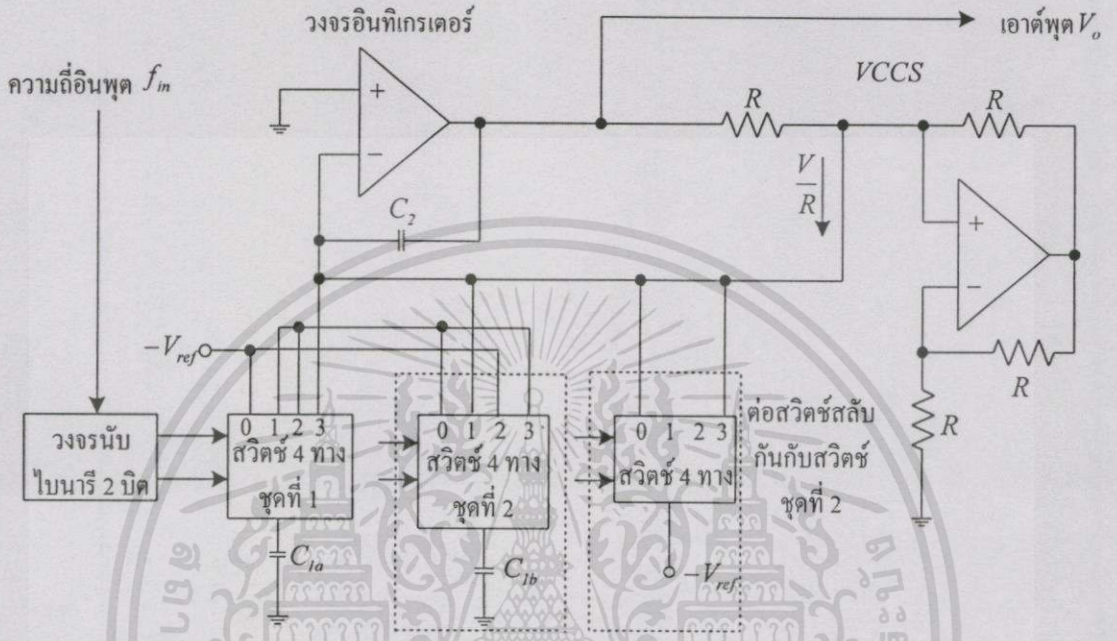
ในปัจจุบันวงจรตามรูปที่ 2.4 พบว่านำไปใช้ในไอซีเบอร์ VFC320 และ AD650 เป็นต้น สำหรับในการทำงานก็ยังพบปัญหาในลักษณะเดียวกันกับวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันในรูปที่ 2.3 คือยิ่งลดการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตลงเท่าใดวงจรยิ่งต้องใช้เวลาในการทำงานมากขึ้น สามารถลดปัญหานี้โดยนำแรงดันเอาต์พุตจากวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไปเป็นอินพุตให้กับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณแบบมีกรป้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.5 [2] แต่กระนั้นวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันแบบนี้มีข้อด้อยคือนอกจากมีวงจรซับซ้อนเพิ่มขึ้นแล้วยังไม่สามารถใช้งานที่ความถี่ต่ำกว่า 1.2 kHz ได้ด้วย



รูปที่ 2.5 วงจรวัดความถี่ที่ใช้หลักการป้อนประจุโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์แบบแอกทีฟที่ใช้วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

2.3.2 การวัดความถี่โดยใช้เทคนิคการสุ่ม

วิธีการวัดแบบนี้อาศัยเทคนิคการสุ่มสัญญาณเป็นหัวใจสำคัญ มีการนำเสนอในปี ค.ศ.1986 โดย J.S. Reynolds [5] มีวงจรพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรวัดความถี่ที่นำเสนอโดย J.S. Reynolds

พิจารณาตามรูปที่ 2.6 มีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ วงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน และกลุ่มสวิตช์ที่ถูกควบคุมการทำงานด้วยความถี่ของสัญญาณอินพุต โดยมีการทำงานร่วมกันในลักษณะการสุ่มแบบป้อนกลับที่ให้แรงดันเอาต์พุต V_o เป็น

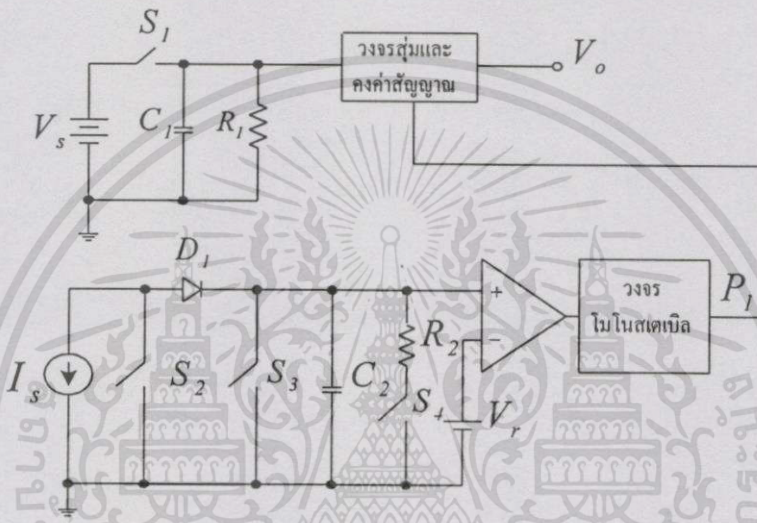
$$V_o = \frac{RC_1 V_{ref}}{2} f_m \tag{2.8}$$

โดยที่ V_{ref} เป็นแรงดันอ้างอิง และ f_m เป็นความถี่ของสัญญาณอินพุต ในทางปฏิบัติแม้ว่าวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันรูปแบบนี้มีข้อดีคือให้แรงดันเอาต์พุตที่มีการกระเพื่อมของระดับศักย์ไฟฟ้าต่ำและมีความเป็นเชิงเส้นกับความถี่อินพุตพอสมควร แต่ก็มีข้อด้อยที่สำคัญคือวงจรมีความซับซ้อนในระบบการควบคุมสวิตช์ มีย่านความถี่ใช้งานค่อนข้างต่ำ และมีผลตอบสนองที่ช้าเนื่องจากต้องใช้เวลาในการประมวลผลแต่ละครั้งถึง 4 เท่าของค่าคาบเวลาของสัญญาณอินพุต นอกจากนี้

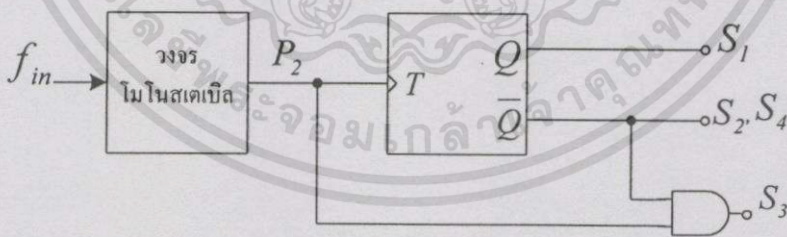
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้ยังต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าสมพ้องกันด้วย มิฉะนั้นจะทำให้แรงดันเอาต์พุตเกิดการกระเพื่อมขึ้นได้

ต่อมาในปี ค.ศ.1987 D.H. Shin และ G.H. Cho [6] ได้นำเสนอวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่ใช้การวัดส่วนกลับของคาบเวลาโดยใช้หลักการคายประจุของวงจรอาร์ซี (RC) ต่อร่วมกัน 2 ชุด ทำงานร่วมกับวงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรโมโนสเตเบิล ฟลิปฟลอป และวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 2.7



(ก) โครงสร้างของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน



(ข) วงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์

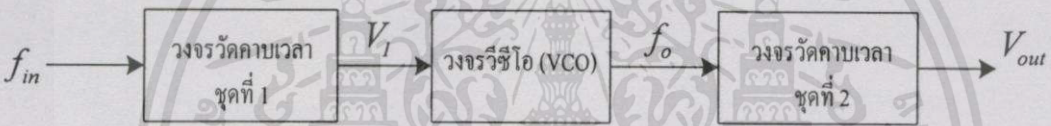
รูปที่ 2.7 วงจรวัดความถี่ที่นำเสนอโดย D.H. Shin และ G.H. Cho

จะ ได้ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับค่าต่างๆดังนี้

$$V_o = \frac{V_s V_r C_2}{I_s} f_{in} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ เป็นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ V_s และ V_r เป็นแรงดันอ้างอิง และ I_s เป็นกระแสอ้างอิง โดยวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันแบบนี้มีข้อดีคือแรงดันเอาต์พุตค่อนข้างราบเรียบและมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุต มีย่านความถี่ใช้งานที่กว้างและมีผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่นำเสนอโดย J.S. Reynolds โดยใช้เวลาในการประมวลผลเป็น 2 เท่าของคาบเวลาของสัญญาณอินพุต ส่วนข้อด้อยที่สำคัญของวงจรแบบนี้คือในการทำงานของวงจรยังคงต้องใช้ตัวเก็บประจุที่สมพียงกัน เพื่อลดข้อด้อยดังกล่าวนี้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1989 C.A.Karybakas และ T.L. Laopoulos [7] ได้นำเสนอวงจรวัดความถี่ที่ประกอบด้วยวงจรวัดคาบเวลาหรือวงจรเปลี่ยนคาบเวลาเป็นแรงดัน 2 ชุด และวงจรวีซีโอ (VCO:voltage controlled oscillator) โดยทำการวัดคาบเวลาของสัญญาณอินพุตแล้วนำไปผ่านวงจรวีซีโอและจากนั้นนำไปผ่านวงจรวัดคาบเวลาอีกครั้งหนึ่งก็จะได้วงจรวัดความถี่ซึ่งมีแผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนผังการทำงานของวงจรวัดความถี่ที่เสนอโดย C.A.Karybakas และ T.L. Laopoulos (ค.ศ.1989)

วงจรวัดคาบเวลาชุดแรกจะให้แรงดันเป็นไฟตรง V_1 ที่แปรผกผันกับความถี่ของสัญญาณอินพุตและเมื่อนำมาผ่านวงจรวีซีโอจะได้เอาต์พุตเป็นความถี่กลางค่าหนึ่ง f_o ที่แปรตามแรงดันอินพุต V_1 และจากนั้นนำสัญญาณ f_o ไปผ่านวงจรวัดคาบเวลาชุดที่ 2 จะทำให้ได้แรงดันที่เอาต์พุตเป็นดังนี้

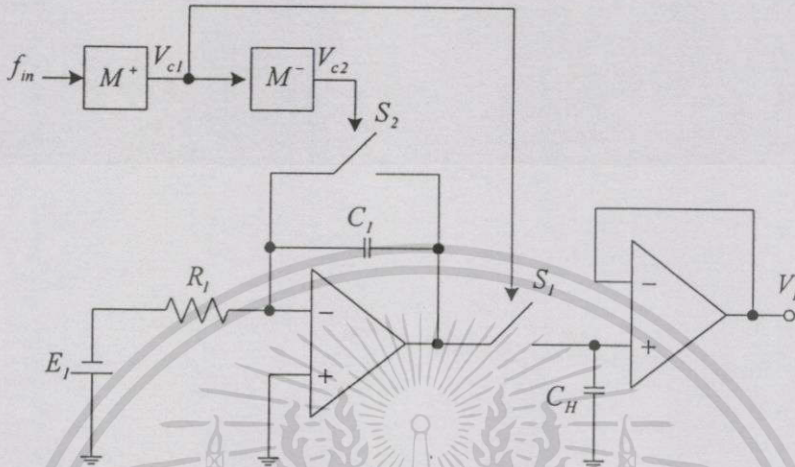
$$V_{out} = \frac{k_2}{k_o k_1} f_{in} \tag{2.10}$$

เมื่อ k_o เป็นแฟคเตอร์ในการแปลงแรงดันเป็นความถี่ของวงจรวีซีโอ และ k_1, k_2 เป็นค่าอัตราขยายของวงจรวัดคาบเวลาชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สำหรับวงจรวัดคาบเวลานั้นแสดงดังรูปที่ 2.9 ประกอบด้วยวงจร โมโนสเตเบิล วงจรอินทิเกรเตอร์และวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งให้เอาต์พุตมีค่าเป็น

$$V_1 = k_1 T \tag{2.11}$$

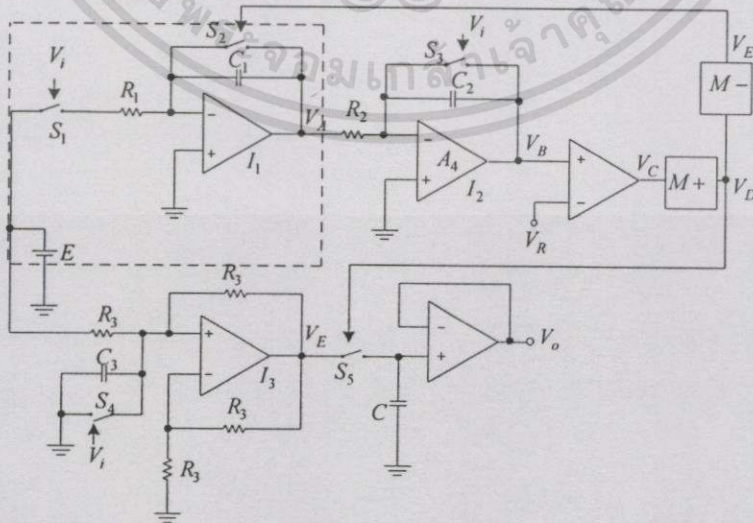
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $k_1 = \frac{E_1}{R_1 C_1}$



รูปที่ 2.9 วงจรวัดคาบเวลาที่เสนอโดย C.A.Karybakas และ T.L. Laopoulos (ค.ศ.1989)

วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันแบบนี้มีข้อดีคือวงจรมีความซับซ้อนอย่างมาก อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะลดความซับซ้อนของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันนี้ในปี ค.ศ. 1990 C.A.Karybakas และ T.L. Laopoulos [8] ยังได้นำเสนอวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันอีกวงจรหนึ่งโดยใช้หลักการเช่นเดียวกันกับวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.9 โดยวงจรที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรวัดความถี่ที่เสนอโดย C.A.Karybakas และ T.L. Laopoulos (ค.ศ.1990)

จากวงจรตามรูปที่ 2.10 ซึ่งประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ 3 ชุด วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรโมนอสเตเบิลและวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุตมีค่าเป็น

$$V_o = \frac{4V_R R_1 C_1 R_2 C_2}{R_3 C_3} f_{in} \quad (2.12)$$

โดยที่ V_R เป็นแรงดันอ้างอิง และจากสมการ (2.12) จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุต V_o เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่อินพุต f_{in} ซึ่งวงจรนี้มีข้อดีคือมีผลตอบสนองที่รวดเร็วและลดปัญหาเกี่ยวกับการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต แต่ทว่าวงจรยังคงมีข้อเสียคือผลตอบสนองที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความกว้างของพัลส์จากรวม โนสเตเบิลที่ขึ้นอยู่กับค่าของตัวต้านทานและค่าตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ภายนอกไอซีโมนอสเตเบิลที่ใช้ในการควบคุมสวิทช์ทำให้เกิดการหน่วงเวลาในการกำหนดระดับสัญญาณเอาต์พุต

เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันหรือวงจรวัดความถี่ดังกล่าวข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอแนวคิดของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันอีกรูปแบบหนึ่งที่ใช้วิธีการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรตรวจจับผ่านศูนย์เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์มาควบคุมอนาล็อกสวิทช์ที่ต่ออยู่กับวงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันเป็นสัญญาณไฟตรงที่มีความราบเรียบและเป็นเชิงเส้นกับความถี่ของสัญญาณอินพุตในย่านที่กว้าง นอกจากนี้วงจรยังมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วอีกด้วย ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 3

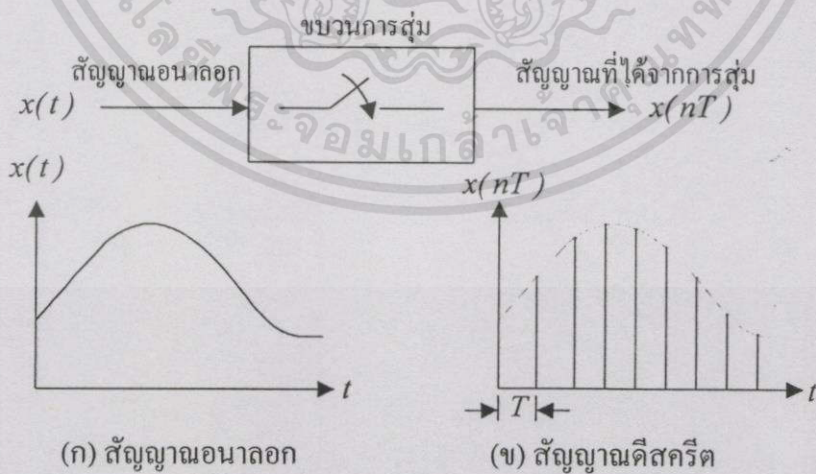
วงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงวงจรวัดความถี่แบบเดิมที่นิยมใช้กันในปัจจุบันในรูปแบบของวงจรรวมหรือไอซีและวงจรวัดความถี่ที่เคยมีผู้นำเสนอมาแล้ว โดยได้อธิบายถึงหลักการทางาน ข้อดีและข้อเสียของวงจรรวมทั้งได้อธิบายถึงวงจร โมโนสเตเบิลที่ใช้ในการควบคุมการทางานของวงจรวัดความถี่ด้วย สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรพื้นฐานที่นำไปใช้ในการออกแบบเพื่อปรับปรุงวงจรวัดความถี่และวงจรรักษาถ่วง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2 ทฤษฎีการสุ่มค่าสัญญาณ (Sampling theorem)

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นกรนำสัญญาณอนาลอกมาใช้ร่วมกับสัญญาณดิจิตัล ซึ่งต้องใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอธิบายเกี่ยวกับการสุ่มสัญญาณ ขบวนการสุ่มสัญญาณอย่างง่ายมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.1 เมื่อกำหนดให้สัญญาณต่อเนื่องทางเวลา $x(t)$ หรือสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณที่มีค่าทุกๆจุดในช่วงเวลาที่พิจารณาด้วยอย่างสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 3.1(ก) ส่วนสัญญาณดิจิตัลหรือสัญญาณที่ได้จากการสุ่ม $x(nT)$ จะเกิดที่เวลาห่างกันเป็นห้วงๆ ที่เวลา $t = nT$ จากตัวอย่างสัญญาณ $x(t)$ ที่แสดงในรูปที่ 3.1(ก) จะทำให้ได้สัญญาณ $x(nT)$ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข) โดยอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการสุ่มสัญญาณคือสวิตช์



รูปที่ 3.1 การสุ่มตัวอย่างแบบอุดมคติ

รูปที่ 3.1 แสดงขบวนการสุ่มสัญญาณอย่างง่าย จะเห็นว่าถ้าสัญญาณอนาลอก $x(t)$ เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นตลอดเวลา t ส่วนสัญญาณดิจิตรีตจะเกิดจากสัญญาณอนาลอกที่ถูกสุ่มทุกๆ T วินาทีที่ตำแหน่งต่างๆเป็น

$$t = nT \quad \text{เมื่อ } n=0,1,2,\dots \quad (3.1)$$

ซึ่งจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ $x(t)$ ที่แสดงในรูป 3.1(ก) และสัญญาณ $x(nT)$ ที่แสดงในรูปที่ 3.1(ข) เป็นดังนี้

$$x(nT) = x(t) \Big|_{t=nT} \quad (3.2)$$

ตัวทฤษฎีสำคัญที่บอกความสัมพันธ์ในการกำหนดช่วงเวลา T สำหรับการสุ่มค่าตัวอย่างสัญญาณอนาลอกเพื่อสร้างสัญญาณดิจิตรีตที่มีข้อมูลของสัญญาณอนาลอกเดิมอยู่ครบถ้วนคือ ทฤษฎีการสุ่มค่าสัญญาณ ซึ่งมีเงื่อนไขที่สำคัญ 2 ข้อดังต่อไปนี้ [18]

- (1) สัญญาณที่ถูกสุ่มจะต้องเป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์จำกัด (band limited) เท่ากับ f_{max} โดยที่ f_{max} คือความถี่สูงสุดของสัญญาณอินพุต
- (2) อัตราการสุ่ม (sampling rate) จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $2f_{max}$ นั่นคือ $f_c \geq 2f_{max}$ โดยที่ f_c คือความถี่ที่ใช้ในการสุ่ม ซึ่งอัตราต่ำสุดของการสุ่มสัญญาณ $2f_{max}$ นี้ เรียกว่าอัตราไนควิสต์ (Nyquist rate) ดังนั้นช่วงเวลาของการสุ่มสัญญาณจะมีค่าดังนี้

$$T \leq \frac{1}{2f_{max}} \quad (3.3)$$

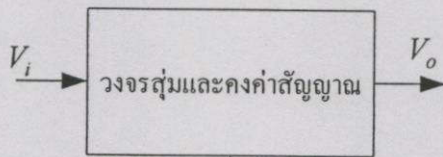
เมื่อ

$$T = \frac{1}{f_c} \quad (3.4)$$

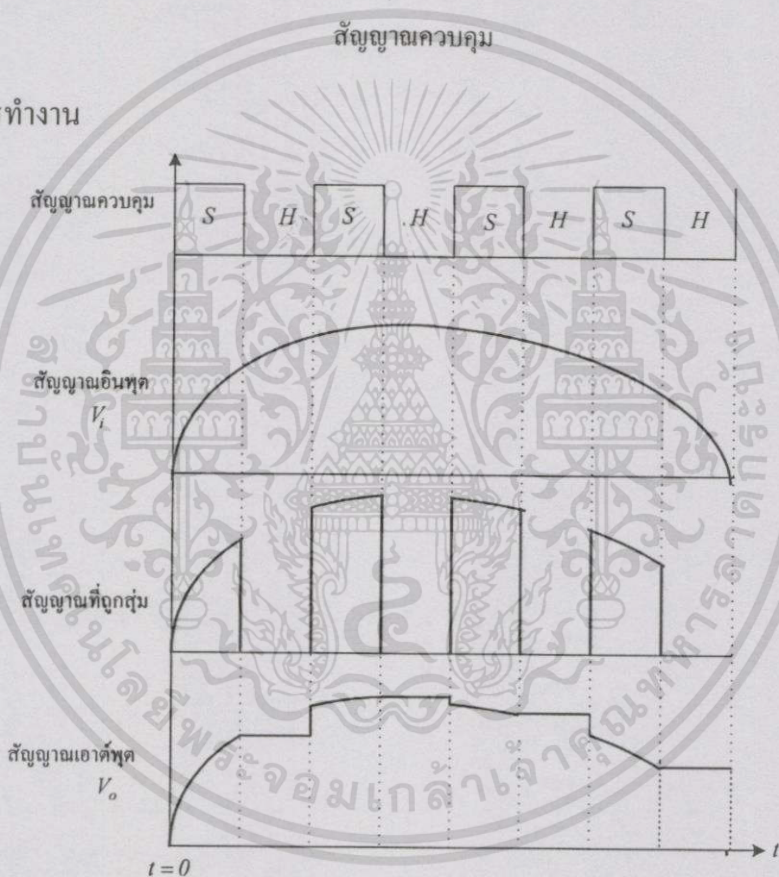
3.2 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (Sample and hold circuit : S/H)

วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้ในการตรวจจับค่าของสัญญาณอินพุตที่ต้องการสุ่มและทำการคงค่าสัญญาณที่ถูกสุ่มไว้ชั่วขณะหนึ่งเพื่อให้วงจรมีเวลาเพียงพอในการประมวลสัญญาณจนกว่าจะมีสัญญาณควบคุมหรือสัญญาณนาฬิกาถูกใหม่เข้ามา ซึ่งวงจรจะคงค่าสัญญาณค่านี้ต่อไปด้วยขบวนการลักษณะเช่นนี้เรื่อยไปโดยที่อินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจรมานั้นถ้าเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาหรือสัญญาณอนาลอกก็จะทำให้ได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาห่างกันเป็นห้วงๆไม่ต่อเนื่องกัน โดยจะเกิดขึ้นเฉพาะในเวลาที่มีการสุมเท่านั้น สัญญาณในลักษณะเช่นนี้เรียกว่าสัญญาณดิจิตอล โดยแผนผังของวงจรสุมและคงค่าสัญญาณและผลตอบสนองต่อวงจรมีแสดงดังรูปที่ 3.2 [22]



(ก) แผนผังการทำงาน



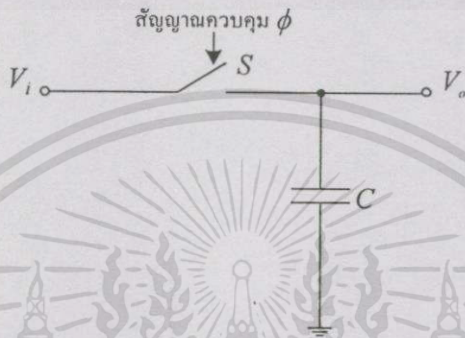
(ข) ผลตอบสนองทางอุดมคติ

รูปที่ 3.2 แผนผังของวงจรสุมและคงค่าสัญญาณและผลตอบสนองต่อวงจร

จากรูปที่ 3.2(ข) จะเห็นได้ว่าการทำงานของวงจรแบ่งเป็น 2 โหมดคือโหมดติดตาม (track mode) วงจรทำหน้าที่สุมสัญญาณอินพุตที่เข้ามาจะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต $V_o = V_i$ ที่ขึ้นอยู่กับจังหวะของสัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณนาฬิกา ดังในรูปที่ 3.2(ข) ในแถบที่ 3 นี้ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาหรือสัญญาณดิจิตอล เมื่อสัญญาณนาฬิกาเปิดวงจรนี้จะไม่ทำงานอีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

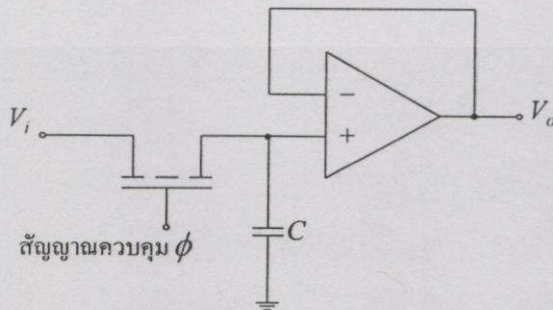
วงจรจะทำการคงค่าสัญญาณเอาต์พุต V_o ที่ได้จากการสุ่มค่าไว้ในช่วงเวลาสุดท้าย การทำงานในช่วงนี้จะเรียกว่าทำงานในโหมดคงค่าสัญญาณ (hold mode) วงจรนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวงจรติดตามและคงค่าสัญญาณ (track and hold circuit :T/H)

วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณแบบพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยสวิตช์ทำหน้าที่ในการสุ่มสัญญาณทำงานร่วมกับสัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณนาฬิกาและตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ในการคงค่าสัญญาณ [23]



รูปที่ 3.3 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

จากรูปที่ 3.3 พิจารณาในทางอุดมคติจะได้ว่าเมื่อสวิตช์ปิดวงจรอินพุตอิมพีแดนซ์ของสวิตช์จะมีค่าน้อยมากจึงทำให้แรงดันเอาต์พุต V_o มีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต V_{in} และเมื่อสวิตช์เปิดวงจรเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของสวิตช์จะมีค่าสูงมากจึงทำให้ตัวเก็บประจุรักษาระดับแรงดันไว้ได้โดยไม่เกิดการคายประจุไปสู่โหลด แต่เมื่อนำไปใช้งานจริงจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำและโหลดของเอาต์พุตทำให้ตัวเก็บประจุเกิดคายประจุไปยังโหลด ทำให้เอาต์พุตไม่สามารถรักษาระดับสัญญาณอินพุตได้ตลอด ดังนั้นในทางปฏิบัติและในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำวงจรบัฟเฟอร์ (buffer) มาต่อร่วมด้วยและเลือกใช้อนาล็อกสวิตช์เพื่อการสุ่มสัญญาณอินพุตในช่วงเวลาอันสั้นและด้วยความเร็วสูง ซึ่งวงจรแสดงดังรูปที่ 3.4



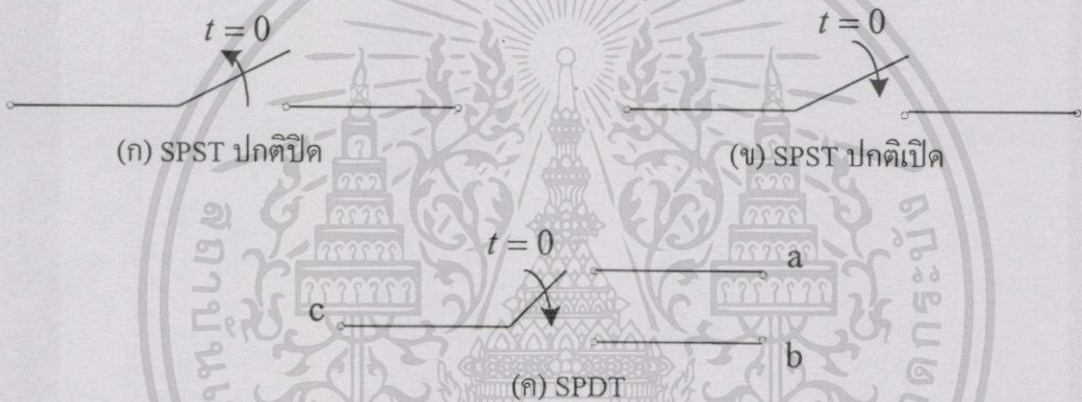
รูปที่ 3.4 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรตามรูปที่ 3.4 ประกอบด้วยมอสสวิตช์ ตัวเก็บประจุ และออปแอมป์ที่ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ให้กับส่วนเอาต์พุตของวงจรเนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าสูงมากจนประมาณว่าไม่มีกระแสไหลเข้าที่ขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ ดังนั้นจึงสามารถแก้ปัญหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำและการเกิดโหลดที่เอาต์พุตของวงจรได้

3.3 อนาล็อกสวิตช์ (Analog switches)

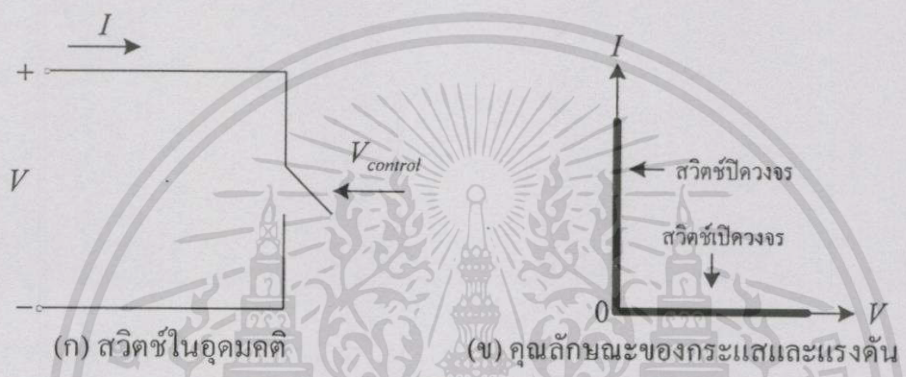
ก่อนอื่นจะกล่าวถึงสัญลักษณ์และการทำงานของสวิตช์ในอุดมคติ ซึ่งสวิตช์มีการทำงานอยู่ 2 สถานะคือเปิดและปิด ตัวอย่างสัญลักษณ์ของสวิตช์แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยที่ในแต่ละกรณีนั้นเวลาจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนสถานะการทำงานในการเปิดและปิดวงจรของสวิตช์ [26]



รูปที่ 3.5 สัญลักษณ์ของสวิตช์

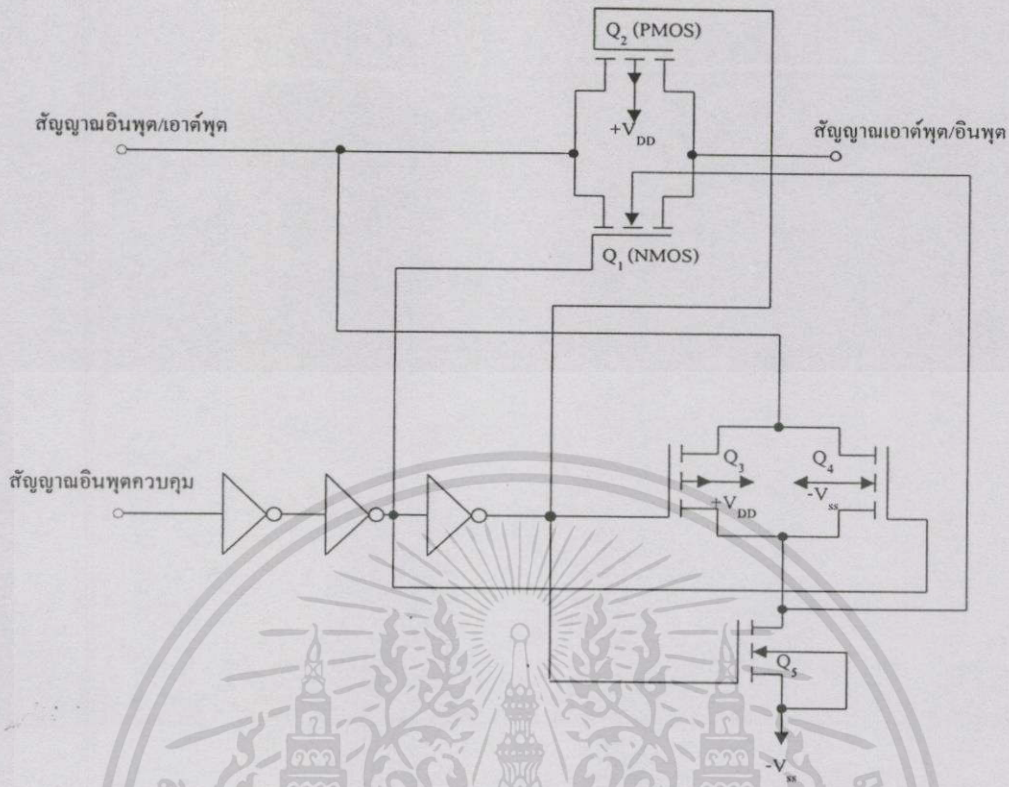
จากรูปที่ 3.5(ก) และ 3.5(ข) เป็นสวิตช์แบบขั้วเดียวทางเดียว (single-pole, single-throw: SPST) ซึ่งรูปที่ 3.5(ก) นั้นเป็นสวิตช์ปกติปิดโดยจะเปลี่ยนสถานะการทำงานคือเปิดวงจรเมื่อเวลา $t=0$ วินาที และรูปที่ 3.5(ข) เป็นสวิตช์ปกติเปิดโดยจะเปลี่ยนสถานะการทำงานคือปิดวงจรเมื่อเวลา $t=0$ วินาที ส่วนรูปที่ 3.5(ค) เป็นสวิตช์แบบขั้วเดียวสองทาง (single-pole, double-throw: SPDT) สวิตช์แบบนี้จะทำงานคล้ายกับสวิตช์ SPST 2 ตัว โดยที่สวิตช์ตัวแรกจะต่อระหว่างขั้ว a และ ขั้ว c ส่วนสวิตช์อีกตัวหนึ่งจะต่ออยู่ระหว่างขั้ว b และ ขั้ว c ซึ่งก่อนที่เวลา $t=0$ วินาที สวิตช์ที่อยู่ระหว่างขั้ว c กับขั้ว a จะปิดอยู่ ส่วนขั้ว c และขั้ว b จะเปิดออก และที่เวลา $t=0$ วินาที สวิตช์ทั้งสองจะเปลี่ยนสถานะการทำงาน นั่นคือ สวิตช์ขั้ว a กับขั้ว c จะเปิดออก ส่วนสวิตช์ขั้ว c กับขั้ว b จะปิดวงจร

ในกรณีที่นำสวิตช์ไปใช้งานโดยสมมติว่ามีแรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็น V และค่ากระแสที่ไหลผ่านสวิตช์เป็น I ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ก) และเพื่อความสะดวกในการอธิบายการทำงานของสวิตช์ในที่นี้จึงสมมติว่าสวิตช์มีการทำงานแบบอุดมคติ นั่นคือ เมื่อสวิตช์ปิดวงจรแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์จะมีค่าเป็นศูนย์และกระแสที่ไหลผ่านตัวมันมีค่าเป็นเท่าใดก็ได้ ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานของสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อสวิตช์เปิดวงจรจะทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านสวิตช์แม้ว่าแรงดันที่คร่อมตัวมันจะมีค่าเป็นเท่าใดก็ตาม ซึ่งมีผลทำให้ค่าความต้านทานเป็นอนันต์เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสได้ดังรูปที่ 3.6(ข) [11]



รูปที่ 3.6 สวิตช์ในอุดมคติและคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน (I-V)

โดยทั่วไปอนาล็อกสวิตช์เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์ซึ่งอาจจะเป็นทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (bipolar junction transistor : BJT) หรือแบบเฟต (field effect transistor : FET) ก็ได้ เพื่อให้สวิตช์มีการเปิด-ปิดวงจรได้อย่างรวดเร็ว แต่อนาล็อกสวิตช์ส่วนมากจะนิยมใช้เป็นแบบ FET มากกว่า เนื่องจากมีความสมมาตรกันตามโครงสร้างและเมื่อนำกระแสไม่มีแรงดันออฟเซต (offset) ที่เป็นไฟตรงเกิดขึ้นระหว่างขั้วซอส (source) กับขั้วเดรน (drain) นั่นคือ $V_{DS} = 0$ เมื่อ $I_{DS} = 0$ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้สวิตช์แบบ MOS โดยเลือกใช้ไอซีเบอร์ 4066 มีวงจรพื้นฐาน แสดงดังรูปที่ 3.7 [10]



รูปที่ 3.7 วงจรมอสสวิทช์ภายในตัวไอซีเบอร์ 4066

ไอซีเบอร์ 4066 คือสวิทช์ที่ทำหน้าที่เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตในชั่วเดี่ยวกัน ซึ่งภายในตัวไอซีประกอบด้วยสวิทช์ 4 ตัวที่อิสระจากกัน ซึ่งจากรูปที่ 3.7 นี้เป็นเพียงสวิทช์หนึ่งตัว ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์แบบ NMOS และ PMOS 2 ชุด นั่นคือ $Q_1 - Q_2$ และ $Q_3 - Q_4$ ที่ต่อขนานกัน และในแต่ละชุดจะมี NMOS ต่างหากอีก 1 ตัวคือ Q_5 และใช้อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ในการกลับขั้วของแรงดันเกท ไอซีเบอร์นี้จะให้ค่าความต้านทานขณะปิดวงจรที่ค่าประมาณ 80 โอห์ม เมื่อใช้ไฟเลี้ยงวงจรเป็น 15 โวลต์ โดยอาศัยคุณสมบัติของ NMOS ที่ว่าจะนำกระแสเมื่อ $V_{GS} > V_{TH}$ ค่าบวก และ PMOS จะนำกระแสเมื่อ $V_{GS} < V_{TH}$ ค่าลบ เมื่ออินพุตที่เป็นแรงดันควบคุมมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟเลี้ยง V_{DD} จะทำให้กลุ่มอส $Q_1 - Q_2$ และ $Q_3 - Q_4$ ปิดวงจรหรือนำกระแส ส่วน Q_5 จะเปิดวงจรและ NMOS สวิทช์ที่เป็น Q_1 จะถูกต่อเข้ากับขั้วซอสของแรงดันอินพุตทำงานร่วมกับกลุ่มอสสวิทช์ $Q_3 - Q_4$ เป็นผลทำให้แรงดันที่ขั้วซอสกับบอดี้ (body) ของ Q_1 เป็นศูนย์ ซึ่งจะมั่นใจได้ว่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าต่ำสุดและความต้านทานขณะปิดวงจรมีค่าต่ำสุด ดังนั้นจะได้ค่าของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต ($V_{out} = V_{in}$) และเมื่อแรงดันควบคุมมีสถานะต่ำ (low) กลุ่มอส $Q_1 - Q_2$ และ $Q_3 - Q_4$ จะเปิดวงจร ส่วน Q_5 จะนำกระแส ทำให้แรงดันที่บอดี้ของ Q_1 จะมีค่าเป็นลบใกล้เคียงกับแรงดันไฟเลี้ยงค่าลบ ($-V_{SS}$) ส่งผลให้ค่าความจุแฝงมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อ $Q_1 - Q_2$ ไม่นำกระแส จะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์โวลต์ ($V_{out} = 0$ โวลต์)

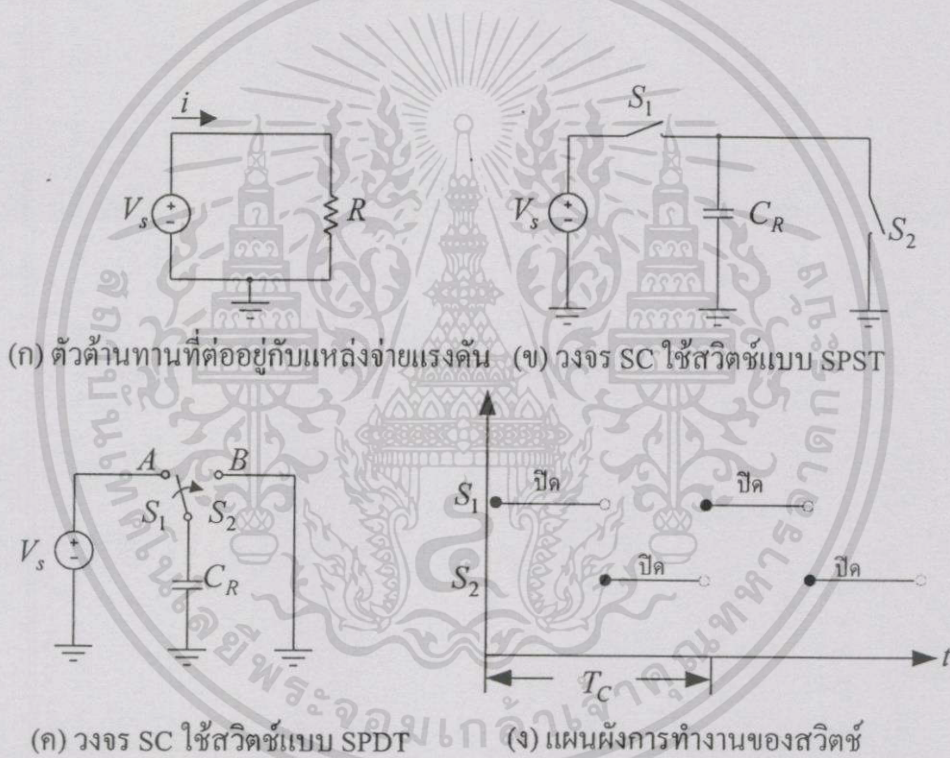
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นของสวิตช์คาปาซิเตอร์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการแปลงวงจรอนุกรมไปเป็นวงจรที่ทำงานในรูปสวิตช์คาปาซิเตอร์ ซึ่งจะได้นำไปใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้อย่างสะดวก

3.4 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์เบื้องต้น (Basic switched-capacitor circuits)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ (switched-capacitor) หรือที่เรียกว่าวงจร SC ที่ประกอบด้วยมอสสวิตช์ ตัวเก็บประจุและออปแอมป์ เพื่อใช้แทนวงจรแบบอนุกรมวงจรพื้นฐานของ SC แสดงดังรูปที่ 3.8(ข) และ 3.8(ค) โดยทำการแทนตัวต้านทานด้วยตัวเก็บประจุและสวิตช์ [9]



รูปที่ 3.8 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์พื้นฐาน

จากรูปที่ 3.8 ในกรณีที่ใช้สวิตช์เป็นแบบหนึ่งขั้วทางเดียว (SPST) จะสามารถเขียนวงจรในรูปที่ 3.8(ก) ได้ใหม่เป็นดังรูปที่ 3.8(ข) หรือในกรณีที่เขียนแทนด้วยสวิตช์ขั้วเดียวสองทาง (SPDT) จะเขียนวงจรได้ดังรูปที่ 3.8(ค) และความสัมพันธ์ของแผนผังการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 เขียนแทนได้ดังรูปที่ 3.8(ง) โดยที่สวิตช์ S_1 และ S_2 จะทำงานประสานได้จึงหะกัน กล่าวคือ จะเปิดและปิดไม่พร้อมกันหรือสลับกันทำงานในหนึ่งคาบเวลาสมมติเป็น T_c ซึ่งโครงสร้างที่แทนความต้านทานสมมูลนี้ จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ในช่วงเวลาที่พิจารณาจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่ปิดหรือกล่าวได้ว่าสวิตช์ทั้งสองจะไม่ปิดพร้อมกัน

ข. ในช่วงเวลาที่สวิตช์เปิดจะเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เมื่อเทียบกับคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกา T_c

ค. ถ้าสวิตช์ S_1 ปิดวงจร ประจุจะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งจ่าย V_s ไปยังตัวเก็บประจุทันที

ง. ถ้าสวิตช์ S_2 ปิดวงจร ตัวเก็บประจุจะคายประจุไปยังกราวด์ทันที

ในช่วงเวลาที่สวิตช์ S_1 ปิดวงจรนั้น ประจุบนตัวเก็บประจุจะมีค่าเป็นดังนี้คือ

$$q = C_R V_s \quad (3.5)$$

ประจุนี้จะคายประจุไปยังกราวด์ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อสวิตช์ S_2 ปิดลงและสวิตช์ S_1 เปิดออก ดังนั้นในหนึ่งรอบการทำงานหรือหนึ่งคาบเวลา T_c จะได้ประจุทั้งหมดที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งจ่าย V_s มีค่าเป็น

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{C_R V_s}{T_c} \quad (3.6)$$

ประจุนี้จะถูกส่งไปยังตัวเก็บประจุอย่างต่อเนื่อง โดยแหล่งจ่ายแรงดัน และประจุจะคายประจุในครึ่งคาบหลังของทุกๆ รอบของการทำงาน ซึ่งการไหลของประจุที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันก็คือกระแสเฉลี่ยนั่นเอง ซึ่งมีค่าเป็นดังนี้

$$i = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \Delta q \, dt = \frac{C_R V_s}{T_c} \quad (3.7)$$

และเนื่องจาก $T_c = \frac{1}{f_c}$ เมื่อ f_c คือความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการควบคุมการปิด-เปิดของสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2

ดังนั้นจากสมการ(3.7) เขียนใหม่ได้เป็น

$$i = C_R f_c V_s \quad (3.8)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_s}{i} = \frac{1}{C_R f_c} = \frac{T_c}{C_R} \quad (3.9)$$

ซึ่งค่าของ $\frac{T_c}{C_R}$ มีหน่วยเหมือนกับความต้านทาน (โวลต์/แอมแปร์=โอห์ม)

จากรูปที่ 3.8(ก) จากกฎของโอห์ม จะได้ว่า

$$V_s = Ri$$

หรือ

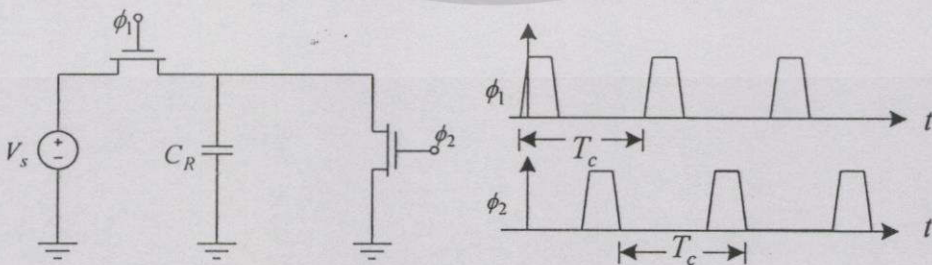
$$\frac{V_s}{i} = R \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.9) และสมการ (3.10) จะได้

$$R = \frac{1}{C_R f_c} = \frac{T_c}{C_R} \quad (3.11)$$

ดังนั้นจึงสามารถแทนค่าความต้านทาน R ด้วย $\frac{1}{C_R f_c}$ หรือเท่ากับ $\frac{T_c}{C_R}$ ได้ จากความสัมพันธ์นี้จะเห็นว่าค่าความต้านทานของวงจร SC จะแปรผกผันกับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาหรือแปรผันโดยตรงกับคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกา

สำหรับในทางปฏิบัตินั้นจะแทนสวิทช์ด้วยมอสสวิทช์ดังรูปที่ 3.9(ก)



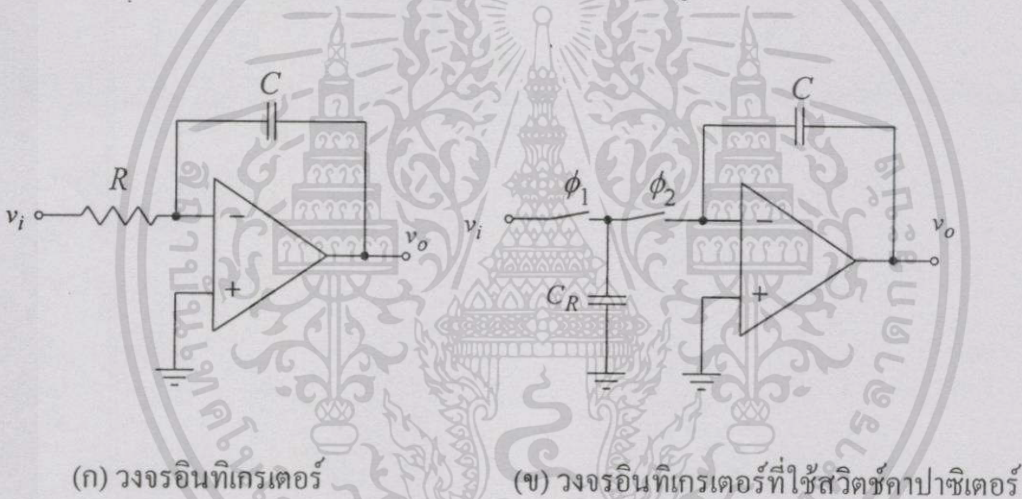
(ก) วงจรสวิทช์คาปาซิเตอร์

(ข) ผังเวลาของสัญญาณควบคุมจากวงจรรูป (ก)

รูปที่ 3.9 วงจรสวิทช์คาปาซิเตอร์ในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรตามรูปที่ 3.9(ก) มอสซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์มีโครงสร้างที่สมมาตรกัน ดังนั้นขั้วเดรนกับขั้วซอสจะสามารถสลับตำแหน่งกันได้ ส่วนรูป 3.9(ข) เป็นผังเวลาของการควบคุมแรงดัน V_{GS} หรือแรงดันระหว่างขั้วเกต (gate) และขั้วซอสของมอส เพื่อควบคุมการไหลของกระแสระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอส โดยปกตินั้นแรงดัน V_{GS} จะเขียนแทนด้วยสัญญาณนาฬิกา ϕ ซึ่งจากรูปที่ 3.9(ข) นั้น ϕ_1 และ ϕ_2 เป็นสัญญาณนาฬิกาที่ไม่เหลื่อมกัน (nonoverlap) และสมมติว่าสัญญาณนาฬิกาทั้งสองนี้มีคาบเวลาเท่ากับ T_c ที่ความถี่เดียวกัน โดยการแทนสัญญาณนาฬิกาในลักษณะเช่นนี้จะทำให้การควบคุมสวิตช์ทั้งสองชุดผลัดกันทำงานในการเปิดหรือปิดวงจรและความถี่ของสัญญาณนาฬิกา f_c จะต้องมีค่าสูงกว่าความถี่สูงสุดของสัญญาณอินพุตหรือในที่นี้หมายถึงแหล่งจ่ายแรงดัน V_s เพื่อให้ขบวนการทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยปกติแล้ว $f_c \gg 100 f_{in}$ เมื่อ f_{in} คือความถี่ของสัญญาณอินพุต ซึ่งวงจร SC สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรต่างๆได้มากมาย ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์ ซึ่งมีลักษณะแสดงดังในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์อินทิเกรเตอร์

โดยวงจรตามรูปที่ 3.10(ก) เป็นวงจรอินทิเกรเตอร์ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ทางศักดาเป็นดังนี้ [17]

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{1}{RCs} \quad (3.12)$$

แทน $s = j\omega$ จะได้

$$\frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = -\frac{1}{j\omega RC} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

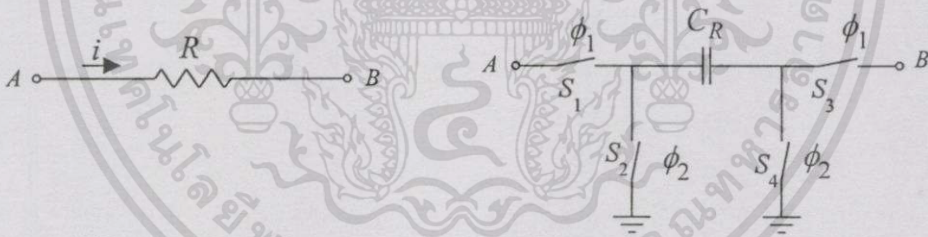
เมื่อ $\omega \ll \omega_c$ โดยที่ $\omega_c = 2\pi f_c$

แทนค่า R จากสมการ (3.11) ลงใน (3.13) จะได้

$$\frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = -\frac{f_c C_R}{j\omega C} \quad (3.14)$$

จากสมการ (3.14) จะเห็นได้ว่าเป็นค่าความต้านทานสมมูลย์ในวงจรอินทิเกรเตอร์ได้ด้วย วงจร SC ซึ่งอัตราการขยายของวงจรขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของตัวเก็บประจุ 2 ตัวและความถี่ของสัญญาณนาฬิกา

จากรูปที่ 3.8 และ 3.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อแทนตัวต้านทานด้วยวงจร SC มีข้อจำกัดคือในการเขียนวงจรสมมูลย์ของตัวต้านทานนั้นมีเพียงการต่อขั้วใดขั้วหนึ่งลงกราวด์เท่านั้นและปัญหาเกี่ยวกับความไวของค่าตัวเก็บประจุแฝงที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วมอสวิตช์กับกราวด์ที่มีผลต่อการตอบสนองทางความถี่ของวงจร ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใส่สวิตช์เพิ่มเข้าไปเป็นคู่ (dual-switch) [8] แสดงดังรูปที่ 3.11



(ก) ตัวต้านทานต่ออยู่ระหว่างจุด A และ B (ข) วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่มีวงจรสมมูลย์ดังรูป (ก)

รูปที่ 3.11 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่ใช้สวิตช์เป็นคู่เพื่อแก้ปัญหาเรื่องค่าตัวเก็บประจุแฝง

จากรูป 3.11(ก) ใช้กฎของโอห์ม จะได้

$$i = \frac{1}{R}(V_A - V_B) \quad (3.15)$$

และจากรูปที่ 3.11(ข) ในระหว่างที่ ϕ_1 ทำงาน (active) C_R จะถูกประจุจาก V_A ไปยัง V_B ซึ่ง สวิตช์ S_1 และ S_3 ต่อกัน และช่วงที่ ϕ_2 ทำงาน (active) C_R จะคายประจุผ่านสวิตช์ S_2 และ S_4 ดังนั้นประจุที่สะสมในตัวเก็บประจุในช่วงที่ ϕ_1 ทำงานมีค่าเป็น

$$q = C_R(V_A - V_B) \tag{3.16}$$

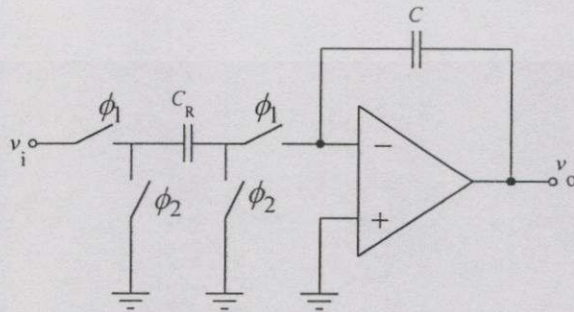
กระแสเฉลี่ยที่ไหลจาก V_A ไปยัง V_B จะได้

$$\begin{aligned} i &= \frac{1}{T_C} \int_0^{T_C} \frac{\Delta q}{\Delta t} dt \\ &= \frac{C_R}{T_C} (V_A - V_B) \end{aligned} \tag{3.17}$$

ดังนั้นจากสมการ (3.15) และ (3.17) จะได้

$$R = \frac{T_C}{C_R} \tag{3.18}$$

จากสมการ (3.18) จะได้ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของคาบเวลา T_C กับค่าของตัวเก็บประจุ C_R เช่นเดียวกับสมการ (3.11) ดังนั้นถ้าพิจารณาจากรูปที่ 3.10(ข) ซึ่งเป็น วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่ยังไม่ได้แก้ปัญหาในเรื่องค่าตัวเก็บประจุแฝงสามารถเขียนวงจรใหม่ได้ โดยการเพิ่มสวิตช์เข้ามาอีก 2 ตัวเพื่อลดผลของค่าตัวเก็บประจุแฝงดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์อินทิเกรเตอร์ที่ลดผลของค่าตัวเก็บประจุแฝง

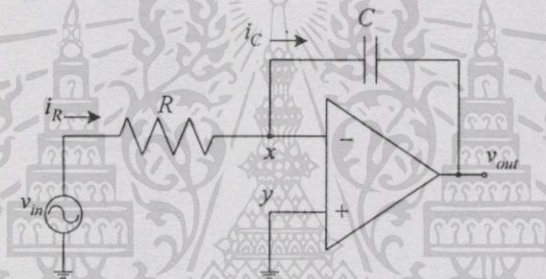
หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลักในการออกแบบวงจรวัดความถี่และวงจรรักษาพลังงาน ซึ่งมีรายละเอียดของวงจรดังนี้

3.5 วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator circuit)

วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นวงจรที่ทำให้เอาต์พุตขึ้นอยู่กับการอินทิเกรตของสัญญาณอินพุต ซึ่งวงจรอินทิเกรเตอร์ที่นำมาใช้จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ

3.5.1 วงจรมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์ (Miller's integrator)

วงจรอินทิเกรเตอร์แบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวงจรอินทิเกรเตอร์แบบกลับเฟส (inverting integrator) มีลักษณะของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์

เมื่อกำหนดให้ออปแอมป์มีคุณสมบัติทางอุดมคติ กล่าวคืออินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูงมากจนประมาณได้ว่าไม่มีกระแสไหลผ่านขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ จึงทำให้เสมือนว่าแรงดันอินพุตขั้วบวก v_y มีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตขั้วลบ v_x ของออปแอมป์ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต v_{in} และแรงดันเอาต์พุต v_{out} โดยการใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โหนด x เป็นดังนี้

$$i_R = i_C$$

$$\frac{v_{in} - v_x}{R} = C \frac{d}{dt} (v_x - v_{out}) \quad (3.19)$$

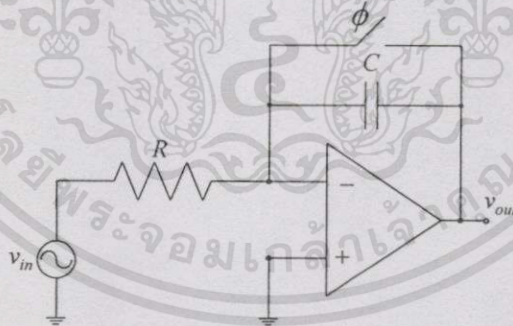
ซึ่ง $v_x = v_y = 0$ จะได้

$$\frac{v_{in}}{R} = -C \frac{dv_{out}}{dt} \quad (3.20)$$

ทำการอินทิเกรตทั้งสองข้างของสมการ (3.20) เทียบกับเวลา t จะได้

$$v_{out} = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{in} dt + V(0) \quad (3.21)$$

โดยที่ $V(0)$ เป็นค่าแรงดันเริ่มต้นของวงจรที่เวลา $t=0$ วินาที จากสมการ (3.21) จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการอินทิเกรตของแรงดันอินพุตและแปรผกผันกับค่าคงตัวของเวลา (time constant) RC ซึ่งเครื่องหมายลบจะแสดงถึงค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีเฟสตรงข้ามกับแรงดันอินพุต ในทางปฏิบัติเมื่อไม่มีการป้อนอินพุตให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์หรือ $v_{in} = 0$ จะทำให้วงจรตามรูปที่ 3.13 กลายเป็นวงจรขยายรูปเปิด เนื่องจากตัวเก็บประจุ C จะทำหน้าที่เสมือนเปิดวงจร อาจทำให้แรงดันเอาต์พุตเกิดผิดพลาด ดังนั้นอาจชดเชยวงจรโดยการใช้ตัวต้านทาน R ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C [25] เพื่อช่วยระบายประจุที่กักเก็บประจุ C ลงแต่อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การอินทิเกรตแบบวนรอบซ้ำๆ ซึ่งมีการทำให้ตัวเก็บประจุจะต้องคายประจุให้เป็นศูนย์ที่จุดปลายของแต่ละรอบการทำงาน ดังนั้นจึงทำได้ง่ายๆ โดยการต่อสวิตช์ขนานกับตัวเก็บประจุ C แสดงดังในรูปที่ 3.14



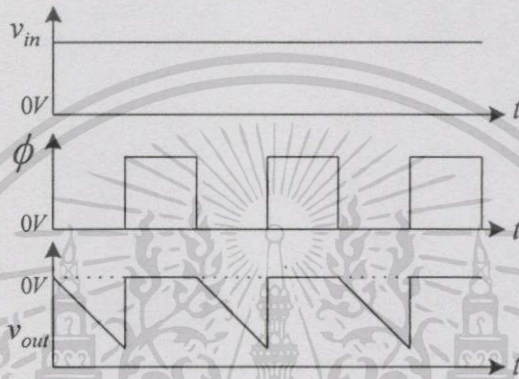
รูปที่ 3.14 วงจรมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์ที่ต่อสวิตช์เข้าไปในวงจร

จากวงจรตามรูปที่ 3.14 นี้ เมื่อกำหนดให้แรงดันอินพุตเป็นค่าคงที่หรือไฟตรงที่มีค่าเป็นบวก V_1 และสัญญาณ ϕ เป็นตัวควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยที่เวลาเริ่มต้นที่ $t=0$ ซึ่ง ϕ จะเป็นศูนย์หรือสวิตช์เปิดอยู่ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตเป็น

$$v_{out} = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_m dt$$

$$v_{out} = -\frac{1}{RC} V_1 t$$
(3.22)

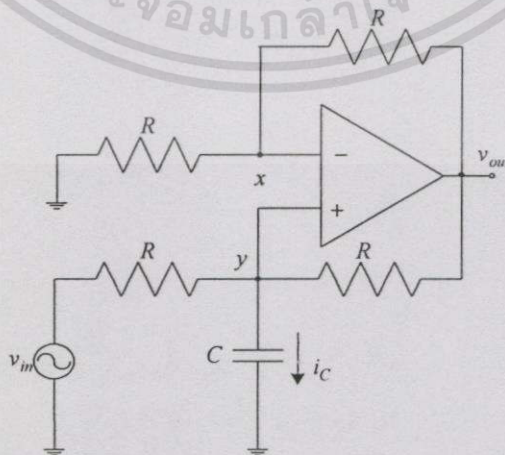
และเมื่อมีสัญญาณ ϕ มาควบคุมให้สวิตช์ปิดวงจรทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุอย่างรวดเร็วผ่านสวิตช์ ซึ่งลักษณะสัญญาณที่จุดต่างๆเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 3.15 รูปคลื่นสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรตามรูปที่ 3.14

3.6.2 วงจรดีโอบอินทิเกรเตอร์ (Deboo's integrator)

วงจรอินทิเกรเตอร์แบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่กลับเฟส (non-inverting integrator) มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรดีโอบอินทิเกรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้อุปแอมป์มีคุณสมบัติตามอุดมคติและอาศัยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ พิจารณาหาความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต จะได้ผลรวมของกระแสที่โหนด x มีค่าเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{v_x - 0}{R} + \frac{v_x - v_{out}}{R} &= 0 \\ \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R}\right)v_x - \frac{1}{R}v_{out} &= 0 \\ \frac{2}{R}v_x &= \frac{1}{R}v_{out}\end{aligned}\quad (3.23)$$

จะได้

$$v_x = \frac{v_{out}}{2} \quad (3.24)$$

และพิจารณาที่โหนด y

$$\begin{aligned}\frac{v_i - v_y}{R} &= i_C + \frac{v_y - v_{out}}{R} \\ \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R}\right)v_y - \frac{1}{R}v_{in} - \frac{1}{R}v_{out} + i_C &= 0\end{aligned}\quad (3.25)$$

เมื่อ $i_C = C \frac{dv_y}{dt}$ และเนื่องจาก $v_x = v_y$ เมื่อนำสมการ (3.24) แทนลงใน (3.25) จะได้

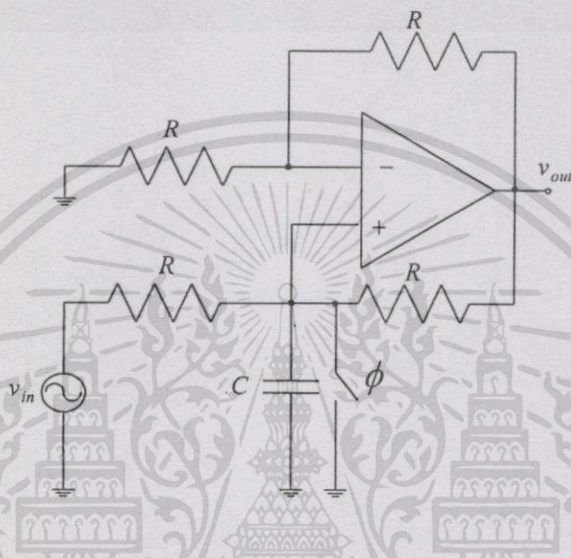
$$\begin{aligned}\frac{2}{R}\left(\frac{v_{out}}{2}\right) - \frac{1}{R}v_{in} - \frac{1}{R}v_{out} + \frac{C}{2}\frac{dv_{out}}{dt} &= 0 \\ \frac{dv_{out}}{dt} &= \frac{2}{RC}v_{in}\end{aligned}\quad (3.26)$$

ทำการอินทิเกรตทั้งสองข้างเทียบกับเวลา t

$$v_{out} = \frac{2}{RC} \int_0^t v_{in} dt + V(0) \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.27) จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอินทิเกรตของแรงดันอินพุตและแปรผกผันกับค่าคงตัวเวลา RC และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีเฟสเดียวกันกับสัญญาณอินพุตและเมื่อนำวงจรอินทิเกรเตอร์แบบนี้ไปใช้งานกับระบบการทำงานแบบวนรอบซ้ำๆ ก็จะสามารถทำได้เช่นเดียวกับกรณีของวงจรมัลติเพล็กซ์อินทิเกรเตอร์กล่าวคือนำสวิตช์มาต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 3.17



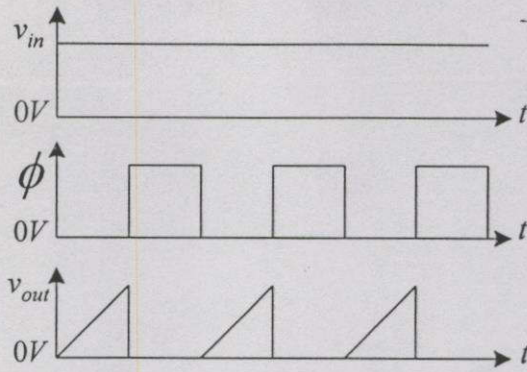
รูปที่ 3.17 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ต่อสวิตช์เข้าในวงจร

วงจรตามรูปที่ 3.17 เมื่อป้อนอินพุตเป็นไฟตรงที่มีค่าเป็นบวกให้กับวงจร การอินทิเกรตจะเกิดขึ้นในช่วงที่สวิตช์เปิดวงจร โดยมีสัญญาณ ϕ เป็นตัวควบคุมการเปิดและปิดของสวิตช์ เมื่อสมมติเวลาเริ่มต้นที่ $t=0$ จะได้

$$v_{out} = \frac{2}{RC} \int_0^t v_{in} dt \quad (3.28)$$

$$v_{out} = \frac{2}{RC} v_{in} t$$

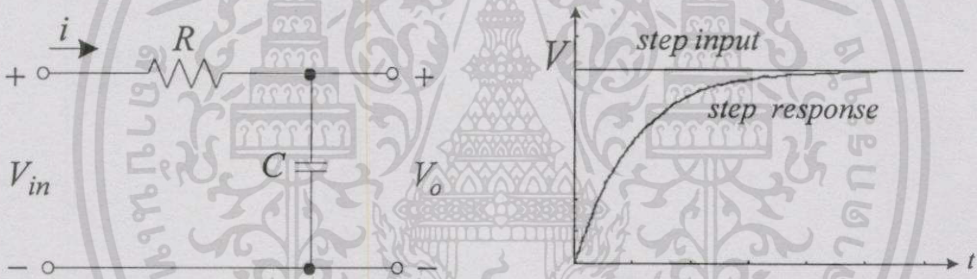
และเมื่อมีสัญญาณมาควบคุมให้สวิตช์ปิดวงจรก็จะทำให้ตัวเก็บประจุ C คายประจุอย่างรวดเร็วผ่านทางสวิตช์ซึ่งจะทำให้ค่าเริ่มต้นของวงจรโดยมีค่าเป็นศูนย์ ความสัมพันธ์ของรูปคลื่นที่จุดต่างๆ เขียนได้ดังนี้



รูปที่ 3.18 รูปคลื่นสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรตามรูปที่ 3.17

3.7 วงจรอาร์ซี (RC circuit)

วงจรอาร์ซีแบบพื้นฐาน แสดงดังรูปที่ 3.19



(ก) วงจร (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 3.19 (ก)

รูปที่ 3.19 วงจรอาร์ซี (RC)

เมื่อทำการป้อนแรงดันอินพุตเป็น V_{in} ผ่านวงจรอาร์ซีตามรูปที่ 3.19(ก) จะได้แรงดันเอาต์พุตคือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_o สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ทางศักดาของวงจรได้เป็น [17]

$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (3.29)$$

เมื่อ $\tau = RC$ เป็นค่าคงตัวเวลาของวงจร ถ้าสมมติให้แรงดันอินพุตเป็นฟังก์ชันแบบขั้น (step function) ที่มีขนาดเป็น V จะได้แรงดันเอาต์พุตเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o(s) = \frac{V}{I + \tau s} \frac{1}{s} \quad (3.30)$$

ใช้วิธีแยกเศษส่วนย่อย

$$V_o(s) = \frac{A}{I + \tau s} + \frac{B}{s}$$

จะได้เอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยการแปลงลาปลาซผกผัน (inverse Laplace 's transform) ดังนี้

$$V_o(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B \quad (3.31)$$

โดยที่ค่า A และ B เป็นแรงดันค่าเริ่มต้นและแรงดันค่าสุดท้ายตามลำดับ เมื่อสมมติให้แรงดันเริ่มต้นที่เวลา $t=0$ มีค่าเป็น $V_i = 0$ V และแรงดันค่าสุดท้ายที่เวลา $t=\infty$ มีค่าเป็น $V_f = V$ โวลต์ แทนค่าลงในสมการ (3.31) จะได้ค่า A และ B เป็น

$$V_o(0) = Ae^0 + B = 0$$

$$V_o(\infty) = Ae^{-\infty} + B = V$$

นั่นคือ $B = V$ และ $A = -V$ ดังนั้นจะได้แรงดันเอาต์พุตที่เวลาใดๆมีค่าเป็น

$$V_o(t) = -Ve^{-\frac{t}{\tau}} + V = V(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.32)$$

สมการ (3.32) วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_{in} กับแรงดันเอาต์พุต V_o ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.19(ข) ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นกราฟเอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential curve) ที่วิ่งเข้าสู่ค่าสุดท้ายคือเข้าสู่ระดับของสัญญาณอินพุตเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำวงจรอาร์ชีทำงานร่วมกับวงจรสมิทท์ทริกเกอร์เพื่อสร้างเป็นวงจรหน่วงเวลาในวงจรยกกำลัง ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5

3.8 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparators)

วงจรเปรียบเทียบแรงดันเป็นวงจรที่ให้แรงดันเอาต์พุตที่เป็นไปได้ 2 ระดับคือแรงดันอิ่มตัวด้านบวก $+V_{sat}$ และแรงดันอิ่มตัวด้านลบ $-V_{sat}$ ขึ้นอยู่กับอินพุตที่ป้อน โดยผลต่างขึ้นระหว่างขั้วอินพุตทั้งสองเป็นตัวกำหนดแรงดันเอาต์พุต ซึ่งในการเปรียบเทียบค่าของแรงดันโดยมากแล้วจะใช้โอปแอมป์ ถึงแม้ว่าโอปแอมป์โดยทั่วไปนั้นจะสามารถใช้เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันได้ แต่ก็มีไอซีที่สร้างขึ้นมาเฉพาะสำหรับใช้เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ตัวอย่างเช่น LM311 LM393 NE527 เป็นต้น ไอซีเหล่านี้ออกแบบมาเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว มีอัตราสโลว์ (slew rate) สูงเมื่อเทียบกับโอปแอมป์ทั่วไป ดังนั้นเมื่อนำมาใช้งานจริงก็ควรเลือกใช้ไอซีเปรียบเทียบแรงดันแทนที่จะใช้โอปแอมป์ [21,22]

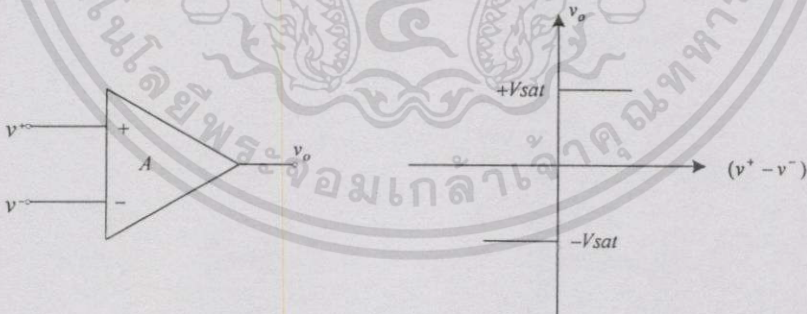
ต่อไปจะกล่าวถึงการใช้ออปแอมป์ทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยแบ่งเป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ

-วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบลูปเปิด (open-loop voltage comparators)

-วงจรเปรียบเทียบแรงดันที่ป้อนกลับแบบบวก (comparator with positive feedback) หรือ วงจรชmitt ทรigger (Schmitt trigger)

3.8.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบลูปเปิด

วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบลูปเปิดโดยใช้ออปแอมป์ทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันแสดงดังรูปที่ 3.20



(ก) ออปแอมป์ลูปเปิด

(ข) กราฟคุณลักษณะของวงจร

รูปที่ 3.20 ออปแอมป์ทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จากรูปที่ 3.20(ก) สมมติให้แรงดันอินพุตที่ขาบวกและขาลบของออปแอมป์เป็น v^+ และ v^- ตามลำดับ และ A คืออัตราขยายลูปเปิดของออปแอมป์ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตเป็นดังนี้

$$v_o = A(v^+ - v^-) = Av_d \quad (3.33)$$

เมื่อ v_d คือผลต่างของแรงดันอินพุตทั้งสองเท่ากับ $v^+ - v^-$ เนื่องจากว่าออปแอมป์ในอุดมคตินั้น A จะมีค่าสูงมากจนถึงอนันต์ และเมื่อป้อนแรงดันอินพุตทั้งสองมีค่าแตกต่างกันเกิดขึ้นเอาต์พุตที่ได้ตาม (3.33) จะเป็นอนันต์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ทางปฏิบัติ ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้จะถูกจำกัดโดยไฟเลี้ยงวงจรซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าไฟเลี้ยงวงจรประมาณ 1 โวลต์ เรียกเอาต์พุตนี้ว่าแรงดันอิ่มตัว เช่นเมื่อป้อนไฟเลี้ยงให้กับวงจร ± 12 โวลต์ แรงดันอิ่มตัวด้านบวกจะมีค่าประมาณ 11 โวลต์และแรงดันอิ่มตัวด้านลบมีค่าประมาณ -11 โวลต์ ดังนั้นเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตใหม่ได้เป็น

$$v_o = +V_{sat} \quad \text{เมื่อ} \quad v^+ > v^- \quad (3.34 \text{ ก})$$

และ

$$v_o = -V_{sat} \quad \text{เมื่อ} \quad v^+ < v^- \quad (3.34 \text{ ข})$$

จากสมการ (3.34) เขียนกราฟคุณลักษณะของวงจรได้ดังรูปที่ 3.20(ข) จะเห็นว่าเมื่อผลต่างของแรงดันอินพุตมีเครื่องหมายเป็นบวก เอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็น $+V_{sat}$ และเมื่อผลต่างของแรงดันอินพุตมีเครื่องหมายเป็นลบ เอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็น $-V_{sat}$ ดังนั้นวงจรเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงจะแบ่งตามขั้วอินพุตที่ป้อน โดยให้ขั้วใดขั้วหนึ่งเป็นแรงดันอ้างอิงได้แก่

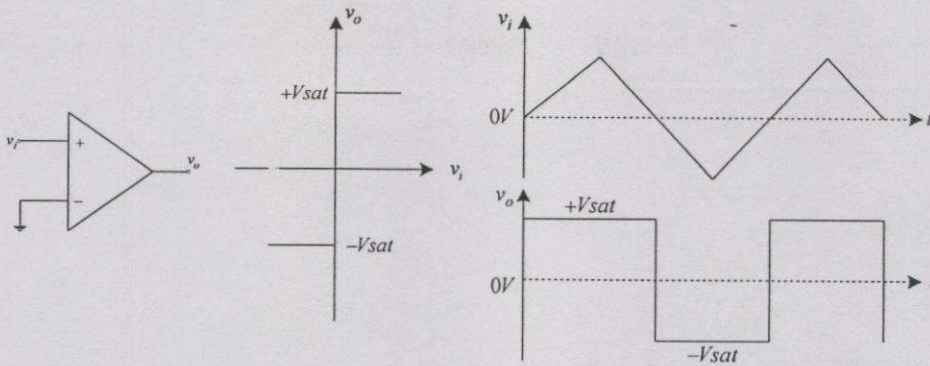
-วงจรเปรียบเทียบกับแรงดันแบบไม่กลับเฟส (non-inverting comparator) ใช้การป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขั้วบวกของออปแอมป์ ส่วนขั้วลบจะมีแรงดันอ้างอิงไว้ ถ้าค่าของแรงดันอ้างอิงเป็นศูนย์โวลต์จะเรียกว่าวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero crossing detector; ZCD) แบบไม่กลับเฟส

-วงจรเปรียบเทียบกับแรงดันแบบกลับเฟส (inverting comparator) ใช้วิธีป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขั้วลบของออปแอมป์ ส่วนขั้วบวกจะใช้สำหรับแรงดันอ้างอิงซึ่งแรงดันอ้างอิงถ้าค่าของแรงดันอ้างอิงเป็นศูนย์โวลต์จะเรียกว่าวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero crossing detector; ZCD) แบบกลับเฟส

สำหรับรายละเอียดของวงจรเปรียบเทียบกับแรงดันแบบต่างๆเป็นดังนี้

3.8.1.1 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์แบบไม่กลับเฟส

วงจรอย่างง่ายของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์แบบไม่กลับเฟส แสดงดังรูปที่ 3.21(ก) โดยอินพุตป้อนเข้าที่ขั้วบวกของออปแอมป์ ส่วนขั้วลบป้อนค่าแรงดันอ้างอิงที่มีค่าเป็นศูนย์โวลต์หรือต่อลงกราวด์ ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จะเปลี่ยนสถานะเมื่ออินพุตตัดผ่านแรงดันที่ศูนย์โวลต์



(ก) วงจร (ข) กราฟคุณลักษณะของวงจร (ค) ตัวอย่างรูปคลื่นอินพุต (v_i) และเอาต์พุต (v_o)

รูปที่ 3.21 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์แบบไม่กลับเฟส

เอาต์พุตที่ได้คือ

$$v_o = +V_{sat} \quad \text{เมื่อ} \quad v_i > 0 \quad (3.35ก)$$

และ

$$v_o = -V_{sat} \quad \text{เมื่อ} \quad v_i < 0 \quad (3.35ข)$$

จากสมการ (3.35) สามารถเขียนกราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานของวงจรได้ตามรูปที่ 3.21(ข) สำหรับตัวอย่างการนำไปใช้งานโดยสมมติให้อินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมผ่านวงจร ZCD แบบไม่กลับเฟส จะได้ว่ารูปคลื่นเอาต์พุตที่ตัดผ่านศูนย์ แสดงดังรูปที่ 3.21(ค)

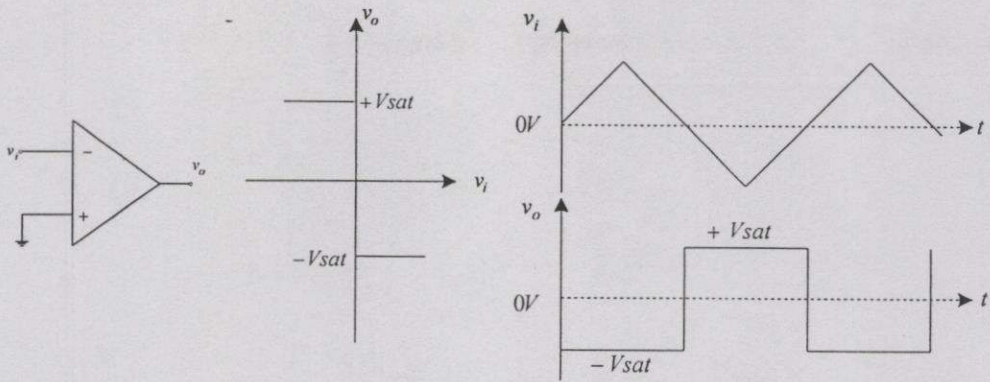
3.8.1.2 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์แบบกลับเฟส

จากรูปที่ 3.21(ก) เมื่อทำการสลับขั้วอินพุตทั้งสอง จะได้ว่าวงจรดังรูปที่ 3.22(ก) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$v_o = +V_{sat} \quad \text{เมื่อ} \quad v_i < 0 \quad (3.36ก)$$

และ

$$v_o = -V_{sat} \quad \text{เมื่อ} \quad v_i > 0 \quad (3.36ข)$$

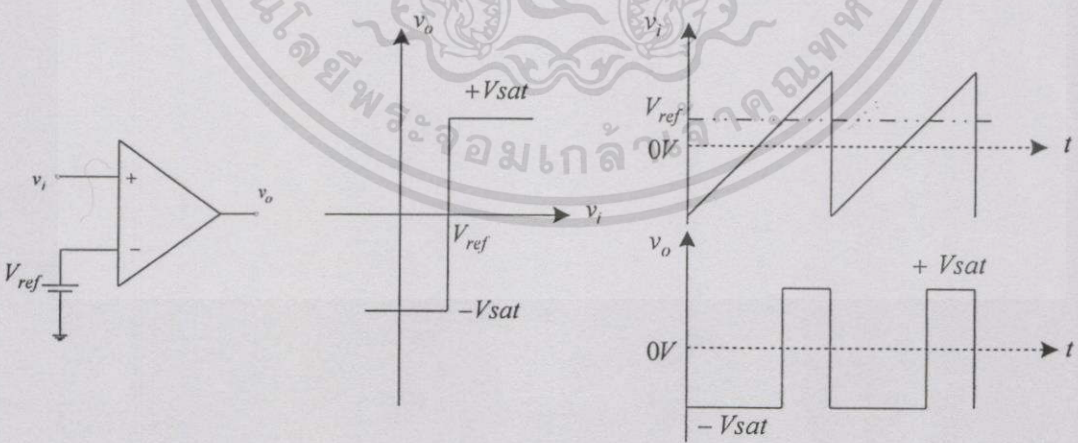


(ก) วงจร (ข) กราฟคุณลักษณะของวงจร (ค) ตัวอย่างรูปคลื่นอินพุต (v_i) และเอาต์พุต (v_o)

รูปที่ 3.22 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์แบบกลับเฟส

รูปที่ 3.22(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต ถ้า $v_i < 0$ แล้วจะได้ $v_o > 0$ และถ้า $v_i > 0$ ก็จะได้ $v_o < 0$ เมื่อทำการป้อนอินพุตที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมเข้าไปในวงจร ZCD แบบกลับเฟสจะได้เอาต์พุตที่ตัดผ่านศูนย์ดังรูปที่ 3.22(ค)

3.8.1.3 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบไม่กลับเฟสที่แรงดันอ้างอิงมีค่าไม่เป็นศูนย์
 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบนี้แสดงดังรูปที่ 3.23



(ก) วงจร (ข) กราฟคุณลักษณะของวงจร (ค) ตัวอย่างรูปคลื่นอินพุต (v_i) และเอาต์พุต (v_o)

รูปที่ 3.23 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบไม่กลับเฟสที่แรงดันอ้างอิงมีค่าไม่เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 3.23(ก) สัญญาณอินพุตป้อนเข้าขั้วบวก ส่วนขั้วลบป้อนแรงดันอ้างอิงมีค่าเป็น V_{ref} เมื่อระดับสัญญาณอินพุตต่ำกว่าแรงดันอ้างอิงก็จะทำให้ได้ผลต่างของแรงดันมีค่าเป็นลบและเอาต์พุตที่ได้เป็นแรงดันอิมิต์วด้านลบ ในทำนองเดียวกันเมื่อแรงดันอินพุตมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงค่าความแตกต่างของแรงดันอินพุตจะกลายเป็นค่าบวกและเอาต์พุตจะเปลี่ยนเป็นระดับแรงดันอิมิต์วด้านบวก เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$v_o = -V_{sat} \text{ เมื่อ } v_i < V_{ref} \tag{3.37 ก}$$

และ

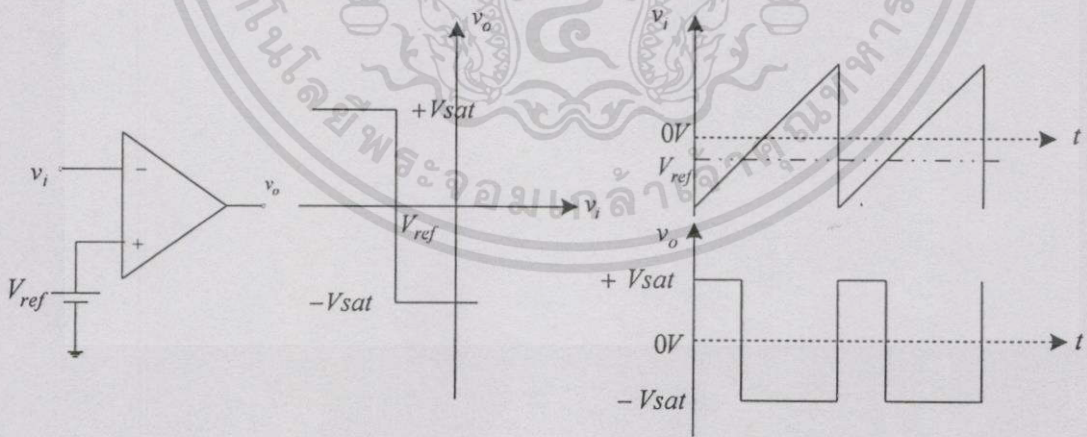
$$v_o = +V_{sat} \text{ เมื่อ } v_i > V_{ref} \tag{3.37 ข}$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตได้ดังรูปที่ 3.23(ข) และแสดงตัวอย่างของรูปคลื่นโดยกำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณฟันเลื่อยป้อนเข้าไปในวงจรตามรูปที่ 3.23(ก) และสมมติให้แรงดันอ้างอิงมีค่าเป็นบวก จะได้รูปคลื่นเอาต์พุตเป็นดังรูปที่ 3.23(ค)

3.8.1.4 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบกลับเฟสที่แรงดันอ้างอิงมีค่าไม่เป็นศูนย์

ถ้าทำการสลับขั้วอินพุตทั้งสอง โดยทำการป้อนอินพุตที่ขั้วลบและป้อน

แรงดันอ้างอิงเข้าที่ขั้วบวก ได้วงจรตามรูปที่ 3.24(ก)



(ก) วงจร (ข) กราฟคุณลักษณะของวงจร (ค) ตัวอย่างรูปคลื่นอินพุต (v_i) และเอาต์พุต (v_o)

รูปที่ 3.24 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบกลับเฟสที่แรงดันอ้างอิงมีค่าไม่เป็นศูนย์

เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าเป็นลบแต่มีขนาดมากกว่าแรงดันอ้างอิง ผลต่างของแรงดันอินพุตจะเป็นบวกและเอาต์พุตที่ได้จะเป็นแรงดันอิมิต์ตัวดันบวก และในทำนองเดียวกันเมื่อระดับสัญญาณของอินพุตมีค่าเป็นบวกมากกว่าแรงดันอ้างอิง ผลต่างของแรงดันอินพุตจะกลายเป็นลบและเอาต์พุตจะอยู่ที่แรงดันอิมิต์ตัวดันลบ สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการเป็น

$$v_o = +V_{sat} \quad \text{เมื่อ} \quad v_i < V_{ref} \quad (3.38ก)$$

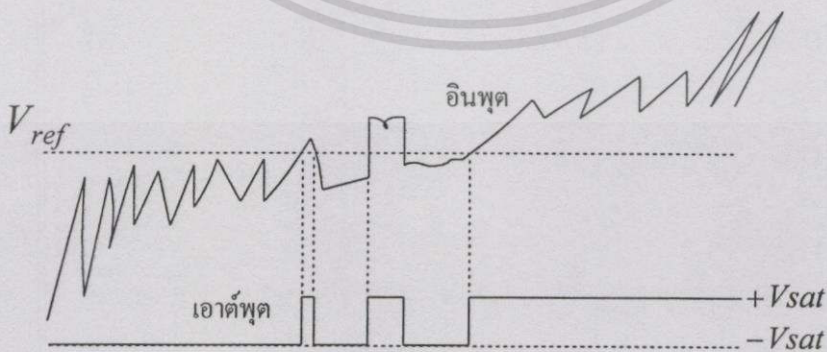
และ

$$v_o = -V_{sat} \quad \text{เมื่อ} \quad v_i > V_{ref} \quad (3.38ข)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังในรูปที่ 3.24(ข) ส่วนตัวอย่างรูปคลื่นระหว่างสัญญาณอินพุตที่เป็นรูปฟันเลื่อยกับแรงดันอ้างอิงมีค่าเป็นลบ จะได้รูปคลื่นเอาต์พุตที่แสดงดังในรูปที่ 3.24(ค)

3.8.2 วงจรเปรียบเทียบแรงดันที่ป้อนกลับแบบบวก

วงจรเปรียบเทียบแรงดันอย่างง่ายหรือวงจรแบบลูปเปิดที่ได้กล่าวแล้วนั้น จะมีข้อเสียอยู่ 2 ประการคือ ประการแรกถ้าอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้ามาก มีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงสถานะของเอาต์พุตยังช้าส่งผลให้เกิดค่าความผิดพลาดที่เอาต์พุตได้และอีกประการหนึ่งคือถ้าอินพุตมีสัญญาณรบกวนปะปนมากับวงจร ทำให้เอาต์พุตที่ได้อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงหลายครั้งขึ้นอยู่กับการจำนวนครั้งที่ตัดแกนเวลา t ตามค่าของแรงดันอ้างอิง V_{ref} ที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 3.25 [23,24]

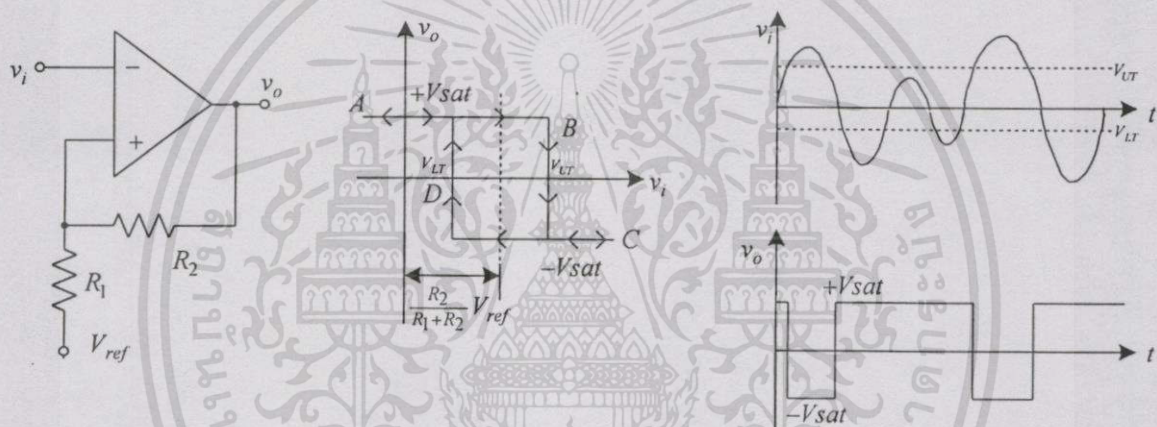


รูปที่ 3.25 วงจรเปรียบเทียบแรงดันที่มีอินพุตประกอบด้วยสัญญาณรบกวน

ปัญหาทั้งหมดนี้กำจัดได้โดยการใช้วิธีการป้อนกลับแบบบวกให้กับวงจรออปแอมป์ นั่นคือการเพิ่มฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis) ของวงจรมันเอง โดยที่ฮิสเตอร์รีซิสจะทำให้เอาต์พุตเปลี่ยนสถานะการทำงานก็ต่อเมื่ออินพุตเพิ่มขึ้นไปยังระดับหนึ่งที่กำหนดไว้ แต่เอาต์พุตจะไม่เปลี่ยนสถานะกลับจนกระทั่งอินพุตตกลงมาถึงอีกระดับหนึ่งที่กำหนดไว้ก่อน วงจรเปรียบเทียบกับแรงดันที่มีการทำงานเช่นนี้จะเรียกว่าวงจรชmitt ทรigger (Schmitt trigger) ซึ่งวงจรแบบนี้แบ่งเป็น 2 ลักษณะด้วยกันขึ้นอยู่กับว่าอินพุตป้อนเข้าขั้วใดของออปแอมป์ ได้แก่

3.8.2.1 วงจรชmitt ทรigger แบบกลับเฟส (inverting Schmitt trigger)

วงจรชmitt ทรigger แบบกลับเฟสแสดงดังรูปที่ 3.26



(ก) วงจร (ข) กราฟคุณลักษณะของวงจร (ค) ตัวอย่างรูปคลื่นอินพุต (v_i) และเอาต์พุต (v_o)

รูปที่ 3.26 วงจรชmitt ทรigger แบบกลับเฟส

ตามรูปที่ 3.26(ก) อินพุตจะต่ออยู่กับขั้วลบของออปแอมป์และนำวงจรแบ่งแรงดันมาต่อเข้ากับส่วนเอาต์พุตเพื่อแบ่งแรงดันนี้มาส่วนหนึ่งและป้อนเข้ากับอินพุตขั้วบวกของออปแอมป์โดยการต่อ R_2 ป้อนกลับมายังขั้วอินพุตบวกและแรงดันอ้างอิง V_{ref} ซึ่งอาจจะต่อเป็นกราวด์ก็ได้ ส่วนรูปที่ 3.26(ข) แสดงฮิสเตอร์รีซิสของวงจร ซึ่งจะเห็นว่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนสถานะเป็น $+V_{sat}$ ก็ต่อเมื่อแรงดันอินพุต v_i มีค่าต่ำกว่าระดับแรงดันขีดเริ่มด้านล่าง (lower threshold voltage; V_{LT}) ซึ่งจะคงค่าแรงดันเอาต์พุต $+V_{sat}$ นี้ไว้จนกระทั่งแรงดันอินพุต v_i เพิ่มขึ้นมาถึงระดับแรงดันขีดเริ่มด้านบน (upper threshold voltage; V_{UT}) เอาต์พุตก็จะเปลี่ยนสถานะจาก $+V_{sat}$ เป็น $-V_{sat}$ จะสังเกตได้ว่าเส้นตามแนวอนจะเริ่มเคลื่อนที่ขึ้น-ลงภายใต้ค่าของไฟเลี้ยงที่ป้อน ส่วนเส้นทางในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวตั้งจะเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกาเพื่อแสดงการทำงานของวงจร โดยที่เส้นบนแสดงถึงอินพุตที่เพิ่มขึ้นจากจุด A ไปยังจุด B เอาต์พุตก็จะเปลี่ยนสถานะจาก $+V_{sat}$ ไปเป็น $-V_{sat}$ ณ จุดที่แรงดันอินพุตที่ขั้วบวกของออปแอมป์เท่ากับแรงดันขีดเริ่มด้านสูงหรือ $v^+ = V_{UT}$ และเมื่อแรงดันอินพุต v_i ลดลงจากจุด C ไปยังจุด D เอาต์พุต v_o จะเปลี่ยนสถานะจาก $-V_{sat}$ ไปเป็น $+V_{sat}$ ทันที ณ จุดที่ $v^+ = V_{LT}$ ส่วนช่วงระหว่าง $V_{LT} \leq v_i \leq V_{UT}$ เอาต์พุตจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงเรียกว่า dead band หรือ dead zone หรือ hysteresis นั้นเอง

จากการวิเคราะห์ห้วงจรตามรูปที่ 3.26 ก จะได้

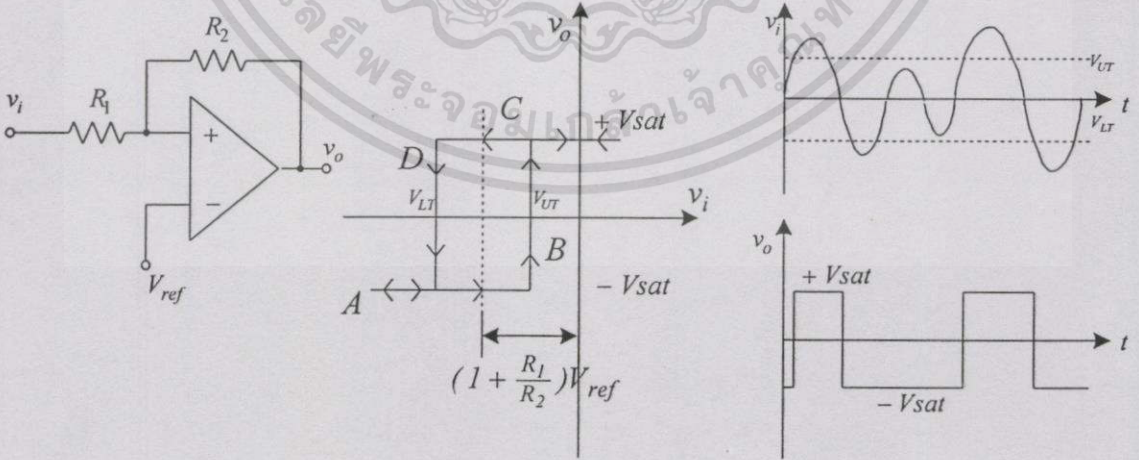
$$V_{UT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{ref} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat} \tag{3.39ก}$$

และ

$$V_{LT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{ref} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat} \tag{3.39ข}$$

3.8.2.2 วงจรขมิทท์ทริกเกอร์แบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Schmitt trigger)

วงจรขมิทท์ทริกเกอร์แบบนี้ มีดังแสดงในรูปที่ 3.27(ก) ซึ่งเป็นวงจรที่คล้ายกับรูปที่ 3.26(ก) จะแตกต่างกันที่อินพุตจะป้อนเข้าที่ขั้วบวกของออปแอมป์ ซึ่งใช้ R_2 เป็นตัวป้อนกลับมายังขั้วอินพุตบวก ส่วนขั้วอินพุตลบจะต่อกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} หรืออาจจะต่อเป็นกราวด์ก็ได้ ถ้าต่อลงกราวด์ $V_{ref} = 0$ โวลต์



(ก) วงจร (ข) กราฟคุณลักษณะของวงจร (ค) ตัวอย่างรูปคลื่นอินพุต (v_i) และเอาต์พุต (v_o)

รูปที่ 3.27 วงจรขมิทท์ทริกเกอร์แบบไม่กลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.27(ข) เป็นฮิสเตอร์รีซีตูลูปของวงจรมิติที่ทรานซิสเตอร์แบบไม่กลับเฟสโดยทิศทางของลูกศรจะคิดแบบทวนเข็มนาฬิกา เมื่อแรงดันเอาต์พุต $v_o = -V_{sat}$ โดยที่แรงดันอินพุต v_i มีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มด้านล่าง V_{LT} ซึ่งจะคงค่าแรงดันเอาต์พุต $-V_{sat}$ นี้ไว้ จนกระทั่งแรงดันอินพุต v_i เพิ่มขึ้นถึง V_{UT} เอาต์พุตก็จะเปลี่ยนสถานะจาก $-V_{sat}$ เป็น $+V_{sat}$ และเมื่อ $v_o = +V_{sat}$ โดยที่ v_i มีค่ามากกว่า V_{UT} ซึ่งจะคงค่าแรงดัน $+V_{sat}$ นี้ไว้จนกระทั่งแรงดันอินพุต v_i ต่ำกว่า V_{LT} เอาต์พุตก็จะเปลี่ยนสถานะจาก $+V_{sat}$ เป็น $-V_{sat}$ ค่าของแรงดันขีดเริ่มด้านล่าง V_{UT} และแรงดันขีดเริ่มด้านล่าง V_{LT} ของวงจรมีการวิเคราะห์ได้ดังนี้

$$V_{UT} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{ref} + \frac{R_1}{R_2} V_{sat} \quad (3.40ก)$$

และ

$$V_{LT} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} V_{sat} \quad (3.40ข)$$

จากฮิสเตอร์รีซีตูลูปที่ได้กล่าวมาเป็นการกล่าวถึงระบบที่มีการจดจำ นั่นคือเวลาขณะใดขณะหนึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าเวลาปัจจุบันของอินพุตเท่านั้นแต่ขึ้นอยู่กับอินพุตในอดีต ดังนั้นวงจรมิติที่ทรานซิสเตอร์จึงเป็นวงจรมัลติสแตเบิ้ลไบเบิล (bistable multivibrator) ที่มีการเสถียรของเอาต์พุตอยู่สองค่า คือสถานะที่เอาต์พุตมีค่าเป็น $+V_{sat}$ และสถานะที่เอาต์พุตมีค่าเป็น $-V_{sat}$ เมื่อนำอินพุตออกจากวงจรถัดไปวงจรมีการจดจำได้ว่าแรงดันนั้นอยู่เหนือหรือต่ำกว่าแรงดันอินพุตอ้างอิงที่กำหนดไว้โดยวงจรมีการกำเนิดสัญญาณขึ้นใหม่ได้แม้ว่าไม่มีอินพุตป้อนให้กับวงจรถัดไป นอกจากนั้นวงจรมิติที่ทรานซิสเตอร์ยังสร้างเป็นวงจรมัลติสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมโดยสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจรมีการจดจำเป็นสัญญาณต่อเนื่อง เช่นสัญญาณไซน์ เป็นต้น ซึ่งได้เอาต์พุตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว 2 ระดับ การเปลี่ยนสถานะของเอาต์พุตจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อสัญญาณอินพุตตัดผ่านระดับแรงดันอ้างอิงที่กำหนดไว้

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำวงจรมัลติสัญญาณทั้งสองรูปแบบมาทำหน้าที่เป็นวงจรมัลติสัญญาณนาฬิกาเพื่อไปควบคุมอนุกรมการสวิทช์ในการออกแบบวงจรมัลติสัญญาณและวงจรมัลติสัญญาณโดยรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 4

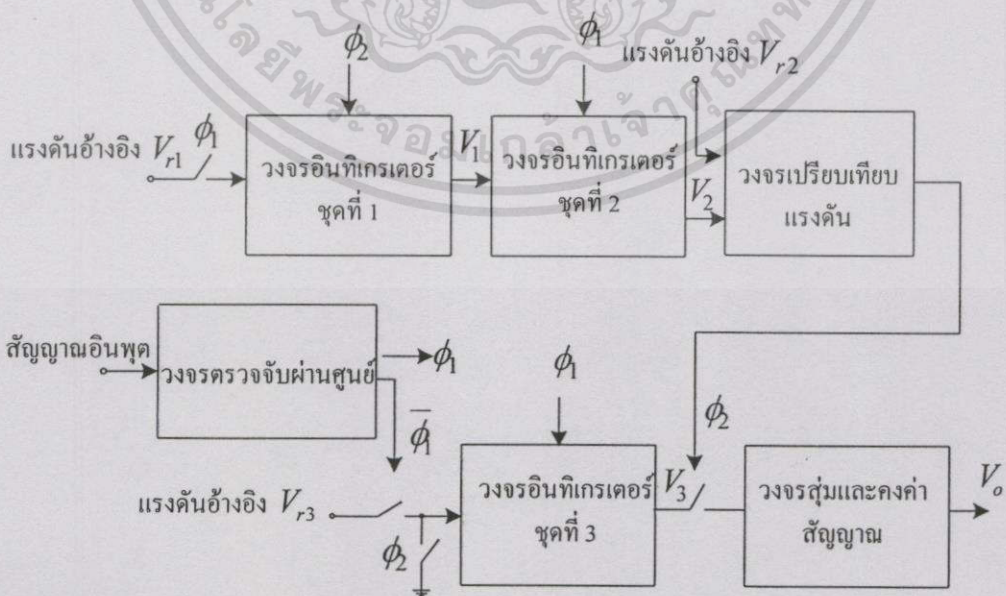
วงจรวัดความถี่ที่นำเสนอ

4.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีของวงจรต่างๆที่ใช้ในการออกแบบวงจรของวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ทฤษฎีการสุ่มค่าสัญญาณ วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ วงจรอนาล็อกสวิตช์ วงจรอาร์ซี วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ วงจรอินทิเกรเตอร์ และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน สำหรับในบทนี้จะเป็นการนำหลักการต่างๆที่ได้กล่าวไปแล้วมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นวงจรวัดความถี่ โดยมีหลักการในการออกแบบและสร้างเป็นดังนี้

4.2 หลักการ

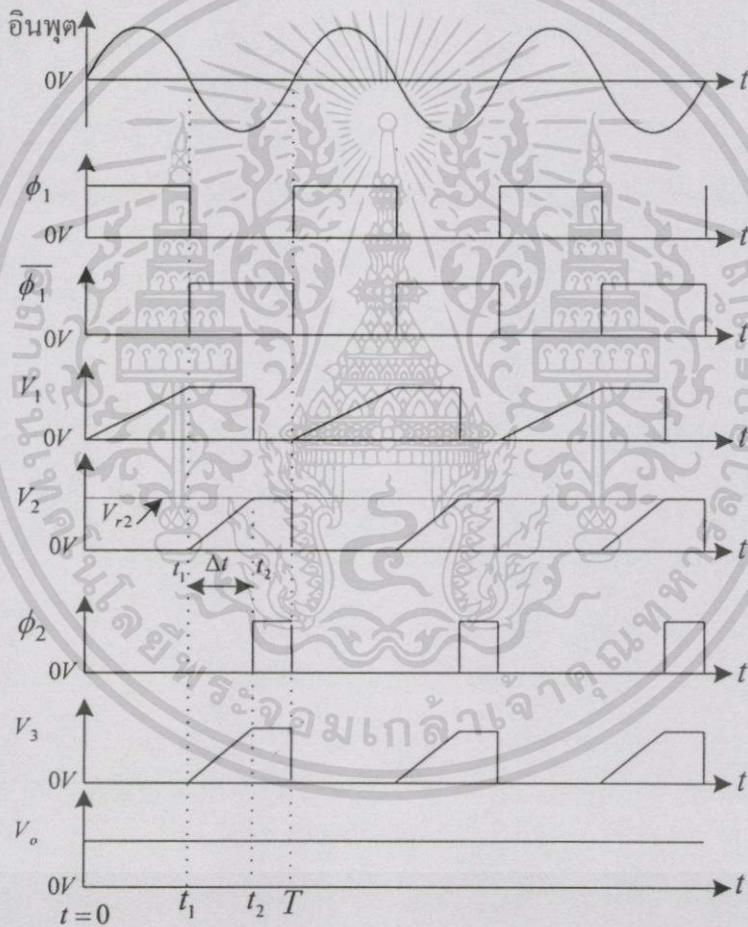
วงจรวัดความถี่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ทำงานร่วมกับหลักการสุ่มค่าสัญญาณ หลักการเบื้องต้นของวงจรวัดความถี่จะแบ่งการทำงานของวงจรออกเป็น 2 สถานะคือเริ่มจากสถานะแรกเป็นช่วงเวลาครึ่งคาบแรกของสัญญาณอินพุต วงจรจะทำหน้าที่วัดคาบเวลาของสัญญาณอินพุต จากนั้นในช่วงเวลาครึ่งคาบหลังของสัญญาณอินพุต วงจรจึงทำการแปลงค่าผลจากการประมวลผลของส่วนแรกให้เป็นแรงดันที่มีค่าแปรตามความถี่ของสัญญาณอินพุต ซึ่งมีแผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.1 และตัวอย่างรูปคลื่นตามจุดต่างๆที่สำคัญแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แผนผังของวงจรวัดความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ 3 ชุด วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน จังหวะในการทำงานของวงจรถูกควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกาที่สร้างมาจากการผ่านสัญญาณอินพุตที่ต้องการเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไปในวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ ซึ่งสัญญาณอินพุตอาจจะเป็นคลื่นรูปไซน์หรือรูปสามเหลี่ยมหรือสัญญาณลักษณะใดก็ได้ที่มีความสมมาตรกันระหว่างครึ่งคาบเวลา ในที่นี้สมมติให้สัญญาณอินพุตเป็นคลื่นรูปไซน์ ที่มีคาบเวลาสมมาตรระหว่างครึ่งคาบเวลาให้เป็นสัญญาณนาฬิกา 2 เฟส คือ ϕ_1 และ $\bar{\phi}_1$ ที่มีเฟสตรงข้ามกัน ดังรูปคลื่นแถบที่ 2 และ 3 ในรูปที่ 4.2 การทำงานของวงจรในหนึ่งรอบการทำงานอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆของวงจรวัดความถี่ตามรูปที่ 4.1

ในช่วงครึ่งคาบแรกของสัญญาณอินพุต วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 จะถูกควบคุมโดยสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ให้อินทิเกรตแรงดันอ้างอิง V_{r1} ตลอดช่วงระยะเวลาที่ ϕ_1 เป็นบวกหรือตลอด

$$\begin{aligned}
 V_1\left(\frac{T}{2}\right) &= \alpha_1 \int_0^{\frac{T}{2}} V_{r1} dt \\
 &= \frac{\alpha_1 V_{r1} T}{2}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

เมื่อ α_1 คืออัตราการขยายของวงจรรีโวลูเตอร์ชุดที่ 1

ในช่วงเวลาครึ่งคาบหลังของสัญญาณอินพุต กล่าวคือเมื่อสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 เป็นศูนย์ แรงดันอ้างอิง V_{r1} จะถูกตัดออกจากอินพุตของวงจรรีโวลูเตอร์ชุดที่ 1 ซึ่งทำให้ไม่มีอินพุตเข้ามายังวงจรรีโวลูเตอร์ชุดที่ 1 ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุต V_1 มีค่าคงที่เท่ากับค่าที่อินทิเกรตได้ในช่วงเวลาที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_1 เป็นบวก และจะคงค่าแรงดัน $V_1\left(\frac{T}{2}\right)$ นี้ไว้ ซึ่งค่าแรงดันนี้จะนำไปเป็นอินพุตให้แก่วงจรรีโวลูเตอร์ชุดที่ 2 ให้ทำการอินทิเกรตสัญญาณไปด้วยเวลาตั้งแต่ $\frac{T}{2}$ ไปจนกระทั่งเวลาที่เอาต์พุตของวงจรรีโวลูเตอร์ชุดที่ 2 คือ V_2 มีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิง V_{r2} ซึ่งทำได้โดยการนำแรงดัน V_2 ไปเปรียบเทียบกับระดับแรงดันอ้างอิง V_{r2} จะให้เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันหรือสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 ที่มีค่าเป็นศูนย์เมื่อ V_2 น้อยกว่า V_{r2} และให้เอาต์พุตวงจรเปรียบเทียบแรงดันมีค่าเป็นบวกเมื่อ V_2 มากกว่า V_{r2} ซึ่งเอาต์พุตจากวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่ได้นี้จะนำไปรีเซ็ตวงจรรีโวลูเตอร์ชุดที่ 1 เพื่อตัดอินพุตออกจากวงจรรีโวลูเตอร์ชุดที่ 2 และยังสามารถนำสัญญาณ ϕ_2 ไปใช้ในการควบคุมจังหวะการทำงานของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณให้ทำการซึกและคงค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรรีโวลูเตอร์ชุดที่ 3 อีกด้วย ซึ่งถ้ากำหนดให้ช่วงเวลาที่ V_2 มีค่าเท่ากับ V_{r2} คือ Δt และขณะเวลาที่ $V_2(t)$ เท่ากับ V_{r2} คือ t_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้คือ

$$V_2(t_2) = \alpha_2 V_1\left(\frac{T}{2}\right) \Delta t = V_{r2}
 \tag{4.2}$$

เมื่อ α_2 คืออัตราการขยายของวงจรรีโวลูเตอร์ชุดที่ 2

จากสมการ (4.2) หาช่วงเวลา Δt ได้โดยการแทนสมการ (4.1) ลงในสมการ (4.2) จะได้

$$\Delta t = \frac{2V_{r2}}{\alpha_1 \alpha_2 V_{r1} T}
 \tag{4.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (4.3) จะเห็นว่า Δt มีค่าแปรผกผันกับคาบเวลา T ของสัญญาณอินพุต ซึ่งก็คือ Δt นั้นแปรผันโดยตรงกับความถี่ของสัญญาณอินพุต การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่างๆนี้ มีแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า ϕ_1 และ ϕ_2 จะควบคุมการทำงานในช่วงเวลาครึ่งคาบหลังของสัญญาณอินพุต ซึ่งการแปลงค่าในช่วงเวลาที่วงจรมินิเกรเตอร์ชุดที่ 2 ใช้ในการอินทิเกรตสัญญาณนี้เป็นแรงดัน ทำได้โดยการใช้วงจรมินิเกรเตอร์ชุดที่ 3 ทำการอินทิเกรตแรงดันอ้างอิง V_{r3} ในช่วงระยะเวลาเดียวกับที่วงจรมินิเกรเตอร์ชุดที่ 2 ทำการอินทิเกรตสัญญาณ V_1 นั่นคือวงจรมินิเกรเตอร์ชุดที่ 3 จะทำการอินทิเกรตสัญญาณ V_{r3} ไปเป็นระยะเวลา Δt ทั้งนี้โดยมีสัญญาณ ϕ_2 เป็นตัวจำกัดช่วงเวลานี้ซึ่งทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุต V_3 ดังนี้

$$V_3(t_2) = \alpha_3 V_{r3} \Delta t \quad (4.4)$$

เมื่อ α_3 คืออัตราขยายของวงจรมินิเกรเตอร์ชุดที่ 3

เมื่อเวลามีค่ามากกว่า t_2 ตามรูปที่ 4.2 แรงดัน V_3 นี้จะคงที่เรื่อยไปจนกระทั่งมีสัญญาณ ϕ_1 เข้ามา แรงดันเอาต์พุต V_3 ก็ตกลงมาเป็นศูนย์และในช่วงเวลาที่ V_3 คงที่นั้นจะมีการสุ่มและคงค่าแรงดันออกไปเป็นแรงดันเอาต์พุต V_o โดยใช่วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณทำให้ได้ V_o ออกมาและจะคงค่าแรงดันนี้ไว้ตลอดคาบเวลา T เมื่อทำการแทนค่า Δt ตามสมการ (4.3) ลงในสมการ (4.4) เขียนความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต V_o กับค่าตัวแปรอื่นในวงจรได้ดังนี้

$$V_o = V_3(t_2) = \frac{2\alpha_3 V_{r2} V_{r3}}{\alpha_1 \alpha_2 V_{r1} T} \quad (4.5)$$

เมื่อกำหนดให้ f_{in} คือความถี่ของสัญญาณอินพุตซึ่งเท่ากับ $\frac{1}{T}$ เขียนสมการ (4.5) ใหม่ได้เป็น

$$V_o = \frac{2\alpha_3 V_{r2} V_{r3}}{\alpha_1 \alpha_2 V_{r1}} f_{in} \quad (4.6)$$

$$V_o = k f_{in} \quad (4.7)$$

เมื่อ $k = \frac{2\alpha_3 V_{r2} V_{r3}}{\alpha_1 \alpha_2 V_{r1}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ k เป็นค่าคงที่ในการแปลงค่าอินพุตเป็นเอาต์พุต (sensitivity หรือ gain)

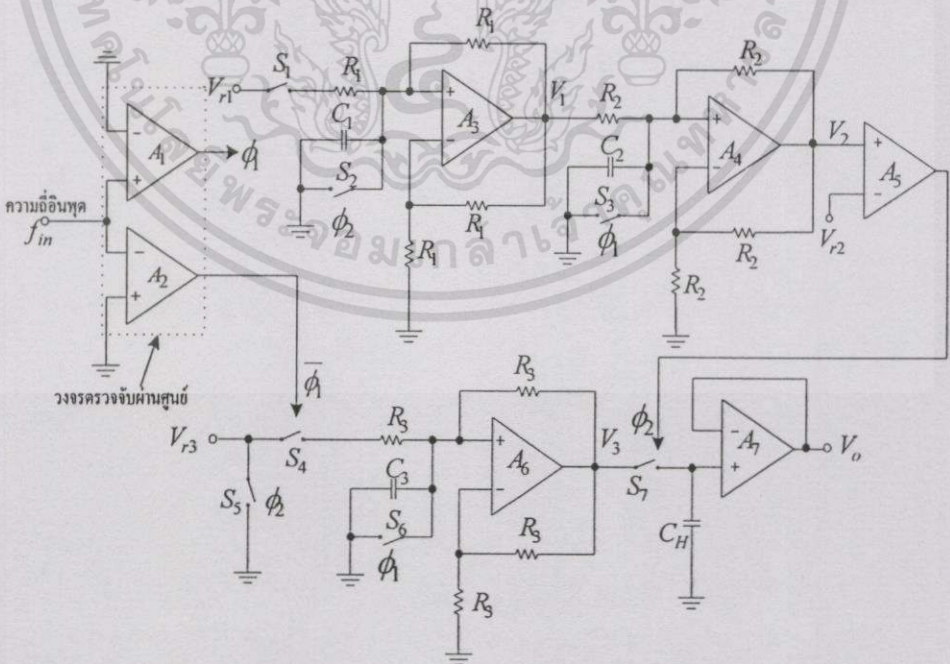
จากสมการ (4.7) แสดงให้เห็นว่าวงจรมีคุณสมบัติตามหลักการคือสัญญาณเอาต์พุตมีค่าแปรผัน โดยตรงกับความถี่อินพุตและที่ความถี่ค่าหนึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง

4.3 การออกแบบวงจร

ในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบวงจรวัดความถี่โดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นวงจรหลักในการออกแบบทำงานร่วมกับหลักการสุ่มค่าสัญญาณ ซึ่งวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ วงจรดีโอบอินทิเกรเตอร์และวงจรมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์ ในที่นี้จะนำวงจรทั้งสองแบบนี้ไปเป็นแนวทางในออกแบบวงจรวัดความถี่ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 วงจรวัดความถี่ที่ใช้ดีโอบอินทิเกรเตอร์

จากหลักการและแผนผังการทำงานของวงจรตามรูปที่ 4.1 และสัญญาณตามจุดสำคัญต่างๆของวงจรตามรูปที่ 4.2 สามารถนำมาออกแบบวงจรวัดความถี่ได้แบบหนึ่งโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์แบบดีโอบอินทิเกรเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆภายในวงจรจะเหมือนกับรูปคลื่นในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.3 วงจรวัดความถี่ที่ใช้ดีโอบอินทิเกรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิง V_{r1} ที่จะป้อนให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_3 นั้นจะต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้น ซึ่งเอาต์พุตที่ได้หรือ V_1 เป็นสัญญาณที่มีค่าเป็นบวกเพื่อไปเป็นอินพุตให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_4 แล้วนำเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 หรือ V_2 ที่มีสัญญาณเป็นบวกนี้ไปเปรียบเทียบกับแรงดันกับแรงดันอ้างอิง V_{r2} โดยที่แรงดันอ้างอิง V_{r2} จะต้องมีค่าเป็นบวกเช่นเดียวกัน ซึ่งรูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุต V_1 แรงดันเอาต์พุต V_2 และเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบกับแรงดันหรือสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 นั้นแสดงดังรูปที่ 4.2 ในแถบที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ส่วนแรงดันอ้างอิง V_{r3} ต้องกำหนดให้มีค่าเป็นบวกเช่นเดียวกับค่าแรงดันอ้างอิง V_{r1} เพื่อเป็นอินพุตให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_6 ให้ได้แรงดันเอาต์พุต V_3 ที่มีสัญญาณเป็นบวก แล้วนำเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 3 V_3 ไปสุ่มและคงค่าออกไปเป็นแรงดันเอาต์พุต V_o โดยอาศัย A_7 เป็นบัฟเฟอร์ทำให้ได้ V_o ออกมา โดยรูปคลื่นแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจากวงจรดีโบรินทิเกรเตอร์ที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.6 จะได้อัตราการขยายของแต่ละวงจรเป็นดังนี้ วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประกอบจากออปแอมป์ A_3 มีค่าอัตราการขยายของวงจรเป็น $\alpha_1 = \frac{2}{R_1 C_1}$ วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประกอบจากออปแอมป์ A_4 มีค่าอัตราการขยายของวงจรเป็น $\alpha_2 = \frac{2}{R_2 C_2}$ และวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประกอบจากออปแอมป์ A_6 มีค่าอัตราการขยายของวงจรเป็น $\alpha_3 = \frac{2}{R_3 C_3}$ แล้วนำค่าอัตราการขยายแต่ละวงจรของวงจรอินทิเกรเตอร์ไปแทนลงในสมการ (4.6) จะได้แรงดันเอาต์พุต V_o ที่สัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆเป็นดังนี้

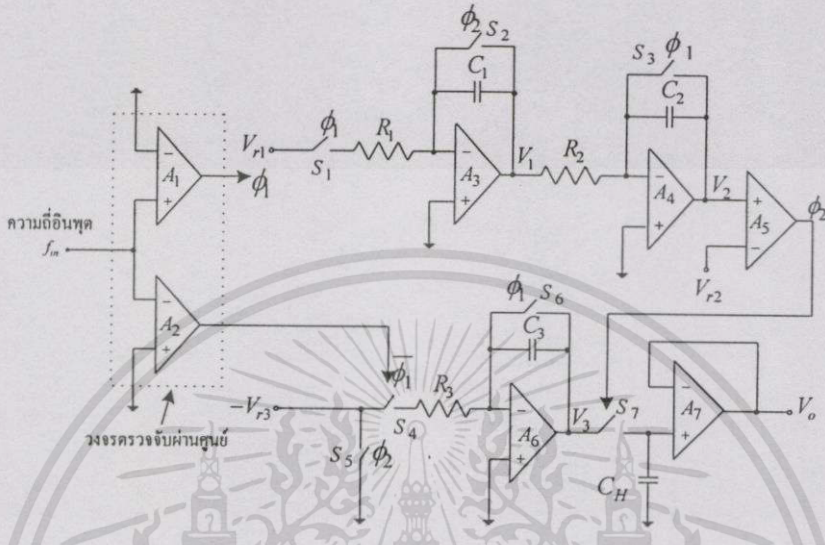
$$V_o = \frac{R_1 C_1 R_2 C_2 V_{r2} V_{r3}}{R_3 C_3 V_{r1}} f_{in} = k f_{in} \quad (4.8)$$

$$\text{เมื่อ } k = \frac{R_1 C_1 R_2 C_2 V_{r2} V_{r3}}{R_3 C_3 V_{r1}}$$

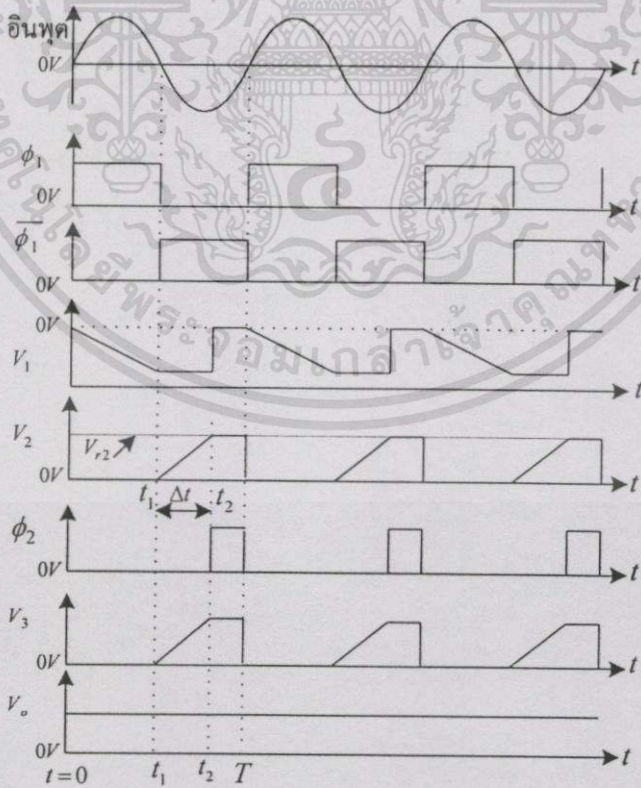
จากสมการ (4.8) พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะแปรตามความถี่อินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจร ซึ่งจะทำให้ได้วงจรวัดความถี่ตามต้องการ

4.3.2 วงจรวัดความถี่ที่ใช้มัลติเพล็กซ์อินทิเกรเตอร์

จากแผนผังการทำงานในรูปที่ 4.1 สามารถนำมาออกแบบเป็นวงจรวัดความถี่ที่ใช้มัลติเพล็กซ์อินทิเกรเตอร์ได้ดังรูปที่ 4.4 โดยรูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆภายในวงจรแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 วงจรวัดความถี่ที่ใช้มัลติเพล็กซ์อินทิเกรเตอร์



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆของวงจรวัดความถี่ตามรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าในการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิง V_{r1} ที่จะป้อนให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_3 นั้นจะต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้น ซึ่งเอาต์พุตที่ได้หรือ V_1 เป็นสัญญาณที่ติดลบเพื่อเป็นอินพุตให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_4 แล้วนำเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 หรือ V_2 ที่มีสัญญาณเป็นบวกไปเปรียบเทียบกับแรงดันกับแรงดันอ้างอิง V_{r2} โดยที่แรงดันอ้างอิง V_{r2} จะต้องมีความเป็นบวกเช่นเดียวกัน ซึ่งรูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุต V_1 แรงดันเอาต์พุต V_2 และเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันหรือ ϕ_2 แสดงดังรูปที่ 4.5 ในแถบที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ส่วนแรงดันอ้างอิง V_{r3} ต้องกำหนดให้มีค่าเป็นลบเพื่อป้อนให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_6 ให้ได้แรงดันเอาต์พุต V_3 ที่มีสัญญาณเป็นบวก แล้วนำไปสุ่มและคงค่าออกไปเป็นแรงดันเอาต์พุต V_o ของวงจรวัดความถี่ตามต้องการ โดยรูปคลื่นแสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจากวงจรมัลติเพล็กซ์อินทิเกรเตอร์ที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.6 จะได้อัตราการขยายของแต่ละวงจรเป็นดังนี้ วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_3 มีค่าอัตราการขยายของวงจรเป็น $\alpha_1 = \frac{1}{R_1 C_1}$ วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_4 มีค่าอัตราการขยายของวงจรเป็น $\alpha_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$ และวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_6 มีค่าอัตราการขยายของวงจรเป็น $\alpha_3 = \frac{1}{R_3 C_3}$ แล้วนำค่าอัตราการขยายแต่ละวงจรของวงจรอินทิเกรเตอร์ไปแทนลงในสมการ (4.6) จะได้แรงดันเอาต์พุต V_o ที่สัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆเป็นดังนี้

$$V_o = \frac{2R_1 C_1 R_2 C_2 V_{r2} V_{r3}}{R_3 C_3 V_{r1}} f_{in} \quad (4.9)$$

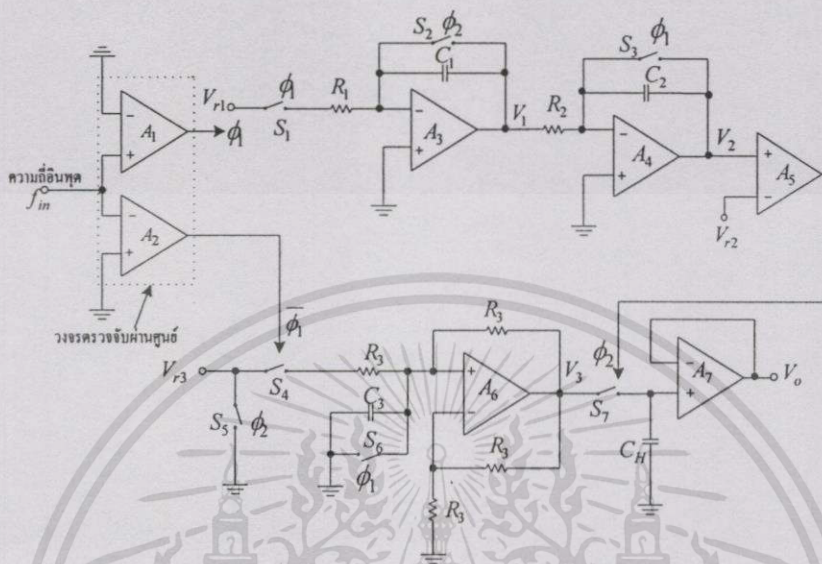
$$= k f_{in}$$

$$\text{เมื่อ } k = \frac{2R_1 C_1 R_2 C_2 V_{r2} V_{r3}}{R_3 C_3 V_{r1}}$$

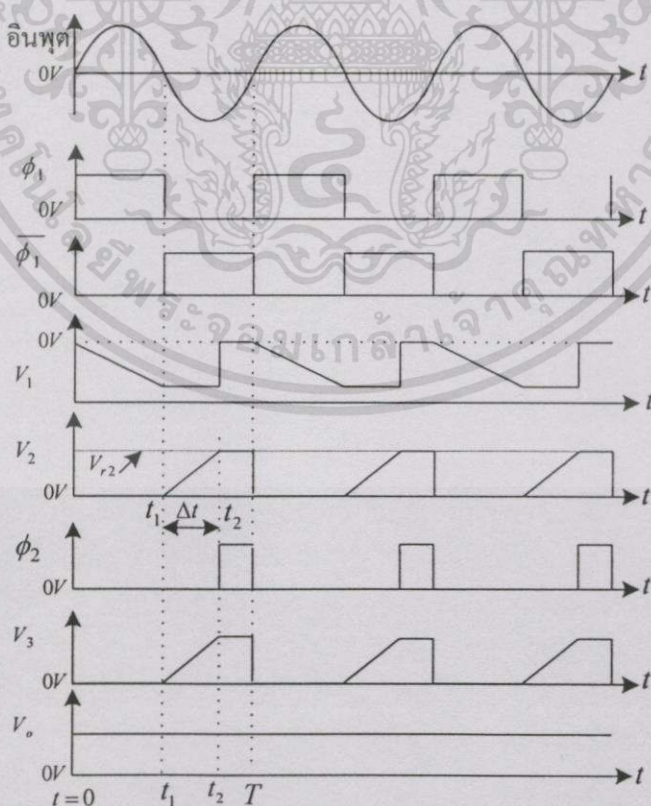
จากสมการ (4.9) พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะแปรตามความถี่อินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจร ซึ่งจะทำให้ได้วงจรวัดความถี่ตามต้องการ

4.3.3 วงจรวัดความถี่ที่ใช้วงจรถึงกรอินทิเกรเตอร์ทั้งสองแบบทำงานร่วมกัน

จากแผนผังการทำงานในรูปที่ 4.1 สามารถนำมาออกแบบเป็นวงจรวัดความถี่ในรูปแบบนี้ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรวัดความถี่ที่ใช้วงจรถึงกรอินทิเกรเตอร์ทั้งสองแบบทำงานร่วมกัน



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆของวงจรวัดความถี่ตามรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าในการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิง V_{r1} ที่จะป้อนให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_3 นั้นจะต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้นซึ่งเอาต์พุตที่ได้หรือ V_1 เป็นสัญญาณที่ติดลบเพื่อเป็นอินพุตให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_4 แล้วนำเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 หรือ V_2 ที่มีสัญญาณเป็นบวกไปเปรียบเทียบกับแรงดันกับแรงดันอ้างอิง V_{r2} โดยที่แรงดันอ้างอิง V_{r2} จะต้องมีค่าเป็นบวกเช่นเดียวกัน ซึ่งรูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุต V_1 แรงดันเอาต์พุต V_2 และเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันหรือ ϕ_2 แสดงดังรูปที่ 4.7 ในแถบที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ส่วนแรงดันอ้างอิง V_{r3} ต้องกำหนดให้มีค่าเป็นบวกเพื่อป้อนให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_6 ให้ได้แรงดันเอาต์พุต V_3 ที่มีสัญญาณเป็นบวก แล้วนำไปสุ่มและลงค่าออกไปเป็นแรงดันเอาต์พุต V_o ของวงจรวัดความถี่ตามต้องการ โดยรูปคลื่นแสดงดังรูปที่ 4.7 และจากวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.6 จะได้อัตราการขยายของแต่ละวงจรเป็นดังนี้ วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประกอบจากออปแอมป์ A_3 มีค่าอัตราการขยายของวงจรเป็น $\alpha_1 = \frac{1}{R_1 C_1}$ วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประกอบจากออปแอมป์ A_4 มีค่าอัตราการขยายของวงจรเป็น $\alpha_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$ และวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประกอบจากออปแอมป์ A_6 มีค่าอัตราการขยายของวงจรเป็น $\alpha_3 = \frac{2}{R_3 C_3}$ แล้วนำค่าอัตราการขยายแต่ละวงจรของวงจรอินทิเกรเตอร์ไปแทนลงในสมการ (4.6) จะได้แรงดันเอาต์พุต V_o ที่สัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆเป็นดังนี้

$$V_o = \frac{4R_1 C_1 R_2 C_2 V_{r2} V_{r3}}{R_3 C_3 V_{r1}} f_m \quad (4.10)$$

$$= k f_{in}$$

เมื่อ $k = \frac{4R_1 C_1 R_2 C_2 V_{r2} V_{r3}}{R_3 C_3 V_{r1}}$

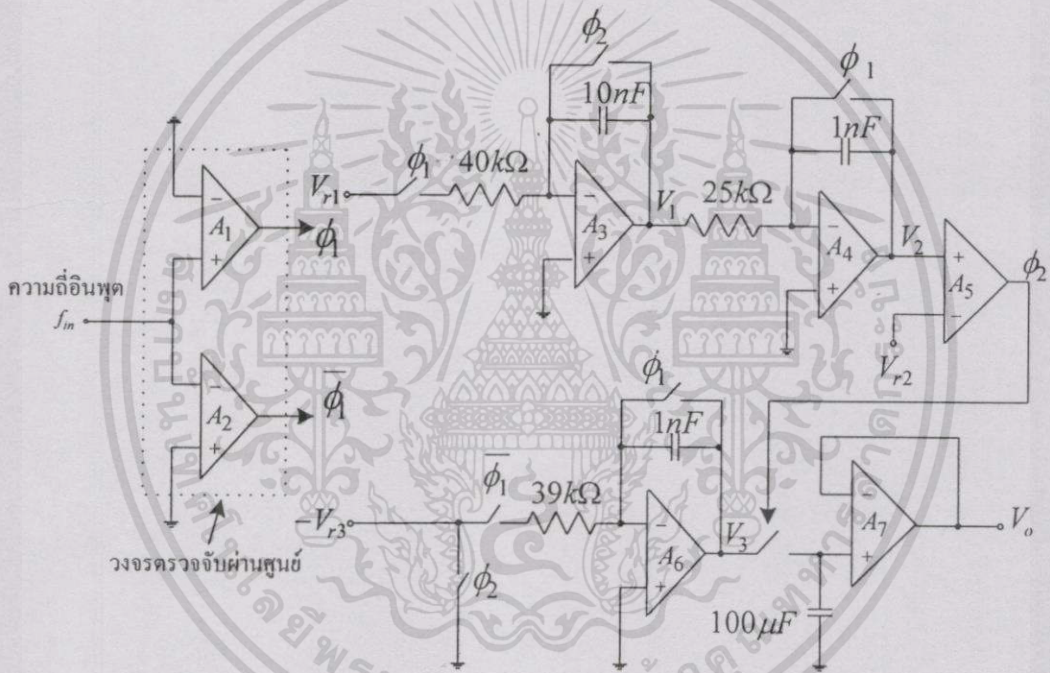
จากสมการ (4.10) พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะแปรตามความถี่อินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจร ซึ่งค่าอัตราการขยายของวงจรตามรูปแบบนี้จะมีค่ามากกว่าวงจรในรูปแบบอื่นที่กล่าวมาเมื่อกำหนดให้ค่าความต้านทาน ค่าตัวเก็บประจุ และค่าแรงดันอ้างอิงต่างๆมีค่าเท่ากัน ดังนั้นในการใช้งานควรพิจารณาถึงค่าอัตราการขยายของวงจรด้วยเพื่อให้ได้วงจรวัดความถี่ตามต้องการ

จากการออกแบบวงจรวัดความถี่โดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นวงจรหลักในการออกแบบและสร้างวงจร ซึ่งสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือช่วงของแรงดันอ้างอิง V_{r1}, V_{r2} และ V_{r3} ค่าคงตัวเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจรอินทิเกรเตอร์แต่ละวงจรมันคือค่าความต้านทานคูณกับค่าตัวเก็บประจุและความถี่อินพุต ดังนั้นหัวข้อต่อไปจะเป็นการทดสอบหาคุณลักษณะของวงจรวัดความถี่ตามที่นำเสนอ

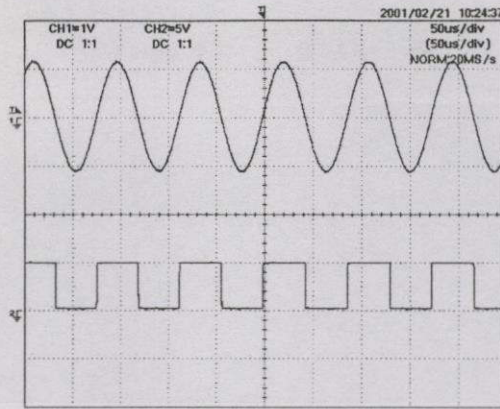
4.4 การทดลองและสรุปผลลัพท์

เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรวัดความถี่ตามที่นำเสนอได้ทำการทดลองต่อวงจรตามรูปที่ 4.4 เพื่อเป็นตัวอย่างในการทดสอบ โดยใช้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยที่ A_1, A_2, A_5 ใช้ไอซีเบอร์ LM311 และอปแอมป์ A_3, A_4, A_6, A_7 ใช้ไอซีเบอร์ LM356 ใช้ขนาดลอทสวิทช์เบอร์ 4066 และไฟเลี้ยงวงจร $\pm 5\text{ V}$

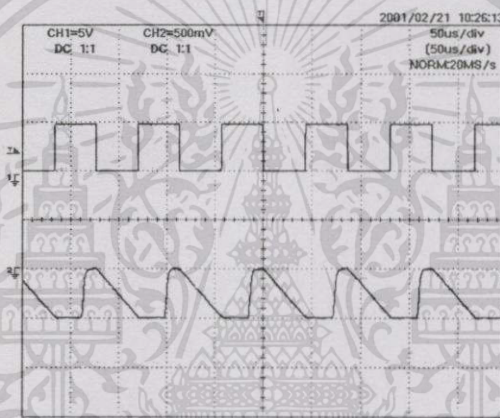


รูปที่ 4.8 วงจรวัดความถี่ที่ใช้ในการทดลอง

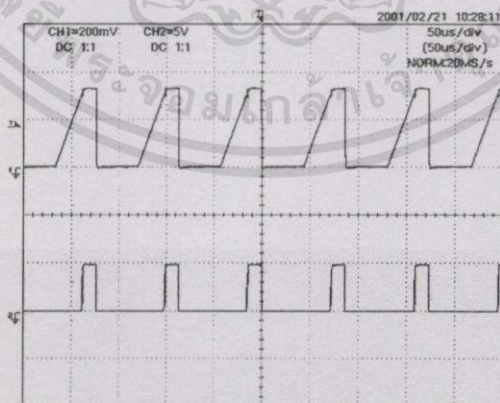
เมื่อใช้สัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 10 kHz ป้อนเข้าสู่วงจรและใช้แรงดันอ้างอิงค่าต่างๆเป็นดังนี้ คือ $V_{r1} = 3.8\text{ V}$, $V_{r2} = 0.3\text{ V}$ และ $V_{r3} = 3.8\text{ V}$ ทำการทดสอบการวัดสัญญาณตามจุดต่างๆที่สำคัญมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.9



(ก) สัญญาณอินพุต (เส้นบน) และสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 (เส้นล่าง)



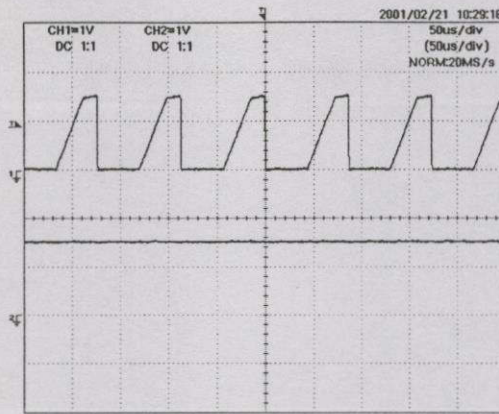
(ข) สัญญาณนาฬิกา ϕ_1 (เส้นบน) และสัญญาณแรงดัน V_1 (เส้นล่าง)



(ค) สัญญาณแรงดัน V_2 (เส้นบน) และสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 (เส้นล่าง)

รูปที่ 4.9 ผลการทดลองที่วัดตามจุดต่างๆที่สำคัญของวงจรวัดความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

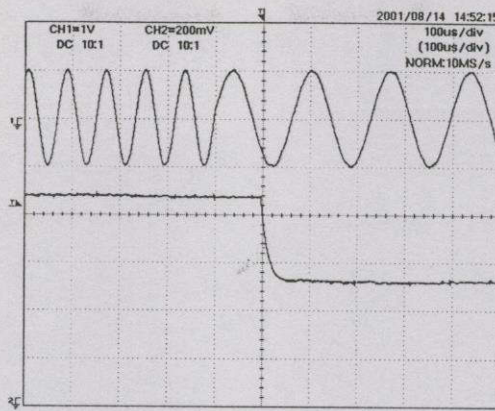


(ง) สัญญาณแรงดัน V_3 (เส้นบน) และสัญญาณแรงดัน V_o (เส้นล่าง)

รูปที่ 4.9 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.9 จะได้ว่าแรงดันเอาต์พุต V_o เป็นไปตามสมการ (4.9) นั่นคือ $V_o = 1.5$ โวลต์ โดยที่ค่าอัตราขยายของวงจรมีค่าเป็น $k = 0.000153$ และความถี่อินพุตมีค่าเป็น 10 kHz ซึ่งเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอและจะสังเกตเห็นว่าจากรูปคลื่นในรูปที่ 4.9(ข) เส้นล่างเป็นแรงดันเอาต์พุต V_1 มีค่าเป็นลบ เนื่องจากป้อนแรงดันอ้างอิง V_{r1} มีค่าเป็นบวกผ่านวงจรมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์จึงทำให้แรงดันที่ได้มีการกลับขั้ว ซึ่งจะนำแรงดันนี้ไปเป็นอินพุตให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 ที่เป็นมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์ได้แรงดันเอาต์พุต V_2 มีค่าเป็นบวกเพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{r2} ที่มีค่าเป็นบวกได้อย่างถูกต้อง ส่วนรูปคลื่นในรูปที่ 4.9(ง) เส้นบนเป็นแรงดันเอาต์พุต V_3 ที่มีสัญญาณเป็นบวกเนื่องจากป้อนแรงดันอ้างอิง V_{r3} มีค่าเป็นลบให้กับวงจรมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์แล้วนำแรงดันเอาต์พุต V_3 นี้ไปเป็นอินพุตให้กับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณทำการสุ่มและคงค่าแรงดันนี้ออกเป็นแรงดันเอาต์พุตที่เป็นไฟตรงได้ตามต้องการ

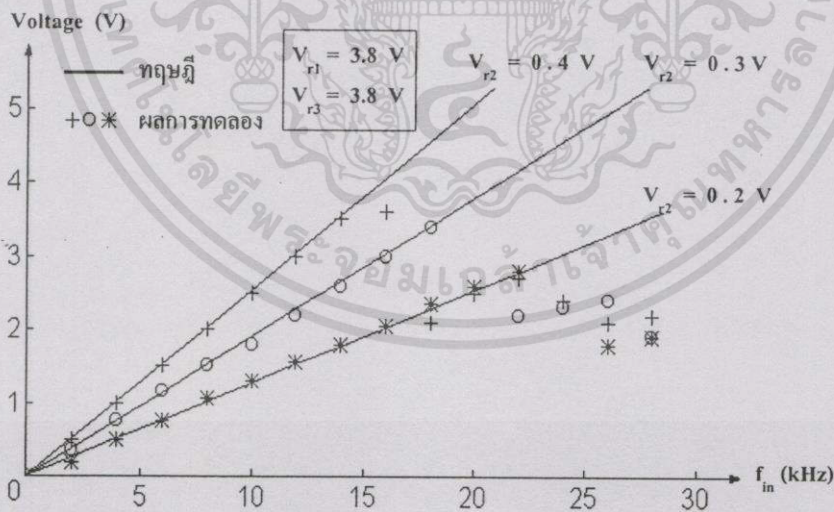
เพื่อทดสอบผลตอบสนองของวงจรวัดความถี่ตามรูปที่ 4.8 ได้ทำการทดลองป้อนสัญญาณอินพุตที่มีความถี่ต่างกัน ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยสัญญาณเส้นบนเป็นสัญญาณอินพุตและเส้นล่างเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรวัดความถี่



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองของวงจรวัดความถี่เมื่อมีการเปลี่ยนความถี่อินพุต

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณอินพุต วงจรที่นำเสนอมีผลตอบสนองที่รวดเร็วโดยใช้เวลาในการประมวลผลภายในหนึ่งรอบการทำงานของสัญญาณอินพุต

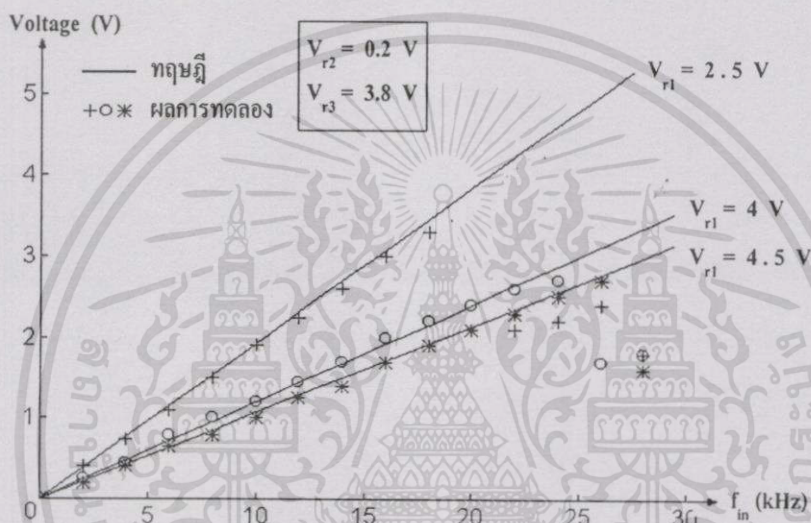
เพื่อทดสอบย่านการทำงานของวงจรวัดความถี่ตามรูปที่ 4.8 ได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตและวัดค่าแรงดันเอาต์พุต V_o โดยใช้ค่าแรงดันอ้างอิง V_{r2} ต่างๆกัน นั่นคือ $V_{r2} = 0.2 \text{ V}$, 0.3 V และ 0.4 V และกำหนดให้แรงดันอ้างอิง $V_{r1} = V_{r3} = 3.8 \text{ V}$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่อินพุตกับแรงดันเอาต์พุต V_o ดังแสดงในรูปที่ 4.11



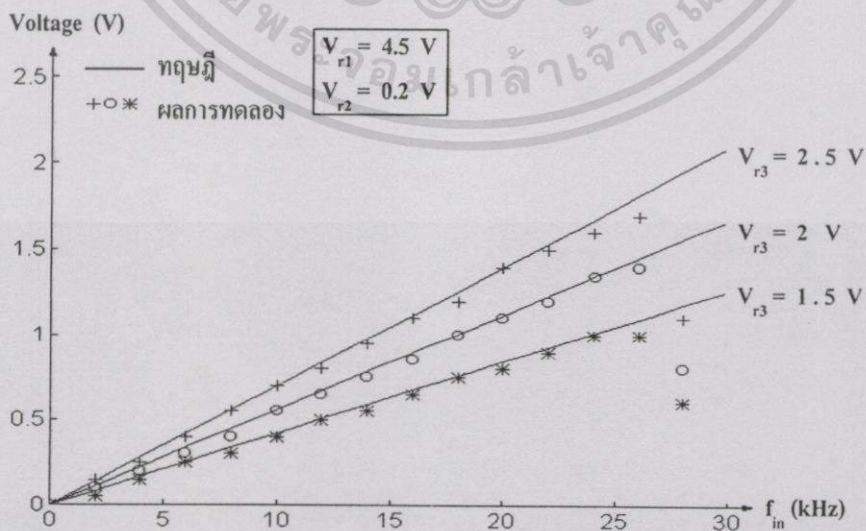
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุตเมื่อ $V_{r2} = 0.2 \text{ V}$, 0.3 V และ 0.4 V

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างความถี่อินพุตกับแรงดันเอาต์พุต แต่อย่างไรก็ดีพบว่าเมื่อ V_{r2} มีค่ามากจะเกิดความผิดพลาดของค่าเอาต์พุตที่วัดได้เมื่ออินพุตมีความถี่สูงขึ้นพอสมควร แต่เมื่อเลือก V_{r2} ให้มีค่าน้อยจะทำให้สามารถขยายย่านการวัดความถี่ในเอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เทมาไปเซบรีะเขินตามการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานให้กว้างออกไปได้ เป็นที่น่าสังเกตว่าการลด V_{r2} นี้จะทำให้ค่า sensitivity ของเอาต์พุต ต่อดัชนีพดลลดลงด้วย อย่างไรก็ตามยังคงมีพารามิเตอร์อื่นๆในวงจรที่สามารถช่วยเพิ่ม sensitivity ของระบบได้ โดยได้ทำการทดสอบผลของแรงดันอ้างอิง V_{r1} และ V_{r3} ต่อดัชนีพดลเอาต์พุต ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ โดยในรูปที่ 4.11 ใช้ค่าแรงดันอ้างอิง V_{r1} ต่างๆกันคือ $V_{r1} = 2.5 \text{ V}$, 4.0 V และ 4.5 V และเลือกใช้แรงดันอ้างอิง $V_{r2} = 0.2 \text{ V}$ และ $V_{r3} = 3.8 \text{ V}$ ส่วนใน รูปที่ 4.12 ใช้ค่าแรงดันอ้างอิง V_{r3} ต่างๆกัน นั่นคือ $V_{r3} = 1.5 \text{ V}$, 2.0 V และ 2.5 V และเลือกใช้แรง ดัชนีพดลอ้างอิง $V_{r1} = 4.5 \text{ V}$ และ $V_{r2} = 0.2 \text{ V}$



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุตเมื่อ $V_{r1} = 2.5 \text{ V}$, 4.0 V และ 4.5 V



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุตเมื่อ $V_{r3} = 1.5 \text{ V}$, 2.0 V และ 2.5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นว่าสามารถเพิ่มค่า sensitivity ของระบบนี้ได้ง่าย โดยการลดค่า V_{r1} หรือเพิ่มค่า V_{r3} ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการทดลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับทฤษฎี

4.5 สรุป

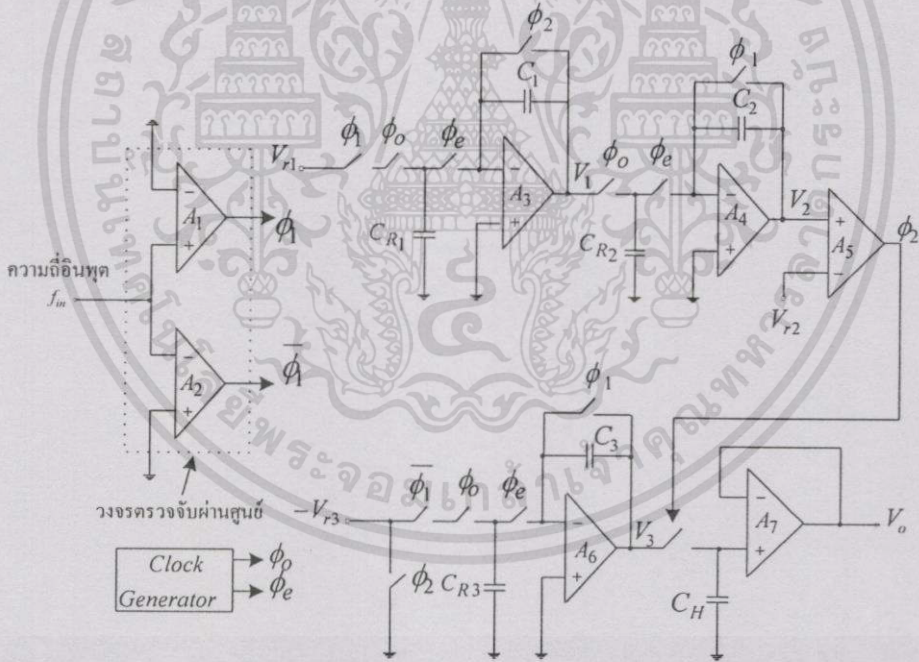
วงจรวัดความถี่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบโดยใช้หลักการสุ่มและคงค่าสัญญาณร่วมกับวงจรมอดูเลเตอร์และวงจรถ่วงจذبผ่านศูนย์ โดยการใช้อัตราการจذبการผ่านศูนย์ของสัญญาณอินพุตในการสร้างสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวควบคุมอนาล็อกสวิตช์ จึงทำให้เกิดความแม่นยำในการกำหนดเวลาที่จะหาค่าแรงดันเอาต์พุต วงจรนี้ยังมีข้อดีที่ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วมารถระบุค่าเอาต์พุตได้ตั้งแต่รอบแรกของการทำงาน ข้อดีอีกประการหนึ่งคือแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟตรงราบเรียบ ไม่มีการกระเพื่อมของแรงดันอย่างใดก็ตามที่จากผลการทดลองเกี่ยวกับการตอบสนองต่อวงจรที่มีความถี่ต่างๆดังรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อ V_{r2} มีค่ามากจะเกิดความผิดพลาดของค่าเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีความถี่สูงขึ้นสาเหตุประการหนึ่งเกิดจากเมื่อความถี่สูงขึ้นนั้นช่วงเวลาที่วงจรมอดูเลเตอร์ชุดที่ 2 ใช้ในการอินทิเกรตแรงดันมีเวลาไม่พอในการสร้างเอาต์พุตให้มีค่าสูงพอที่จะไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{r2} ในการสร้างสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 กล่าวคือ ϕ_2 ถูกสร้างให้มีจังหวะการทำงานไม่ถูกต้องเพราะมีจังหวะช้าซ้อนกับ ϕ_1 จึงทำให้การสุ่มค่าเอาต์พุตเกิดความผิดพลาดขึ้น กระนั้นก็ตามปัญหานี้ก็จะสามารถถูกขจัดได้ด้วยการเลือกค่า V_{r2} ให้น้อยลง ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราการแปลงอินพุตเป็นเอาต์พุตมีค่าต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามยังสามารถการชดเชยเพิ่มค่านี้ได้เพียงแต่อาศัยการปรับพารามิเตอร์บางตัวในวงจรเท่านั้น นั่นคือสามารถเพิ่มอัตราการแปลงอินพุตเป็นเอาต์พุต โดยลดค่า V_{r1} หรือเพิ่มค่า V_{r3} หรือการเลือกค่าอัตราการขยายของวงจรมอดูเลเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุในวงจร ซึ่งจะทำการเพิ่มอัตราการขยายของวงจรมอดูเลเตอร์ชุดที่ 3 และลดอัตราการขยายของวงจรมอดูเลเตอร์ในชุดที่ 1 และชุดที่ 2 โดยไม่ต้องใช้วงจรขยายภายนอกเพิ่มเติมแต่อย่างใด และข้อสรุปที่สำคัญยิ่งอีกประการหนึ่งคือสามารถตัดแปลงเป็นวงจรมอดูเลเตอร์คาปาซิเตอร์ได้โดยง่าย เพียงแต่เปลี่ยนวงจรมอดูเลเตอร์ให้เป็นวงจรมอดูเลเตอร์คาปาซิเตอร์อินทิเกรเตอร์เท่านั้น ซึ่งจากรูปที่ 4.4 เป็นวงจรวัดความถี่ที่ใช้มิลิเลอ์อินทิเกรเตอร์เป็นวงจรหลักในการออกแบบ สามารถตัดแปลงให้อยู่ในรูปของวงจรมอดูเลเตอร์คาปาซิเตอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยแทนตัวความต้านทานแต่ละตัวด้วยวงจรที่ประกอบขึ้นจากการใช้ตัวเก็บประจุทำงานร่วมกับสวิตช์ 2 ตัว ซึ่งผลัดกันทำงานและอาศัยการควบคุมจากสัญญาณนาฬิกา 2 เฟส คือ ϕ_0 และ ϕ_1 ที่สร้างมาจากวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาที่สร้างขึ้นมาเพื่อการนี้ โดยเฉพาะที่ความถี่ f_c โดยจะต้องระวังให้ไม่มีการซ้อนทับระหว่างสัญญาณนาฬิกา ϕ_0 และ ϕ_1 จากวงจรตามรูปที่ 4.4 สามารถ

แทนตัวต้านทาน R_1 ได้ด้วยวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C_{R1} และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบในวงจรคาปาซิเตอร์กับความต้านทานสมมูลได้ดังนี้

$$R_1 = \frac{1}{f_C C_{R1}} \quad (4.11)$$

โดยการเลือกใช้ค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกาและค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม จะสามารถแทนที่ตัวความต้านทานทั้งหมดในวงจรรูปที่ 4.4 ด้วยวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์และเขียนความสัมพันธ์ของเอาต์พุต V_o กับความถี่อินพุตในสมการ (4.9) ได้ใหม่เป็นดังนี้

$$V_o = \frac{2V_{r2}V_{r3}C_1C_2C_{R3}C_{R4}}{V_{r1}f_C C_{R1}C_{R2}C_3C_{R3}} f_{in} \quad (4.12)$$



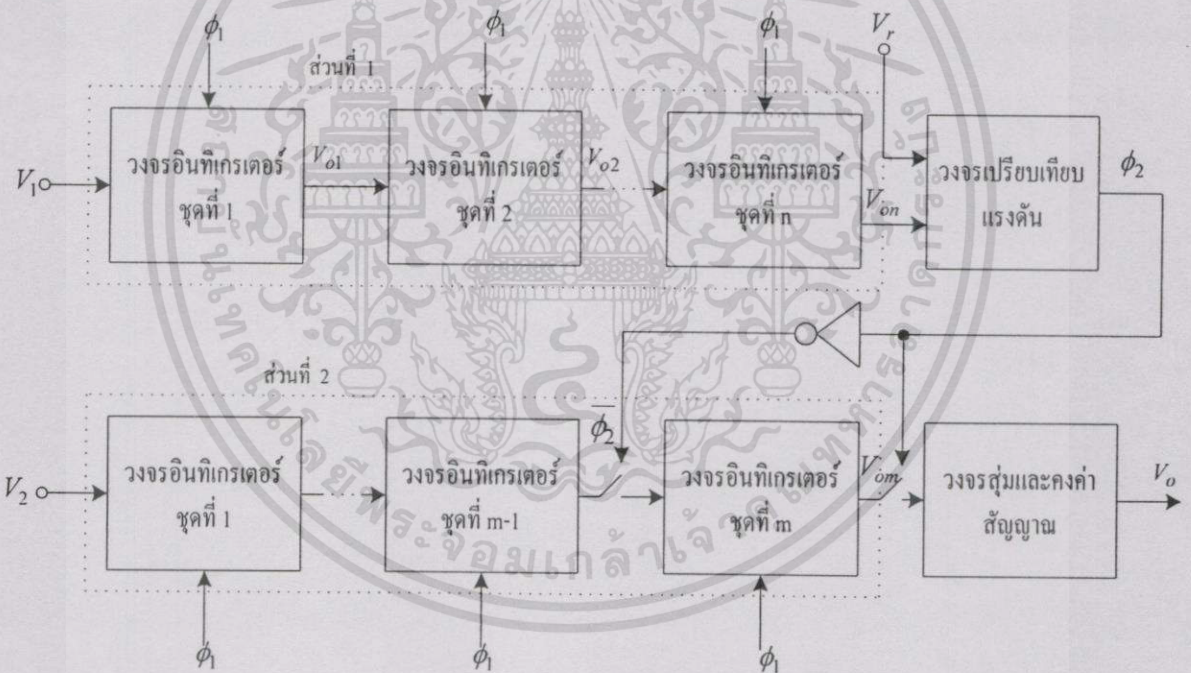
รูปที่ 4.14 วงจรวัดความถี่ที่เขียนแทนด้วยวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์

บทที่ 5

วงจรรยกำลัง

5.1 กล่าวนำ

จากบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการนำวิธีการสุ่มค่าสัญญาณ ไปประยุกต์ใช้กับวงจรวัดความถี่ สำหรับในบทนี้เป็น การนำเสนอวงจรรยกำลังที่ใช้หลักการเดียวกันกับวงจรวัดความถี่ นั่นคือการนำ วงจรอินทิเกรเตอร์ทำงานร่วมกับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณและวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยได้ ทำการปรับปรุงวงจรรยกำลังตาม [15] ให้กำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายในวงจรได้เอง เนื่องจากวงจร ตาม [15] นั้นยังคงต้องอาศัยสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกมาช่วยในการรีเซตการทำงานของวงจร ซึ่งทำให้ไม่สะดวกในการนำไปใช้งาน โดยที่วงจรตาม [15] มีแผนผังแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรรยกำลังที่ใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอกมารีเซต

จากรูปที่ 5.1 อธิบายการทำงานได้ดังนี้ วงจรอินทิเกรเตอร์ประกอบด้วย 2 ส่วนคือในส่วนที่ 1 ได้ สมมติให้มีวงจรอินทิเกรเตอร์ต่อкасแคดกัน n วงจร โดยป้อนแรงดันอินพุตเป็น V_1 และได้แรงดัน เอาต์พุตเป็น V_{0n} และในส่วนที่ 2 สมมติให้วงจรอินทิเกรเตอร์ต่อкасแคดกัน m วงจร โดยป้อน แรงดันอินพุตเป็น V_2 และได้แรงดันเอาต์พุตเป็น V_{0m} เมื่อสมมติให้แรงดันค่าเริ่มต้นของเอาต์พุต ของวงจรอินทิเกรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์โดยใช้สัญญาณนาฬิกา ϕ_1 เป็นตัวควบคุมที่สร้างจากอุปกรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกและสมมติให้เวลาเริ่มต้นของการอินทิเกรตสัญญาณเป็น $t = 0$ ดังนั้นเมื่อพิจารณาในส่วนที่ 1 ของวงจรตามรูปที่ 5.1 ซึ่งมีวงจรอินทิเกรเตอร์ n วงจรและกำหนดให้ทุกวงจรมีอัตราขยายเท่ากับ α และสมมติให้แรงดันอินพุต V_1 เป็นไฟตรง จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุต V_{on} ของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ n มีค่าเป็น

$$V_{on}(t) = \frac{V_1 t^n \alpha^n}{n!} \quad (5.1)$$

การทำงานของวงจรยกกำลังนี้จะใช้แรงดันเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ n มาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_r โดยใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดันเป็นตัวเปรียบเทียบซึ่งเอาต์พุตที่ได้คือ ϕ_2 นี้จะถูกนำไปใช้ควบคุมวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจากเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ m ในส่วนที่ 2 ของวงจรตามรูปที่ 5.1 เพื่อนำมาเป็นเอาต์พุต V_o ของวงจรยกกำลังและจากสมการ (5.2) ถ้าสมมติให้การอินทิเกรตใช้เวลา t เท่ากับ T ที่ทำให้แรงดันเอาต์พุต V_{on} มีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิง V_r ที่ใช้ในการเปรียบเทียบแรงดันเพื่อให้ได้สัญญาณนาฬิกา ϕ_2 ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{on}(T) = \frac{V_1 T^n \alpha^n}{n!} = V_r \quad (5.2)$$

หรือหาช่วงเวลา T ได้เป็น

$$T = \left(\frac{n! V_r}{\alpha^n V_1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.3)$$

ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาวงจรตามรูปที่ 5.1 ในส่วนที่ 2 ที่มีวงจรอินทิเกรเตอร์ m วงจร และทุกวงจรมีอัตราขยายเท่ากับ β แล้วทำการป้อนแรงดันอินพุต V_2 เป็นไฟตรง จะได้แรงดันเอาต์พุต V_{om} เป็น

$$V_{om}(t) = \frac{V_2 \beta^m t^m}{m!} \quad (5.4)$$

และสมมติให้ช่วงเวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตของวงจรอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 2 เท่ากับ T ตามสมการ (5.3) จะได้แรงดันเอาต์พุต V_{om} เป็นดังนี้

$$V_{om}(T) = \frac{V_2 \beta^m T^m}{m!} \quad (5.5)$$

แทนค่าสมการ (5.3) ลงใน (5.5) จะได้

$$V_{om}(T) = \frac{V_2 \beta^m}{m!} \left(\frac{n! V_r}{\alpha^n V_1} \right)^{\frac{m}{n}} \quad (5.6)$$

ที่เวลา $t = T$ นี้สัญญาณเอาต์พุต ϕ_2 จะถูกนำไปควบคุมวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยจะทำการสุ่มสัญญาณในช่วงเวลา $V_{om}(T)$ ออกไป เป็น $V_o(t)$ จะได้

$$V_o(t) = V_{om}(T) = k V_2 \left(\frac{V_r}{V_1} \right)^{\frac{m}{n}} \quad (5.7)$$

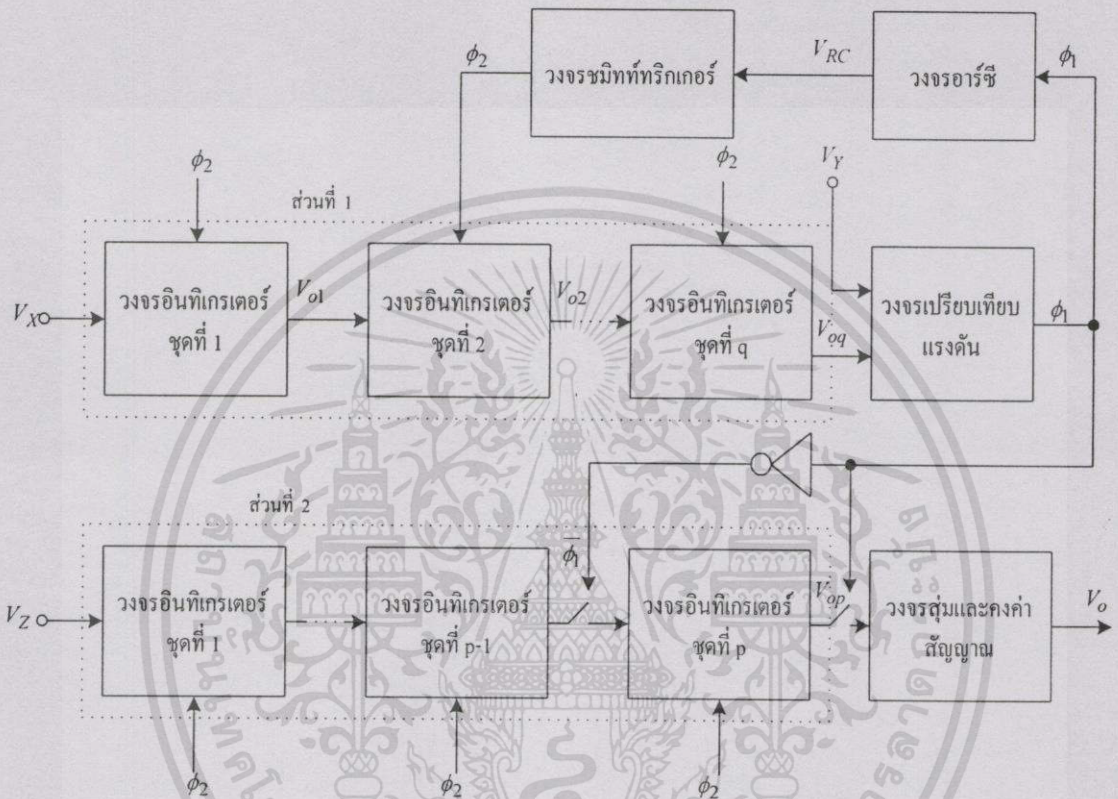
เมื่อ $k = \frac{\beta^m}{m!} \left(\frac{n!}{\alpha^n} \right)^{\frac{m}{n}}$

จากสมการ (5.7) จะเห็นได้ว่าแผนผังตามรูปที่ 5.1 จะสามารถนำมาสร้างเป็นวงจรยกกำลังได้ตามต้องการ แต่เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดจะเห็นได้ว่าสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ที่นำมาใช้ในการรีเซตของวงจรอินทิเกรเตอร์ให้ทำงานในช่วงเวลาเดียวกันนั้นจะต้องสร้างวงจรจากภายนอก จึงทำให้ไม่สะดวกในการไปใช้งาน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการปรับปรุงวงจรยกกำลังให้สามารถสร้างสัญญาณนาฬิกาภายในวงจรเอง โดยที่รูปแบบของวงจรยกกำลังที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มี 2 รูปแบบ กล่าวคือรูปแบบแรกจะสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรยกกำลังได้ตามต้องการ และสามารถนำมาสร้างเป็นวงจรคูณและหารสัญญาณได้ด้วย ส่วนรูปแบบที่สองได้ทำการปรับปรุงรูปแบบแรกให้สามารถใช้จำนวนวงจรอินทิเกรเตอร์น้อยลงแต่จะไม่สามารถสร้างเป็นวงจรคูณและหารสัญญาณได้ หลักการนี้มีข้อดีคือให้ระดับแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าสูงและเพื่อยืนยันความถูกต้องของหลักการจึงได้ทำการทดลองต่อวงจรยกกำลังสอง วงจรยกกำลังสาม วงจรถอดรอกที่สอง วงจรถอดรอกที่สาม และวงจรคูณและหารสัญญาณ โดยใช้สัญญาณอินพุตเป็นไฟตรงและเป็นฟังก์ชันที่แปรตามเวลา ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป

5.2 หลักการ

5.2.1 วงจรยกกำลังรูปแบบที่ 1

วงจรยกกำลังรูปแบบนี้มีแผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.2 และตัวอย่างรูปคลื่นตามจุดต่างๆที่สำคัญแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 วงจรยกกำลังรูปแบบที่ 1

จากรูปที่ 5.2 ประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรรอรัชนี วงจรมหิทท์ทริกเกอร์ วงจรเปรียบเทียบแรงดัน และวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ โดยที่วงจรอินทิเกรเตอร์จะประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ส่วนที่ 1 ได้นำวงจรอินทิเกรเตอร์ต่อкаскаดกันอยู่ q วงจร แล้วทำการป้อนแรงดันอินพุตเป็น V_X ได้แรงดันเอาต์พุตเป็น V_{Oq} และในส่วนที่ 2 ได้นำวงจรอินทิเกรเตอร์ต่อкаскаดกันอยู่ p วงจร แล้วทำการป้อนแรงดันอินพุตเป็น V_Z ได้แรงดันเอาต์พุตเป็น V_{Op} และจากคุณสมบัติของวงจรอินทิเกรเตอร์ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.6 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต $V_{O1}(t)$ กับเวลา t ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุต $V_{in}(t)$ เป็นดังนี้

$$V_{O1}(t) = \alpha \int_0^t V_{in}(t) dt + V(0) \quad (5.8)$$

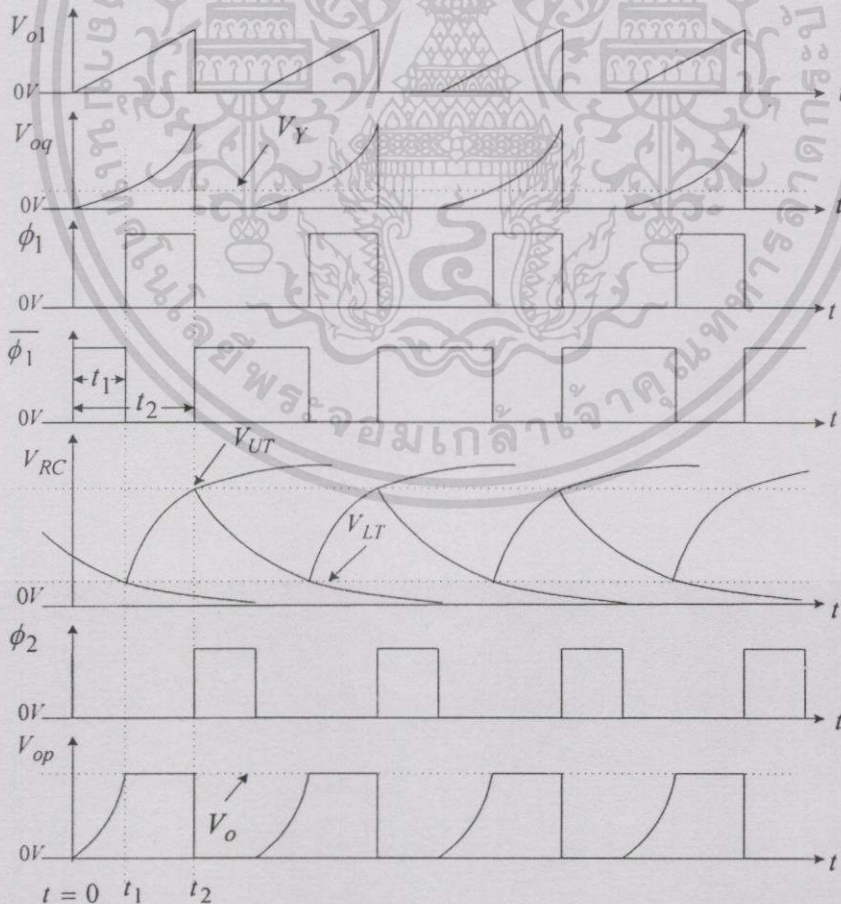
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ α คืออัตราขยาย และ $V(0)$ คือค่าแรงดันเริ่มต้นของวงจรรวมอินทิเกรเตอร์

จากสมการ (5.8) เมื่อพิจารณาในกรณีที่แรงดันอินพุตเป็นไฟตรง V_{in} และพิจารณาจากการออกแบบแผนผังในรูปที่ 5.2 ร่วมด้วย วงจรรวมอินทิเกรเตอร์จะถูกนำไปใช้กับระบบที่มีการทำงานแบบวนรอบซ้ำๆ ซึ่งวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ทุกวงจรจะทำการอินทิเกรตสัญญาณในช่วงเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยมีสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 เป็นตัวริเซตการทำงานของวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ การทำงาน เมื่อกำหนดให้เวลาเริ่มต้นของการอินทิเกรตสัญญาณในแต่ละรอบเป็น $t=0$ จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 $V_{o1}(t)$ ในช่วงเวลาที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_2 เป็นศูนย์ได้ดังนี้

$$V_{o1}(t) = \alpha V_{in} t \quad (5.9)$$

และในช่วงที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_2 เป็นบวก จะได้แรงดันเอาต์พุต $V_{o1}(t)$ มีค่าเป็นศูนย์ และจากสมการ (5.9) เขียนรูปคลื่นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต $V_{o1}(t)$ กับเวลา t ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุต V_{in} แสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างรูปคลื่นตามจุดต่างๆของวงจรรวมกำลัง

เมื่อนำวงจรอินทิเกรเตอร์ต่อкасแคดกัน 2 วงจร โดยวงจรทั้งสองใช้เวลาในการอินทิเกรตเป็นช่วงเวลาเดียวกันนั้นคือเมื่อสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 มีค่าเป็นศูนย์ วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 จะทำการอินทิเกรตแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 เขียนความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 หรือ $V_{o2}(t)$ ที่สัมพันธ์กับแรงดันอินพุต V_{in} กับเวลา t ได้ดังนี้

$$V_{o2}(t) = \alpha_2 \int_0^t \alpha_1 V_{in} t dt$$

$$= \frac{\alpha_1 \alpha_2 V_{in} t^2}{2} \quad (5.10)$$

โดยที่ α_1 คืออัตราขยายของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 และ α_2 คืออัตราขยายของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2

ในทำนองเดียวกันเมื่อนำคุณสมบัติของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ทำงานแบบวนรอบซ้ำๆ โดยพิจารณาในส่วนที่ 1 ของแผนผังตามรูปที่ 5.2 จะได้แรงดันที่เอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ q $V_{oq}(t)$ ที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันอินพุต V_X ที่เป็นไฟตรงกับเวลา t เป็นดังนี้

$$V_{oq}(t) = \frac{V_X t^q \alpha_{11} \alpha_{21} \dots \alpha_{q1}}{q!}$$

$$= \frac{V_X t^q \prod_{m=1}^q \alpha_{m1}}{q!} \quad (5.11)$$

โดยที่ α_{m1} คืออัตราขยายของวงจรอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 1 เมื่อ $m=1,2,\dots,q$

จากสมการ (5.11) แรงดันเอาต์พุต $V_{oq}(t)$ ที่ได้นี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_Y โดยใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดันเป็นคว่ำเปรียบเทียบ ซึ่งจะให้อาต์พุตเป็นสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ที่มีค่าเป็นศูนย์เมื่อแรงดัน $V_{oq}(t)$ มีค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง V_Y และให้อาต์พุตเป็นสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ที่มีค่าเป็นบวกเมื่อแรงดัน $V_{oq}(t)$ มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง V_Y และเมื่อกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตสัญญาณเท่ากับ t_1 เพื่อให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุต $V_{oq}(t)$ เท่ากับค่าแรงดันอ้างอิง V_Y ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ดังนั้นจากสมการ (5.11) เขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังนี้

$$V_{oq}(t_1) = \frac{V_X t_1^q \prod_{m=1}^q \alpha_{m1}}{q!} = V_Y \quad (5.12)$$

จากสมการ (5.12) จะสามารถหาค่าช่วงเวลา t_1 ได้เป็น

$$t_1 = \left[\frac{V_Y q!}{V_X \prod_{m=1}^q \alpha_{m1}} \right]^{\frac{1}{q}} \quad (5.13)$$

ที่เวลา $t = t_1$ นี้เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบกับแรงดันจะมีการเปลี่ยนสภาวะการทำงานจากศูนย์ เป็นบวก แสดงดังรูปที่ 5.3 และในทำนองเดียวกันเมื่อนำคุณสมบัติของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ทำงานแบบวนรอบซ้ำๆ โดยพิจารณากับวงจรอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 2 ตามรูปที่ 5.2 ซึ่งกำหนดให้วงจรอินทิเกรเตอร์ต่อคาสแคดกัน p วงจร และใช้เวลาในการอินทิเกรตสัญญาณในช่วงเวลาเดียวกัน ดังนั้นเมื่อทำการป้อนแรงดันอินพุต V_Z ที่เป็นไฟตรงให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ส่วนที่ 2 นี้จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุต $V_{op}(t)$ ในช่วงที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_2 เป็นศูนย์เป็นดังนี้

$$V_{op}(t) = \frac{V_Z t^p \prod_{m=1}^p \alpha_{m2}}{p!} \quad (5.14)$$

โดยที่ α_{m2} เป็นอัตราขยายของวงจรอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 2 เมื่อ $m=1,2,\dots,p$ และจากการออกแบบรูปคลื่นที่แสดงตามรูป 5.3 ซึ่งกำหนดให้วงจรอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 2 ใช้เวลาในการอินทิเกรตสัญญาณเท่ากับ t_1 ที่มีค่าตามสมการ (5.13) ดังนั้นจึงได้นำสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 มาควบคุมวงจรอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 2 ให้หยุดทำการอินทิเกรตสัญญาณอินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ p ในช่วงที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_1 เป็นบวก ทำได้โดยการการกลับสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ให้เป็นสัญญาณนาฬิกา $\bar{\phi}_1$ เพื่อที่จะควบคุมให้วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ p ทำการอินทิเกรตสัญญาณตามช่วงเวลาที่ต้องการ ดังนั้นจะได้รับความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต $V_{op}(t)$ ในช่วงเวลาที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_2 เป็นศูนย์มีค่าเป็นดังนี้

$$V_{op}(t_1) = \frac{V_Z t_1^p \prod_{m=1}^p \alpha_{m2}}{p!} \quad (5.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ p นี้มีรูปคลื่นแสดงดังรูปที่ 5.3 และทำการแทนค่า t_1 ตามสมการ (5.13) ลงในสมการ (5.15) จะได้

$$V_{op}(t_1) = \frac{V_Z}{p! \prod_{m=1}^q \alpha_{m1}} \left[\frac{V_Y q! \prod_{m=1}^p \alpha_{m2}}{V_X} \right]^{\frac{p}{q}}$$

$$= k V_Z \left(\frac{V_Y}{V_X} \right)^{\frac{p}{q}} \quad (5.16)$$

$$\text{เมื่อ } k = \frac{1}{p! \prod_{m=1}^q \alpha_{m2}} \left[q! \prod_{m=1}^p \alpha_{m1} \right]^{\frac{p}{q}}$$

และที่เวลา $t = t_1$ นี้ สัญญาณเอาต์พุต ϕ_1 ของวงจรเปรียบเทียบกับแรงดันจะถูกนำไปควบคุมการสุ่มค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{op} จากวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ p ออกมาเป็นแรงดันเอาต์พุต V_o และคงค่าแรงดันนี้ไว้จนกว่าวงจรจะเริ่มการทำงานรอบใหม่ นั่นคือ

$$V_o(t) = V_{op}(t_1) = k V_Z \left(\frac{V_Y}{V_X} \right)^{\frac{p}{q}} \quad (5.17)$$

จากสมการ (5.17) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต V_o ที่ได้จากการสุ่มและคงค่าสัญญาณนี้แปรผันตามค่าของแรงดันอินพุต V_Y ยกกำลัง (p/q) ดังนั้นหลักการนี้จึงสามารถนำไปออกแบบเป็นวงจรยกกำลัง (p/q) ได้ตามต้องการโดยขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าของเลขชี้กำลัง p และ q หรือจำนวนของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่นำมาต่อкасแคดกันในแต่ละส่วนนั่นเอง ถ้าพิจารณาอย่างละเอียดจากสมการ (5.17) จะเห็นว่าในกรณีที่เลขชี้กำลังมีค่าเป็น $p=q=1$ ซึ่งหมายถึงการใช้จำนวนของวงจรอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 1 เท่ากับหนึ่งวงจร และในส่วนที่ 2 เท่ากับหนึ่งวงจรเช่นเดียวกัน จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตจากสมการ (5.17) เป็นดังนี้

$$V_o(t) = \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{12}} \frac{V_Z V_Y}{V_X} \quad (5.18)$$

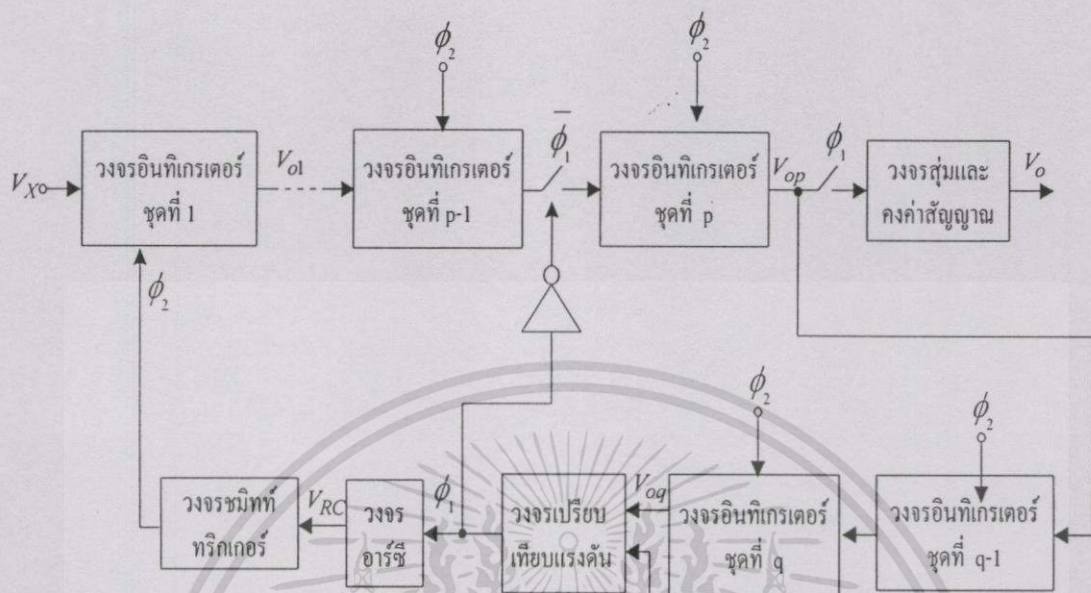
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (5.18) นี้จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ จะแปรตามอัตราส่วนของผลคูณของแรงดันอินพุต V_Z กับแรงดันอ้างอิง V_Y ต่อแรงดันอินพุต V_X เมื่ออัตราส่วนของ $\frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}}$ เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุของวงจรมินิเกรเตอร์ ดังนั้นวงจรยกกำลังในรูปแบบนี้จึงสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรมูลและหารสัญญาณได้ด้วย และเพื่อให้วงจรทำงานได้จริงในทางปฏิบัติจึงต้องมีสัญญาณนาฬิกาภาคอริเซตวงจรถูกให้ทำงานเป็นจังหวะตลอดเวลาและเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งานจึงได้สร้างสัญญาณนาฬิกาขึ้นมาภายในวงจรเองโดยนำสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ไปเป็นอินพุตให้กับวงจรหน่วงเวลาที่ประกอบด้วยวงจรรอซีทำงานร่วมกับวงจรมินิเกรเตอร์เมื่อสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 มีค่าเป็นบวก $+V_{sat}$ ป้อนให้กับวงจรรอซี จะมีความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต V_{RC} ในช่วงที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_1 เป็นบวกมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential) และในช่วงที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_1 เป็นศูนย์ รูปคลื่นของแรงดัน V_{RC} จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้ถูกนำไปเป็นอินพุตให้กับวงจรมินิเกรเตอร์ที่ให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 โดยที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_2 เป็นบวกเมื่อแรงดัน V_{RC} มีค่ามากกว่าระดับแรงดันอ้างอิงด้านสูง V_{UT} ของวงจรมินิเกรเตอร์ และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแรงดัน V_{RC} มีค่าต่ำกว่าระดับแรงดันอ้างอิงด้านต่ำ V_{LT} ดังนั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 จะมีการเปลี่ยนสถานะจากศูนย์เป็นบวกช้ากว่าสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 และเมื่อนำสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 ไปรีเซตวงจรมินิเกรเตอร์ทุกชุดในระบบจะทำให้เอาต์พุตของวงจรมินิเกรเตอร์ทุกชุดมีค่าเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งที่ ϕ_2 มีการเปลี่ยนสถานะจากศูนย์เป็นบวกและขณะเดียวกันสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 หรือเอาต์พุตของวงจรมินิเกรเตอร์เปรียบเทียบกับแรงดันก็จะมีความเป็นศูนย์ด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.3 วิธีการนี้จะสามารถทำให้วงจรทำงานวนรอบซ้ำๆได้ตามต้องการ

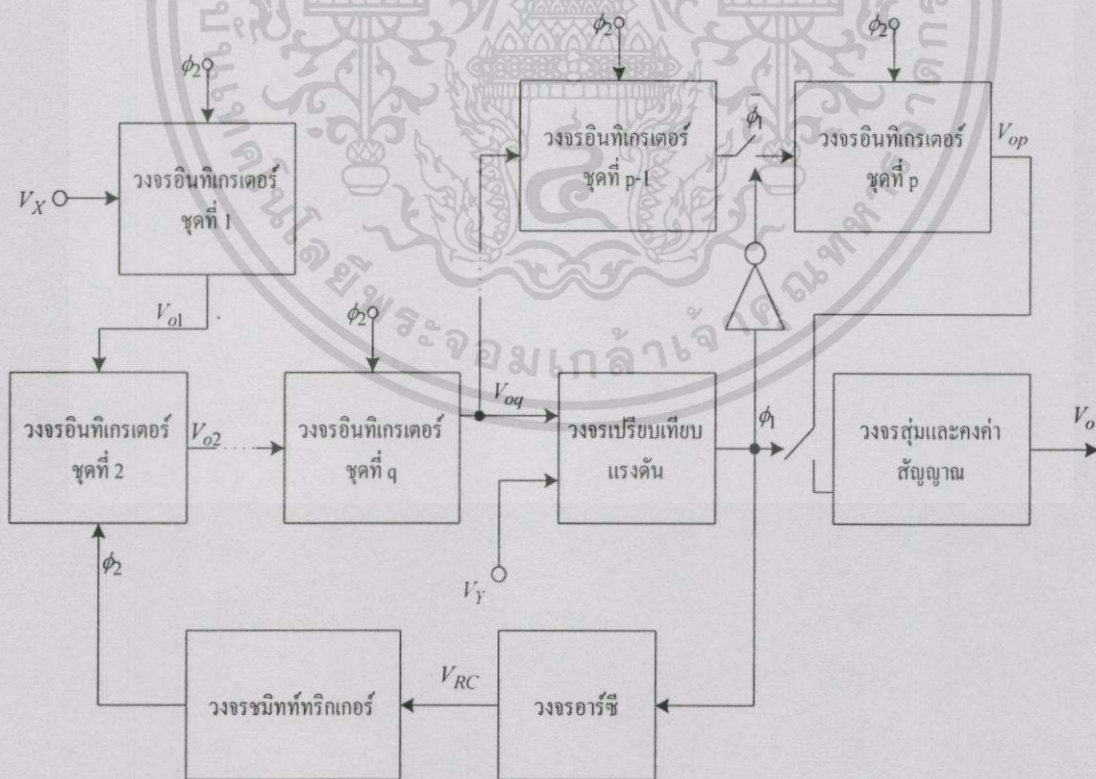
5.2.2 วงจรยกกำลังรูปแบบที่ 2

วงจรมินิเกรเตอร์ยกกำลังรูปแบบนี้ได้จากการปรับปรุงวงจรมินิเกรเตอร์ในรูปแบบแรกให้มีความกระชับขึ้นซึ่งทำให้ได้วงจรที่สามารถลดจำนวนของวงจรมินิเกรเตอร์ลงได้มาก กล่าวคือวงจรที่สร้างตามรูปแบบแรกจะต้องใช้จำนวนวงจรมินิเกรเตอร์ถึง $p+q$ วงจร ส่วนวงจรที่สร้างจากรูปแบบนี้จะใช้วงจรมินิเกรเตอร์เพียง p หรือ q วงจรเท่านั้นขึ้นอยู่กับว่าค่าใดจะมากกว่ากัน ซึ่งแผนผังการทำงานตามรูปแบบที่ 2 นี้ จะมีหลักการทำงานคล้ายกับแผนผังการทำงานตามรูปแบบที่ 1 จะแตกต่างกันที่ในรูปแบบแรกนั้นจะใช้วงจรมินิเกรเตอร์นำมาต่ออากาศแคดกัน 2 ส่วน สำหรับแผนผังการทำงานในรูปแบบที่ 2 นี้จะใช้วงจรมินิเกรเตอร์นำมาต่ออากาศแคดกันเพียงส่วนเดียวซึ่งมีแผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.4 โดยแผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 (ก) นั้นจะใช้ในกรณีตัวเลขยกกำลังมีค่าของเศษมากกว่าค่าของส่วน ($p > q$) ส่วนแผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 (ข) ใช้

- ในกรณีที่เลขชี้กำลังมีค่าของเศษน้อยกว่าค่าของส่วน ($p < q$) และตัวอย่างรูปคลื่นที่สำคัญตามจุดต่างๆ มีลักษณะเช่นเดียวกับวงจรถักกำลังในรูปแบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 5.3



(ก) วงจรถักกำลัง p/q โดยที่เลขชี้กำลัง $p > q$



(ข) วงจรถักกำลัง p/q โดยที่เลขชี้กำลัง $p < q$

รูปที่ 5.4 วงจรถักกำลังในรูปแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั้งสองกรณีนี้สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้คือ เมื่อทำการป้อนแรงดันอินพุต V_X เป็นไฟตรงให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดแรก และสมมติให้ค่าแรงดันเริ่มต้นของวงจรอินทิเกรเตอร์ทุก วงจรที่ตำแหน่งอ้างอิง $t = 0$ มีค่าเป็นศูนย์ตามรูปที่ 5.3 แล้วจะได้ค่าเอาต์พุต $V_{o1}(t)$ ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต V_X กับเวลา t เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} V_{o1}(t) &= \alpha_1 \int_0^t V_X dt \\ &= \alpha_1 V_X t \end{aligned} \quad (5.19)$$

เมื่อ α_1 คืออัตราขยายของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 และจากการออกแบบแผนผังตามรูปที่ 5.4 จะได้ว่าวงจรอินทิเกรเตอร์ทุกชุดทำการอินทิเกรตสัญญาณในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ q จะสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_X กับเวลา t เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} V_{oq}(t) &= \frac{V_X t^q \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_q}{q!} \\ &= \frac{V_X t^q \prod_{m=1}^q \alpha_m}{q!} \end{aligned} \quad (5.20)$$

โดยที่ α_m คืออัตราการขยายของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ m เมื่อ $m=1, 2, \dots, q$ จากแผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 นี้ จะใช้แรงดันเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ q ไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_Y ซึ่งเอาต์พุตที่ได้คือสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมการสุ่มและคงค่าแรงดันจากเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ p เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ และเมื่อกำหนดให้ช่วงเวลาที่วงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ q ใช้ในการอินทิเกรตสัญญาณจนทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุต $V_{oq}(t_1)$ เพิ่มจากศูนย์จนมีค่าเท่ากับค่าแรงดันอ้างอิง V_Y มีค่าเป็น t_1 จะได้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$V_{oq}(t_1) = \frac{V_X t_1^q \prod_{m=1}^q \alpha_m}{q!} = V_Y \quad (5.21)$$

ซึ่งสามารถหาค่าช่วงเวลา t_1 ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_1 = \left[\frac{V_Y q!}{V_X \prod_{m=1}^q \alpha_m} \right]^{\frac{1}{q}} \quad (5.22)$$

ที่เวลา $t = t_1$ นี้ สัญญาณเอาต์พุต ϕ_1 ของวงจรเปรียบเทียบกับแรงดันจะมีการเปลี่ยนสถานะจากศูนย์ไปเป็นบวก จึงได้ทำการกลับสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 เป็นสัญญาณนาฬิกา $\bar{\phi}_1$ เพื่อที่จะนำสัญญาณที่ได้นี้ไปทำการหยุดอินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ p และขณะเดียวกันก็นำสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ไปควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณให้ทำการสุ่มและคงค่าแรงดันเอาต์พุต $V_{op}(t)$ จากวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ p ออกมาเป็นแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ นั่นคือ

$$V_o(t) = V_{op}(t_1) = \frac{V_X t_1^p \prod_{n=1}^p \alpha_n}{p!} \quad (5.23)$$

โดยที่ α_n คืออัตราขยายของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ n เมื่อ $n=1,2,\dots,p$
ทำการแทน (5.22) ใน (5.23) จะได้

$$V_o(t) = \frac{\left[q! V_Y \prod_{n=1}^p \alpha_n \right]^{\frac{p}{q}}}{p! \prod_{m=1}^q \alpha_m} (V_X)^{1-\frac{p}{q}} \quad (5.24)$$

หรือ

$$V_o(t) = k (V_Y)^{\frac{p}{q}} \quad (5.25)$$

เมื่อ

$$k = \frac{\left[q! \prod_{n=1}^p \alpha_n \right]^{\frac{p}{q}}}{p! \prod_{m=1}^q \alpha_m} (V_X)^{1-\frac{p}{q}}$$

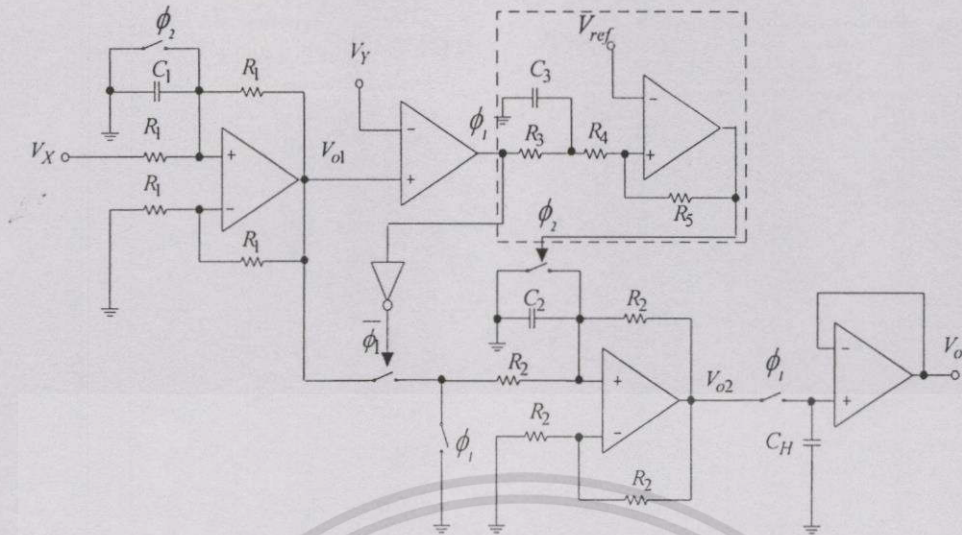
จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ ตามสมการ (5.25) มีค่าแปรตามแรงดันอินพุต V_Y ยกกำลัง (p/q) นั้นแสดงว่าวงจรรยกกำลังที่ได้นำเสนอในรูปแบบนี้สามารถใช้เป็นวงจรรยกกำลัง (p/q) ได้ตามต้องการและเมื่อพิจารณาให้ละเอียดลงไปในสมการ (5.25) จะเห็นว่าวงจรไม่สามารถที่จะสร้างเป็นวงจรรวมและหารสัญญาณได้ สำหรับในทางปฏิบัตินั้นต้องมีการนำสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 มาใช้ในการรีเซตการทำงานของวงจรรยกกำลังเพื่อให้ค่าเริ่มต้นของวงจรรีเซ็ตเตอร์ทุกวงจรเป็นศูนย์ในแต่ละรอบของการทำงานตามรูปที่ 5.4 ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ไปเป็นอินพุตให้กับวงจรรีเซ็ตทำงานร่วมกับวงจรมิติที่ทริกเกอร์เช่นเดียวกับวงจรรยกกำลังในรูปแบบที่ 1 ให้ได้สัญญาณนาฬิกา ϕ_2 แล้วนำสัญญาณที่ได้นี้ไปรีเซตวงจรรีเซ็ตเตอร์ทุกวงจรในวงจรรยกกำลัง และการกระทำเช่นนี้ยังทำให้เกิดการปรับค่าของสัญญาณเอาต์พุต $V_o(t)$ เมื่อค่าแรงดันอินพุต V_Y เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ด้วย

5.2 การออกแบบวงจรรยกกำลัง

ในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบวงจรรยกกำลังที่มีเลขชี้กำลังเป็น (p/q) ตามหลักการทั้งสองรูปแบบที่ได้กล่าวมา ในที่นี้จะยกตัวอย่างการออกแบบวงจรรยกกำลังสอง วงจรรยกกำลังสาม วงจรถอดรอกที่สอง วงจรถอดรอกที่สาม และวงจรรวมและหารสัญญาณ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.3.1 วงจรรยกกำลังสอง

ในการออกแบบวงจรรยกกำลังสองนั้นจะใช้แผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 เนื่องจากวงจรรยกกำลังในรูปแบบนี้จะใช้จำนวนของวงจรรีเซ็ตเตอร์น้อยกว่าวงจรรยกกำลังในรูปแบบที่ 1 โดยกำหนดให้เลขชี้กำลัง $p=2$ และ $q=1$ ซึ่งเป็นกรณีที่ค่าของเศษมีค่ามากกว่าส่วน ดังนั้นจึงเลือกใช้แผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 (ก) และได้เลือกใช้วงจรรีเซ็ตเตอร์ในการออกแบบวงจร ได้วงจรมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 วงจรยกกำลังสองที่ใช้ดี โมอินทิเกรเตอร์

และจากสมการ (5.25) เป็นความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ กับแรงดันอ้างอิง V_Y ยกกำลัง (p/q) ถ้าต้องการให้เลขชี้กำลังเป็น $p=2$ และ $q=1$ จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ ดังนี้

$$V_o(t) = kV_Y^2$$

$$\text{เมื่อ } k = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{2(\alpha_1)^2} V_X^{-1} = \frac{\alpha_2}{2\alpha_1 V_X}$$

หรือ

$$V_o(t) = \frac{\alpha_2}{2\alpha_1 V_X} V_Y^2 \quad (5.26)$$

แทนค่า $\alpha_1 = \frac{2}{R_1 C_1}$ และ $\alpha_2 = \frac{2}{R_2 C_2}$ ลงในสมการ (5.26) จะได้

$$V_o(t) = \frac{R_1 C_1}{2R_2 C_2 V_X} V_Y^2 \quad (5.27)$$

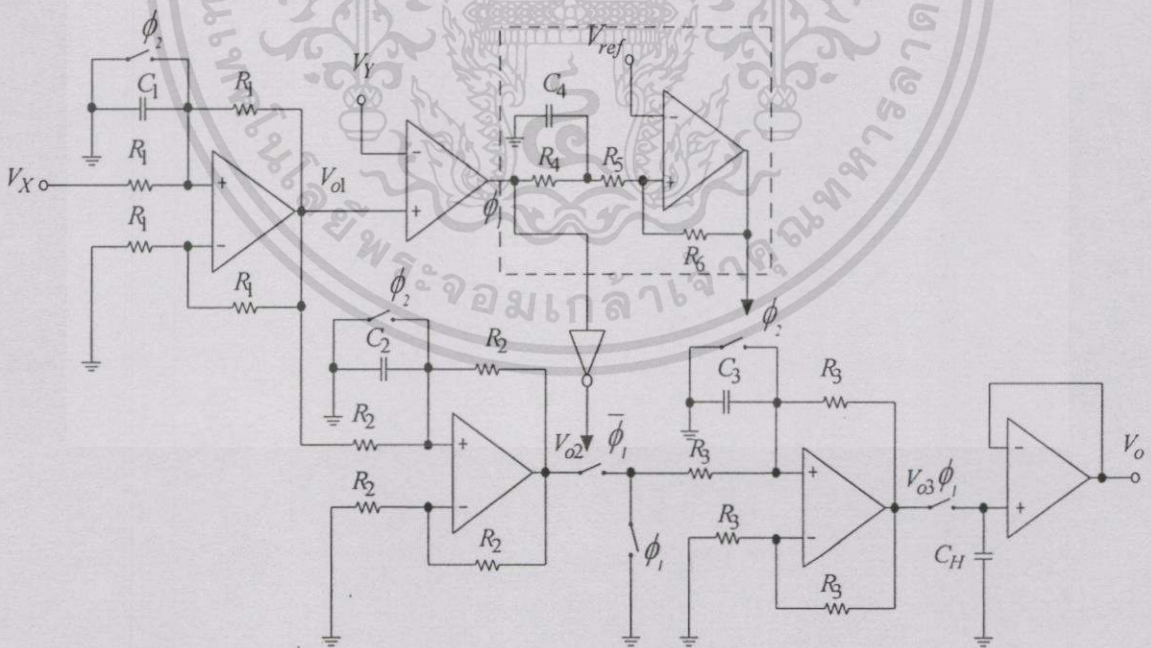
จากสมการ (5.27) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ แปรตามค่ากำลังสองของสัญญาณแรงดันอินพุต V_Y เมื่อกำหนดให้เลขชี้กำลังเป็น $p=2$ และ $q=1$ และในส่วนของวงจรช่วงเวลาตามเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประในรูปที่ 5.5 ประกอบด้วยวงจรรอซีและวงจรมิทที่ทริกเกอร์แบบไม่กลับเฟส เมื่อสัญญาณนาฬิกาเปลี่ยนสถานะจากศูนย์เป็นบวก $+V_{sat}$ แรงดันอินพุตของวงจรมิทที่ทริกเกอร์จะมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่มด้านสูง V_{UT} ที่มีค่าเป็น $V_{UT} = \frac{R_3 + R_4}{R_3} V_{ref} + \frac{R_3}{R_4} V_{sat}$ ตามสมการ (3.40ก) และเมื่อสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 จะเปลี่ยนสถานะจากบวก $+V_{sat}$ เป็นศูนย์ ซึ่งเอาต์พุตของวงจรรอซีหรือแรงดันอินพุตของวงจรมิทที่ทริกเกอร์มีค่าน้อยกว่าแรงดันขีดเริ่มด้านต่ำ V_{LT} ที่มีค่าเป็น $V_{LT} = \frac{R_3 + R_4}{R_3} V_{ref} - \frac{R_3}{R_4} V_{sat}$ ตามสมการ (3.40ข) ซึ่งในการออกแบบวงจรอื่นๆก็จะใช้วงจรหน่วงเวลาในลักษณะเช่นนี้ทั้งหมด

5.3.2 วงจรรยอกำลังสาม

ในการออกแบบวงจรรยอกำลังสามสามารถทำได้โดยการนำแผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 มาเป็นต้นแบบในการออกแบบเช่นเดียวกับวงจรรยอกำลังสอง โดยกำหนดให้เลขชี้กำลัง $p=3$ และ $q=1$ ซึ่งเป็นกรณีที่ค่าของเศษมีค่ามากกว่าส่วน ดังนั้นจึงใช้แผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 (ก) และในกรณีที่เลือกใช้วงจรดีโอบอินทิเกรเตอร์ในการออกแบบวงจร จะได้วงจรที่มีลักษณะดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 วงจรรยอกำลังสามที่ใช้ดีโอบอินทิเกรเตอร์

เมื่อพิจารณาสมการ (5.25) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันอ้างอิง V_Y ยกกำลัง (p/q) เมื่อต้องการที่จะออกแบบเป็นวงจรยกกำลังสามทำได้โดยการแทนค่า $p=3$ และ $q=1$ จะได้ค่าของแรงดันเอาต์พุตเป็นดังนี้

$$V_o(t) = kV_Y^3$$

เมื่อ $k = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{3!(\alpha_1)^3} V_X^{-2} = \frac{\alpha_2 \alpha_3}{6} \left(\frac{1}{\alpha_1 V_X} \right)^2$

หรือ

$$V_o(t) = \frac{\alpha_2 \alpha_3}{6} \left(\frac{1}{\alpha_1 V_X} \right)^2 V_Y^3 \quad (5.28)$$

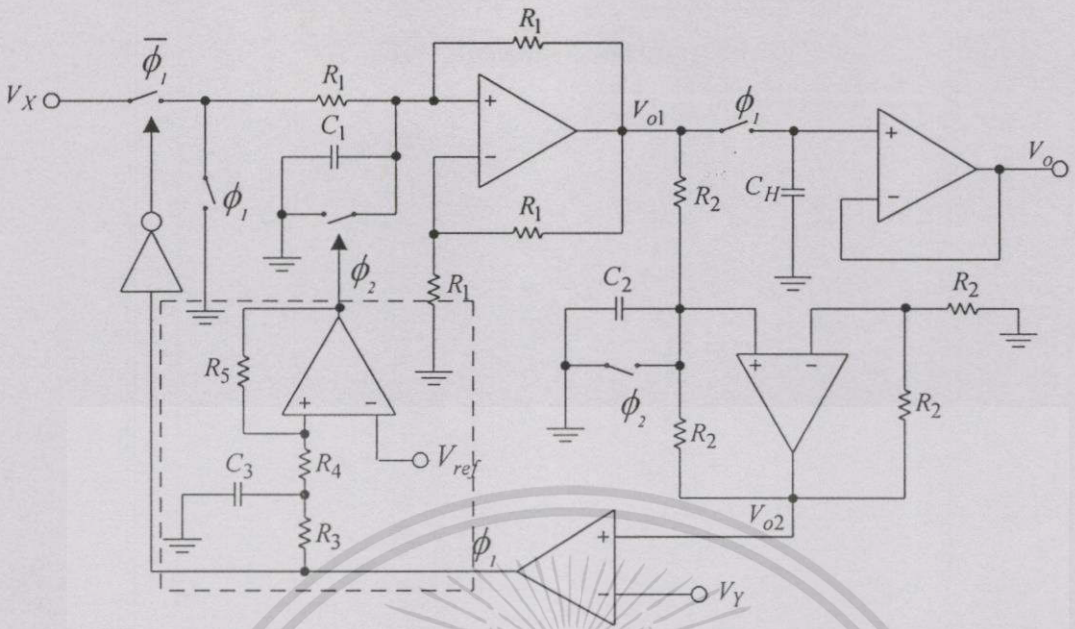
แทนค่า $\alpha_1 = \frac{2}{R_1 C_1}$, $\alpha_2 = \frac{2}{R_2 C_2}$ และ $\alpha_3 = \frac{2}{R_3 C_3}$ ลงในสมการ (5.28) จะได้

$$V_o(t) = \frac{1}{6R_2 C_2 R_3 C_3} \left(\frac{R_1 C_1}{V_X} \right)^2 V_Y^3 \quad (5.29)$$

จากสมการ (5.29) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ จะแปรตามค่ากำลังสามของสัญญาณแรงดันอ้างอิง V_Y เมื่อกำหนดให้เลขชี้กำลังเป็น $p=3$ และ $q=1$ ซึ่งจะทำให้ได้วงจรยกกำลังสามตามที่ต้องการ

5.3.3 วงจรถอดรอกที่สอง

ในการออกแบบวงจรถอดรอกที่สองสามารถทำได้โดยการนำแผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 มาเป็นต้นแบบในการออกแบบ โดยกำหนดให้เลขชี้กำลัง $p=1$ และ $q=2$ ซึ่งเป็นกรณีที่ค่าของเศษมีค่าน้อยกว่าส่วน ดังนั้นจะใช้แผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 (ข) และในกรณีที่ใช้วงจรถอดรอกอินทิเกรเตอร์ในการออกแบบวงจร จะได้วงจรที่มีลักษณะดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 วงจรทรานซิสเตอร์ที่ใช้ดิโอบอินทิเกรเตอร์

เมื่อพิจารณาสมการ (5.25) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันอ้างอิง V_Y ขกกำลัง (p/q) เมื่อต้องการที่จะออกแบบเป็นวงจรทรานซิสเตอร์ทำได้โดยการแทนค่า $p=1$ และ $q=2$ จะได้ค่าของแรงดันเอาต์พุตเป็นดังนี้

$$V_o(t) = kV_Y^{\frac{1}{2}} = k\sqrt{V_Y}$$

เมื่อ $k = \sqrt{\frac{2\alpha_1 V_X}{\alpha_2}}$

หรือ

$$V_o(t) = \sqrt{\frac{2\alpha_1 V_X}{\alpha_2}} \sqrt{V_Y} \tag{5.30}$$

แทนค่า $\alpha_1 = \frac{2}{R_1 C_1}$ และ $\alpha_2 = \frac{2}{R_2 C_2}$ ลงในสมการ (5.30) จะได้

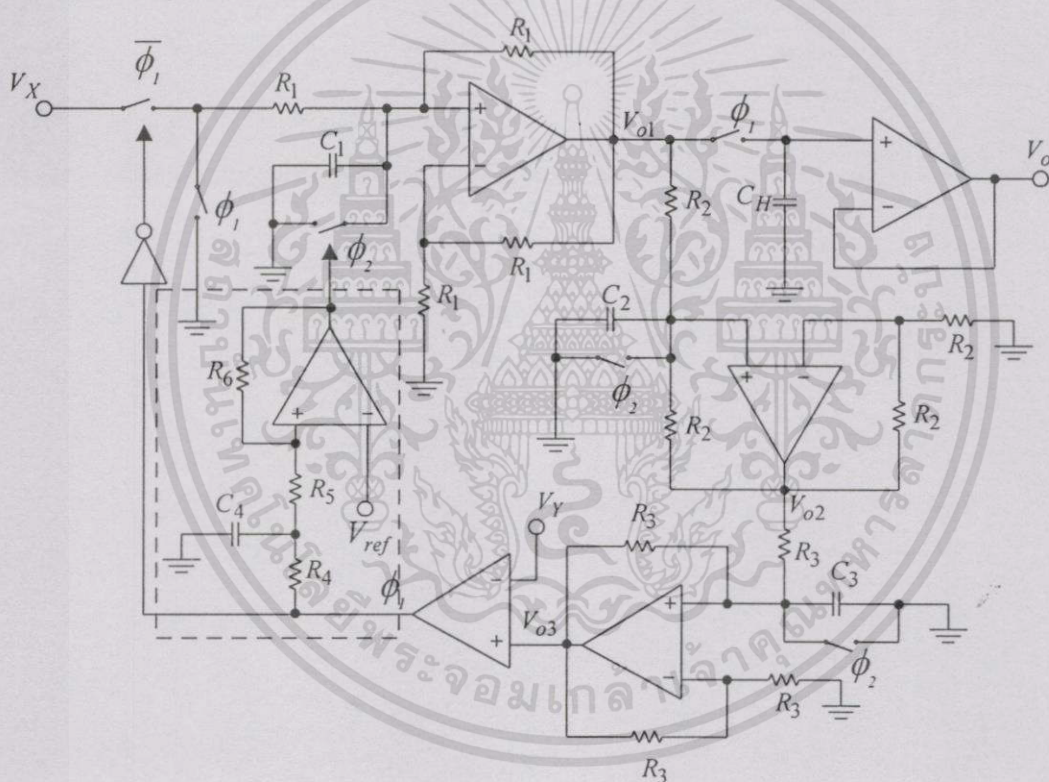
$$V_o(t) = \sqrt{\frac{2R_2 C_2 V_X}{R_1 C_1}} \sqrt{V_Y} \tag{5.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (5.31) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ จะแปรตามค่าลอการิทึมที่สองของสัญญาณแรงดันอ้างอิง V_Y เมื่อกำหนดให้เลขชี้กำลังเป็น $p=1$ และ $q=2$ ซึ่งจะทำให้ได้วงจรลอการิทึมที่สองตามที่ต้องการ

5.3.4 วงจรลอการิทึมที่สาม

ในการออกแบบวงจรลอการิทึมที่สามสามารถทำได้โดยการนำแผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 มาเป็นต้นแบบในการออกแบบเช่นเดียวกับวงจรลอการิทึมที่สอง โดยกำหนดให้เลขชี้กำลัง $p=1$ และ $q=3$ ซึ่งเป็นกรณีที่ค่าของเศษมีค่าน้อยกว่าส่วน ดังนั้นจึงใช้แผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.4 (ข) และในกรณีที่เลือกใช้วงจรถิโบนทิเกรเตอร์ในการออกแบบวงจร จะได้วงจรที่มีลักษณะดังในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 วงจรลอการิทึมที่สามที่ใช้ดิโบนทิเกรเตอร์

เมื่อพิจารณาสมการ (5.25) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันอ้างอิง V_Y ยกกำลัง (p/q) เมื่อต้องการที่จะออกแบบเป็นวงจรลอการิทึมที่สาม ทำได้โดยการแทนค่า $p=1$ และ $q=3$ จะได้ค่าของแรงดันเอาต์พุตเป็นดังนี้

$$V_o(t) = kV_Y^{\frac{1}{3}} = k\sqrt[3]{V_Y}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } k = \left(\frac{6\alpha_1^2}{\alpha_2\alpha_3V_X^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

หรือ

$$V_o(t) = \left(\frac{6\alpha_1^2}{\alpha_2\alpha_3V_X^2} \right)^{\frac{1}{3}} (V_Y)^{\frac{1}{3}} \quad (5.32)$$

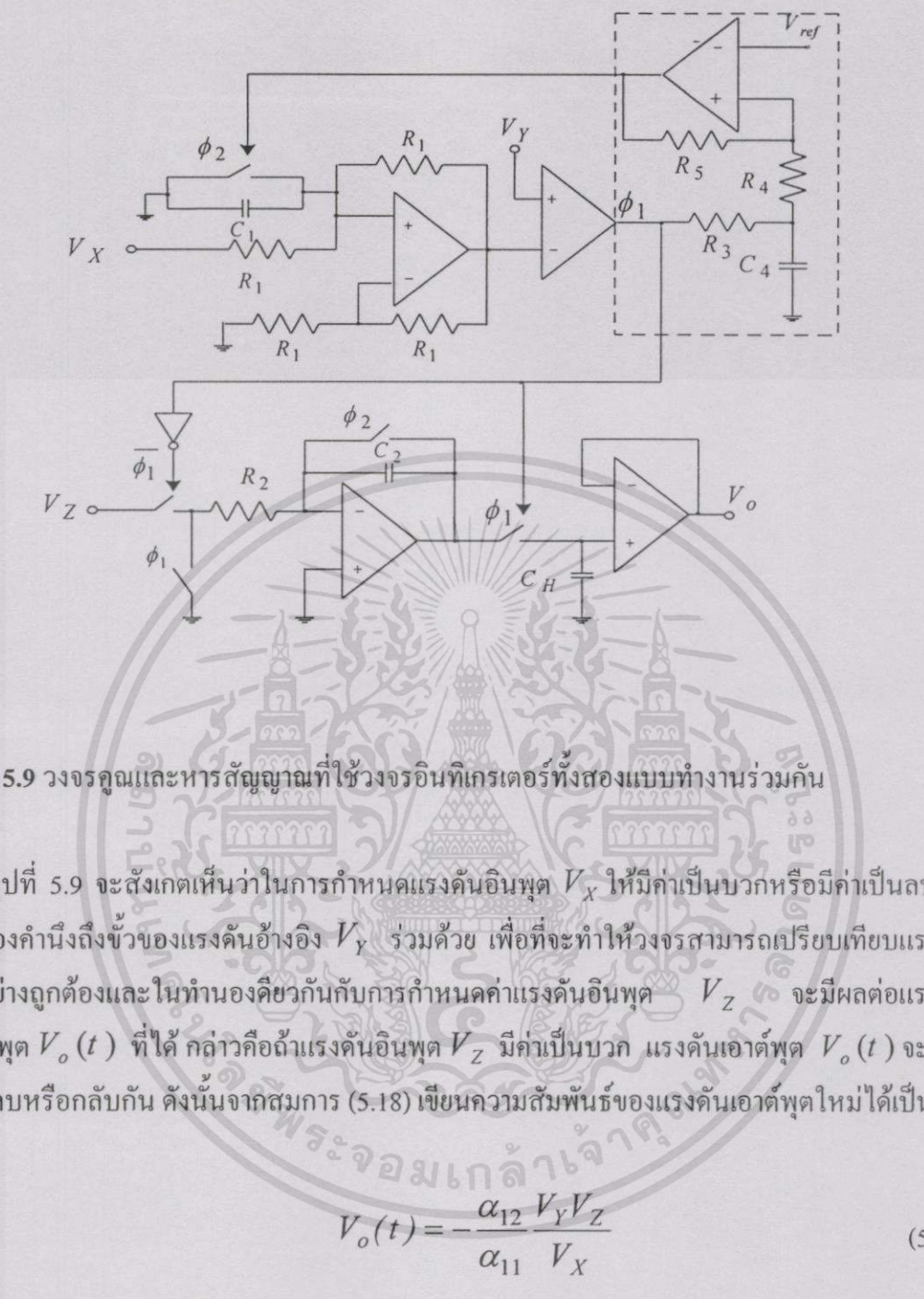
แทนค่า $\alpha_1 = \frac{2}{R_1C_1}$, $\alpha_2 = \frac{2}{R_2C_2}$ และ $\alpha_3 = \frac{2}{R_3C_3}$ ลงในสมการ (5.32) จะได้

$$V_o(t) = \left(\frac{6R_2C_2R_3C_3}{(R_1C_1)^2V_X^2} \right)^{\frac{1}{3}} (V_Y)^{\frac{1}{3}} \quad (5.33)$$

จากสมการ (5.33) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ จะแปรตามค่าลอการิทึมที่สามของ สัญญาณแรงดันอ้างอิง V_Y เมื่อกำหนดให้เลขชี้กำลังเป็น $p=1$ และ $q=3$ ซึ่งจะทำให้ได้วงจรลอการิทึมที่สามตามที่ต้องการ

5.2.5 วงจรคูณและหารสัญญาณ

วงจรคูณและหารสัญญาณสามารถออกแบบได้โดยใช้แผนผังการทำงานในรูปแบบที่ 1 หรือแผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.2 โดยกำหนดให้เลขชี้กำลัง $p=q=1$ ซึ่งจะใช้จำนวนของวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 1 เพียงหนึ่งวงจรและใช้จำนวนของวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 2 เป็นหนึ่งวงจรเช่นเดียวกัน รูปแบบของวงจรซึ่งสามารถสร้างได้แบบหนึ่งโดยเลือกใช่วงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่เป็นมัลติเพล็กซ์อินทิเกรเตอร์ทำงานร่วมกับวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่เป็นดีโอบอินทิเกรเตอร์แสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 วงจรคูณและหารสัญญาณที่ใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ทั้งสองแบบทำงานร่วมกัน

จากรูปที่ 5.9 จะสังเกตเห็นว่าในการกำหนดแรงดันอินพุต V_X ให้มีค่าเป็นบวกหรือมีค่าเป็นลบนั้น จะต้องคำนึงถึงขั้วของแรงดันอ้างอิง V_Y ร่วมด้วย เพื่อที่จะทำให้วงจรสามารถเปรียบเทียบแรงดันได้อย่างถูกต้องและในทำนองเดียวกันกับการกำหนดค่าแรงดันอินพุต V_Z จะมีผลต่อแรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ ที่ได้ กล่าวคือถ้าแรงดันอินพุต V_Z มีค่าเป็นบวก แรงดันเอาต์พุต $V_o(t)$ จะมีค่าเป็นลบหรือกลับกัน ดังนั้นจากสมการ (5.18) เขียนความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตใหม่ได้เป็น

$$V_o(t) = -\frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}} \frac{V_Y V_Z}{V_X} \quad (5.34)$$

แทนค่า $\alpha_{11} = \frac{2}{R_1 C_1}$ และ $\alpha_{12} = \frac{1}{R_2 C_2}$ ลงในสมการ (5.34) จะได้

$$V_o(t) = -\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2} \frac{V_Y V_Z}{V_X} \quad (5.35)$$

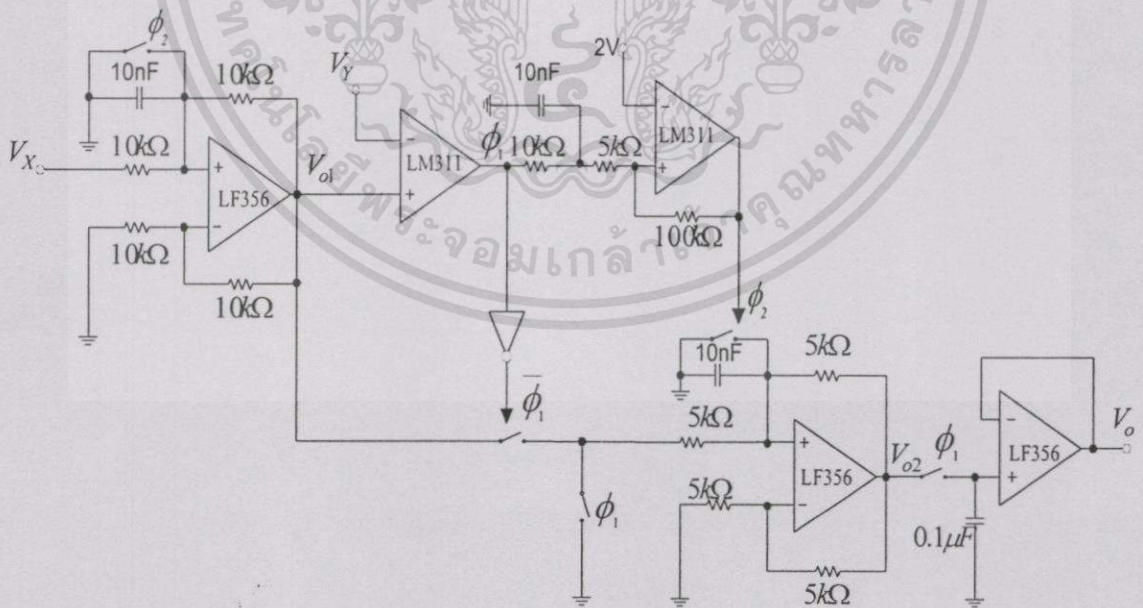
จากสมการ (5.35) วงจรคูณและหารสัญญาณที่ออกแบบตามรูปที่ 5.9 นี้ จะมีหลักการทำงานคล้ายกับวงจรคูณและหารสัญญาณตาม [17] แต่จะมีข้อได้เปรียบคือในวงจรจะไม่ใช้วงจรโมโนสเตเบิลในการควบคุมจังหวะการทำงานของวงจร จึงทำให้เอาต์พุตที่ได้ไม่เกิดความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความกว้างของพัลส์ของวงจร โมโนสเตเบิล

5.4 การทดลองและสรุปผลลัพท์

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรกำลังตามหลักการที่ได้นำเสนอมาแล้ว ในการทดลองใช้อุปกรณ์เบอร์ LF356 ในส่วนของวงจรอินทิเกรเตอร์และวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ สำหรับวงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรซิมิททริกเกอร์จะใช้ไอซีเบอร์ LM311 ใช้นาลอคสวิทช์เบอร์ 4066 ใช้อินเวอร์เตอร์เบอร์ 7404 และใช้ไฟเลี้ยงวงจร ± 5 โวลต์ ซึ่งผลการทดลองของวงจรต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

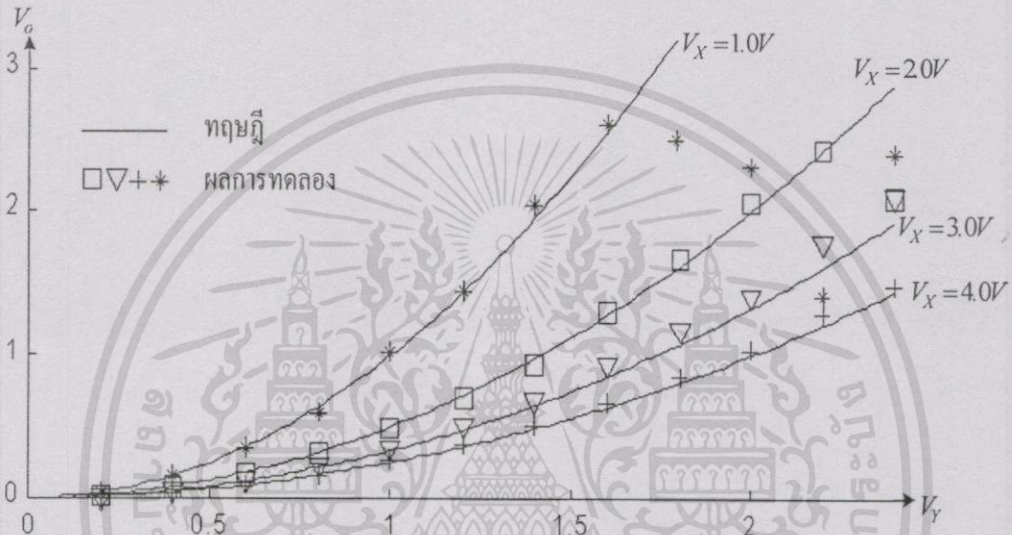
5.4.1 วงจรกำลังสอง

ในการทดลองวงจรกำลังสองได้ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 5.5 โดยใช้แรงดันอ้างอิง $V_{ref} = 2V$ ใช้ค่าความต้านทาน $R_1 = R_3 = 10k\Omega$, $R_2 = R_4 = 5k\Omega$, $R_5 = 100k\Omega$ และค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = C_3 = 10nF$, $C_H = 0.1\mu F$ แสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 วงจรกำลังสองที่ใช้ในการทดลอง

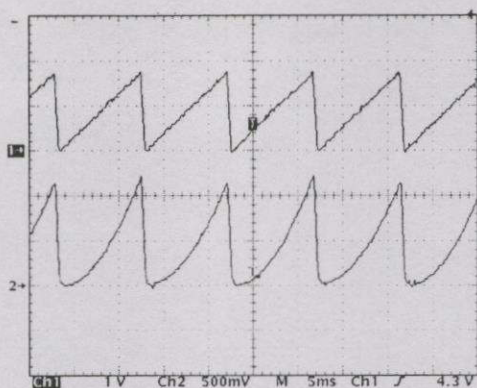
จากรูปที่ 5.10 ทำการแทนค่าอุปกรณ์ต่างๆลงในสมการ (5.27) จะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรยกกำลังสองเป็น $V_o(t) = kV_Y^2$ เมื่อค่าอัตราขยายของวงจร $k = \frac{1}{V_X}$ โดยได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิง V_Y กับแรงดันเอาต์พุต V_o เมื่อแรงดันอ้างอิง V_X มีค่าต่างๆกัน นั่นคือ $V_X = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์หรือค่า $k = 1.0, 0.5, 0.333$ และ 0.25 ตามลำดับได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอินพุต V_Y ของวงจรยกกำลังสอง เมื่อ $V_X = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์

จากราฟจะสังเกตเห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันอ้างอิง V_Y มากกว่า 1.5 โวลต์ และให้แรงดัน V_X มีค่าไม่เกิน 2 โวลต์ เอาต์พุตที่ได้จะเกิดความผิดพลาดขึ้นบ้างเนื่องจากเอาต์พุตจากการอินทิเกรตแรงดัน V_X ที่นำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_Y ตามรูปที่ 5.10 นี้มีค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง V_Y จึงมีผลทำให้ไม่เกิดสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ที่จะนำไปควบคุมวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งแก้ไขได้โดยการเลือกแรงดันอ้างอิง V_X ให้มีค่าสูงขึ้นดังกราฟในรูปที่ 5.11

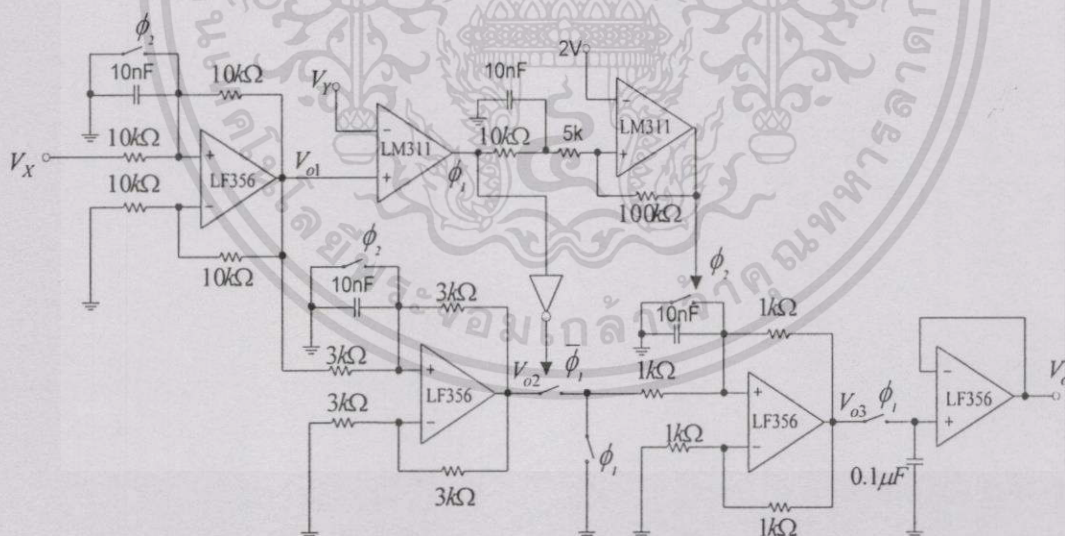
ในการทดลองวงจรยกกำลังสองกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่แปรตามเวลาโดยกำหนดให้อินพุต V_Y เป็นสัญญาณรูปฟันเลื่อยความถี่ 100 Hz ที่มีการยกระดับของสัญญาณให้มีค่าไม่เป็นลบผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ผลการทดลองของวงจรยกกำลังสองเมื่ออินพุต V_Y เป็นสัญญาณฟันเลื่อย (เส้นบน) และเอาต์พุต (เส้นล่าง)

5.4.2 วงจรยกกำลังสาม

ในการทดลองวงจรยกกำลังสาม ได้ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 5.6 โดยใช้แรงดันอ้างอิง $V_{ref} = 2V$ ใช้ค่าความต้านทาน $R_1 = R_4 = 10k\Omega$, $R_2 = 3k\Omega$, $R_3 = 1k\Omega$, $R_5 = 5k\Omega$, $R_6 = 100k\Omega$ และค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 10nF$, $C_H = 0.1\mu F$ แสดงดังรูปที่ 5.13

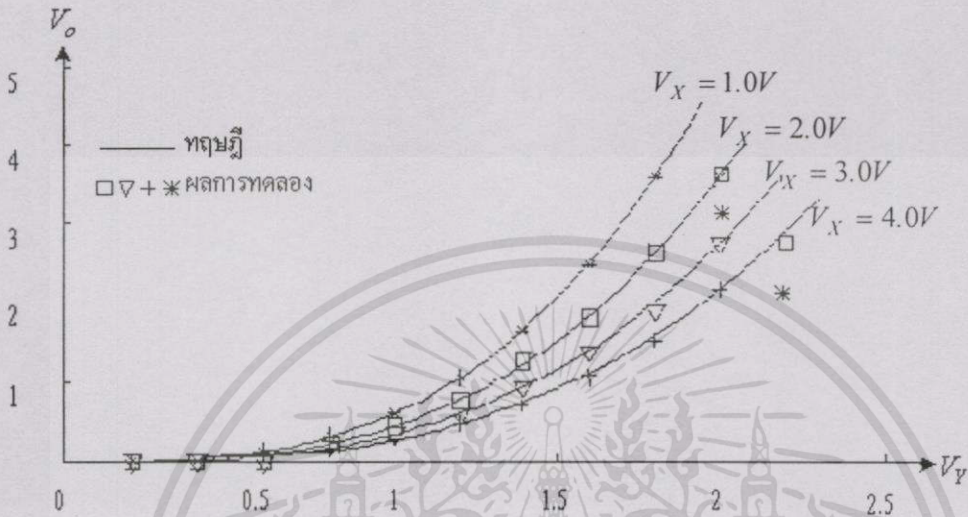


รูปที่ 5.13 วงจรยกกำลังสามที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 5.13 ทำการแทนค่าอุปกรณ์ต่างๆลงในสมการ (5.29) จะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรยกกำลังสามเป็น $V_o(t) = kV_Y^3$ เมื่อค่าอัตราขยายของวงจร $k = \frac{0.55}{V_X}$ โดยได้ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

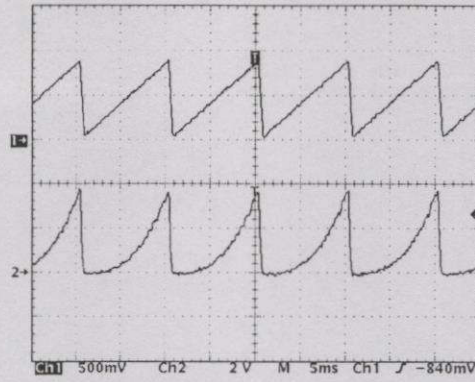
หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิง V_Y กับแรงดันเอาต์พุต V_O เมื่อแรงดันอ้างอิง V_X มีค่าต่างๆ กัน นั่นคือ $V_X = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์หรือค่า $k = 0.55, 0.275, 0.183$ และ 0.137 ตามลำดับ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_O กับแรงดันอินพุต V_Y ของวงจรยกกำลังสาม เมื่อ $V_X = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันอ้างอิง V_Y มากกว่า 1.8 โวลต์ และให้แรงดันอ้างอิง V_X มีค่าไม่เกิน 2 โวลต์ เอาต์พุตที่ได้จะเกิดความผิดพลาดขึ้นบ้างเนื่องจากเอาต์พุตจากการอินทิเกรตแรงดันอ้างอิง V_X ที่นำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_Y ตามรูปที่ 5.13 นี้มีค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง V_Y จึงมีผลทำให้ไม่เกิดสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ที่จะนำไปควบคุมวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ ซึ่งแก้ไขได้โดยการเลือกแรงดันอ้างอิง V_X ให้มีค่าสูงขึ้นดังกราฟในรูปที่ 5.14

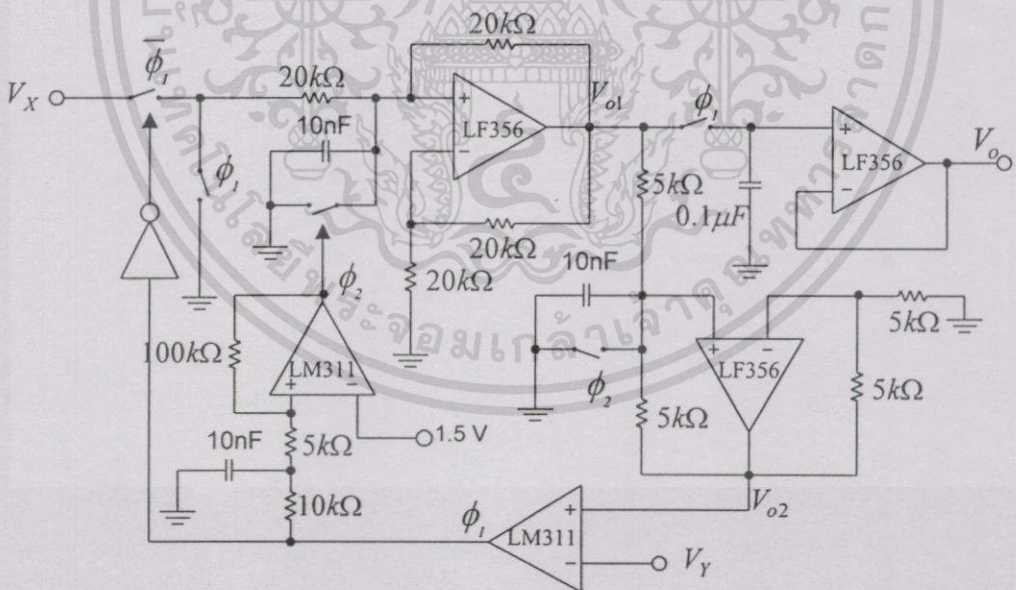
ในการทดลองวงจรยกกำลังสามกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่แปรตามเวลาโดยกำหนดให้อินพุต V_Y เป็นสัญญาณรูปฟันเลื่อยความถี่ 100 Hz ที่มีการยกระดับของสัญญาณให้มีค่าไม่เป็นลบผ่านวงจรมุมและคงค่าสัญญาณจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ผลการทดลองของวงจรยกกำลังสามเมื่ออินพุต V_Y เป็นสัญญาณฟันเลื่อย (เส้นบน) และเอาต์พุต (เส้นล่าง)

5.4.3 วงจรถอดรหัที่สอง

ในการทดลองวงจรถอดรหัที่สอง ได้ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 5.7 โดยใช้แรงดันอ้างอิง $V_{ref} = 1.5V$ ใช้ค่าความต้านทาน $R_1 = 20k\Omega$ $R_2 = 5k\Omega$ $R_3 = 10k\Omega$ $R_4 = 5k\Omega$ $R_5 = 100k\Omega$ และค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = C_3 = 10nF$, $C_H = 0.1\mu F$ แสดงดังรูปที่ 5.16

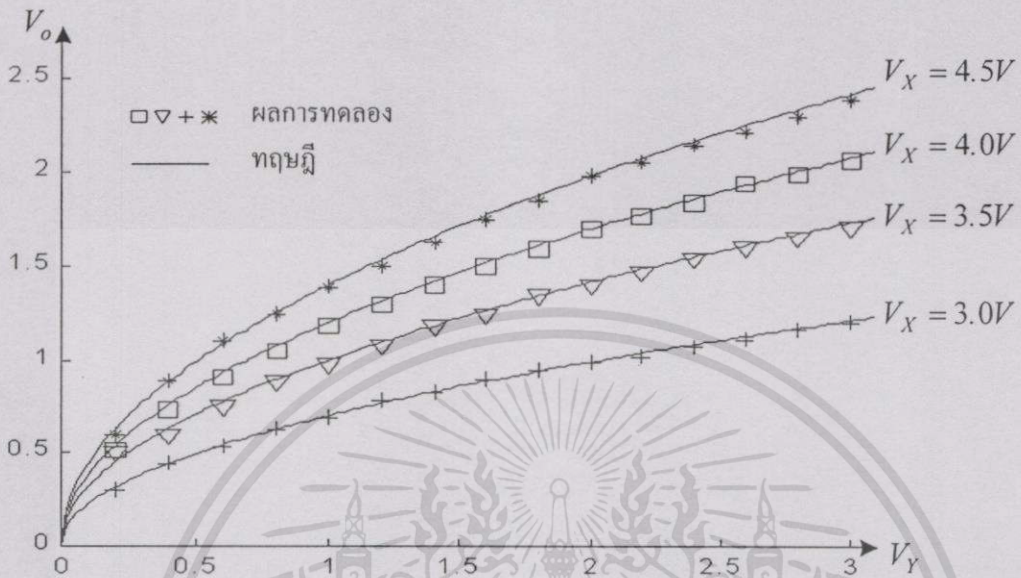


รูปที่ 5.16 วงจรถอดรหัที่สองที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 5.16 ทำการแทนค่าอุปกรณ์ต่างๆลงในสมการ (5.31) จะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรถอดรหัที่สองเป็น $V_o(t) = k\sqrt{V_Y}$ เมื่อค่าอัตราขยายของวงจร $k = 0.707\sqrt{V_X}$ โดยได้ทำ

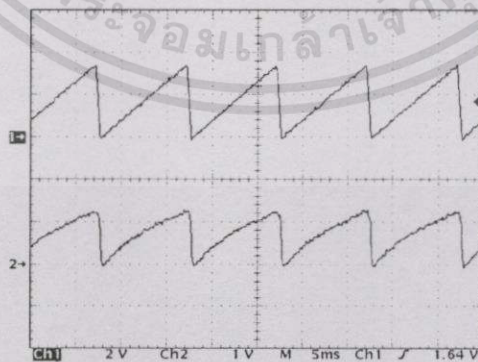
การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิง V_Y กับแรงดันเอาต์พุต V_o เมื่อแรงดันอ้างอิงไม่แปรผันใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_X มีค่าต่าง ๆ กัน นั่นคือ $V_X = 3.0, 3.5, 4.0$ และ 4.5 โวลต์หรือค่า $k = 1.225, 1.322, 1.414$ และ 1.499 ตามลำดับ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอินพุต V_Y ของวงจรอครากที่สอง เมื่อ $V_X = 3.0, 3.5, 4.0$ และ 4.5 โวลต์

ในการทดลองวงจรอครากที่สองกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่แปรตามเวลาโดยกำหนดให้อินพุต V_Y เป็นสัญญาณรูปฟันเลื่อยความถี่ 100 Hz ที่มีกรวยระดับของสัญญาณให้มีค่าไม่เป็นลบผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.18

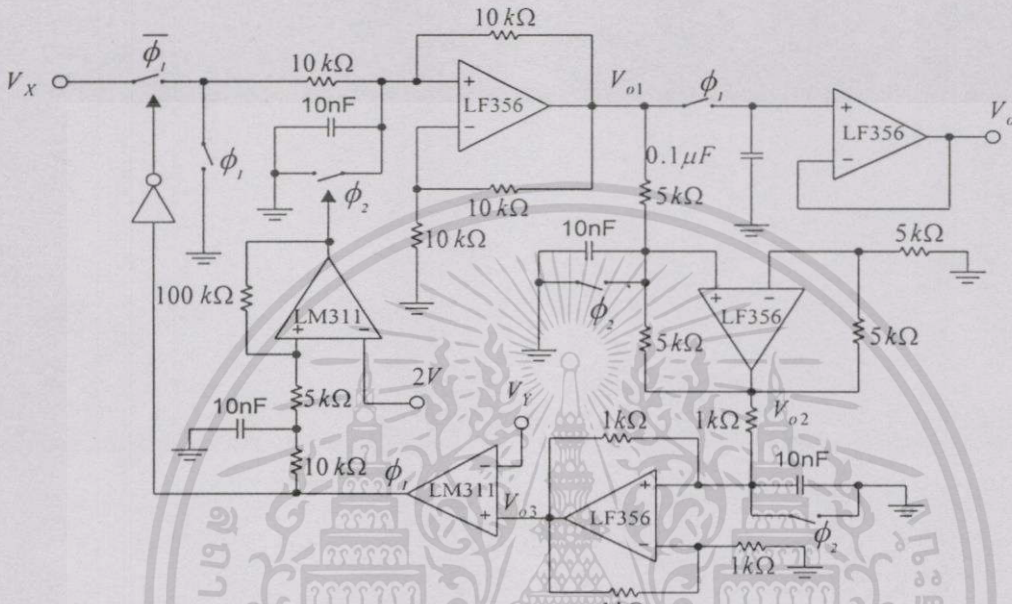


รูปที่ 5.18 ผลการทดลองของวงจรอครากที่สองเมื่ออินพุต V_Y เป็นสัญญาณฟันเลื่อย (เส้นบน) และเอาต์พุต (เส้นล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

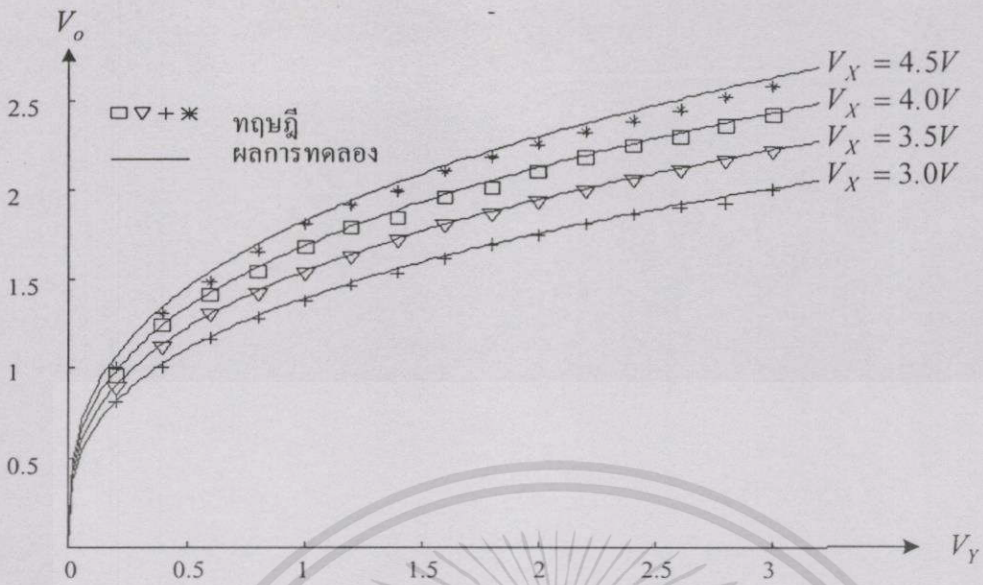
5.4.4- วงจรถอดรากที่สาม

ในการทดลองวงจรถอดรากที่สาม ได้ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 5.8 โดยใช้แรงดันอ้างอิง $V_{ref} = 2V$ ใช้ค่าความต้านทาน $R_1 = R_4 = 10k\Omega$ $R_2 = R_5 = 5k\Omega$ $R_3 = 1k\Omega$ $R_6 = 100k\Omega$ และค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = C_3 = 10nF$, $C_H = 0.1\mu F$ แสดงดังรูปที่ 5.19



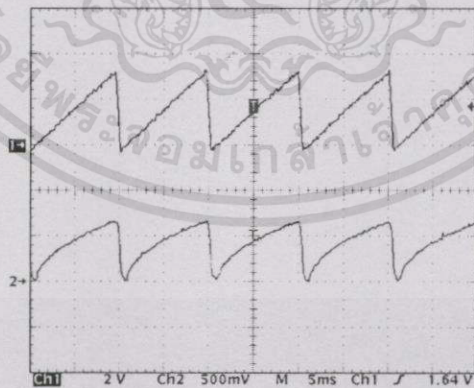
รูปที่ 5.19 วงจรถอดรากที่สามที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 5.19 ทำการแทนค่าอุปกรณ์ต่างๆลงในสมการ (5.33) จะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรถอดรากที่สามเป็น $V_o(t) = k\sqrt[3]{V_Y}$ เมื่อค่าอัตราขยายของวงจร $k = 0.493 \sqrt[3]{V_X^2}$ โดยได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิง V_Y กับแรงดันเอาต์พุต V_o เมื่อแรงดันอ้างอิง V_X มีค่าต่างกัน นั่นคือ $V_X = 3.0, 3.5, 4.0$ และ 4.5 โวลต์หรือค่า $k = 1.025, 1.136, 1.242$ และ 1.343 ตามลำดับ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอินพุต V_Y ของวงจรอครากที่สาม เมื่อ $V_X = 3.0, 3.5, 4.0$ และ 4.5 โวลต์

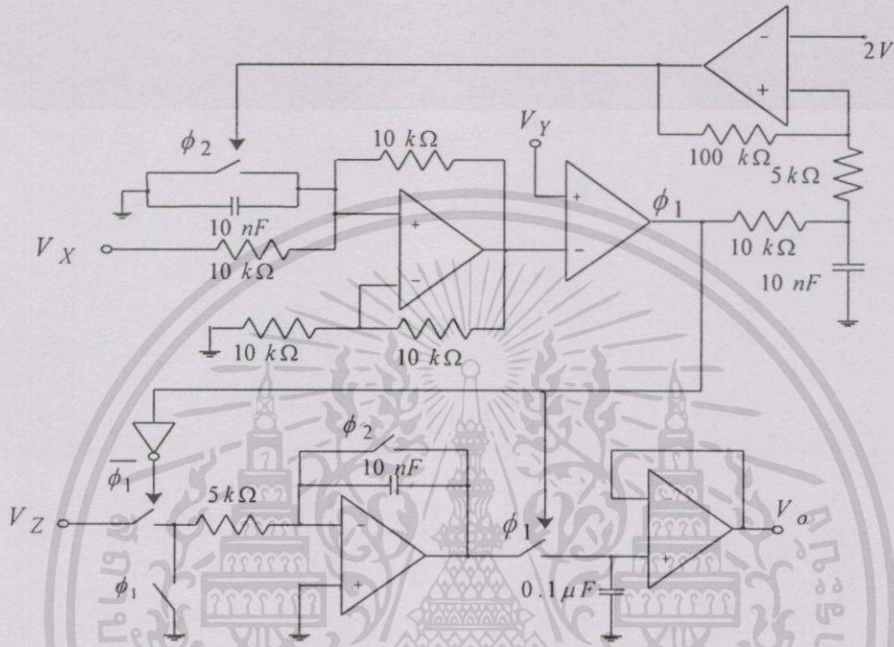
ในการทดลองวงจรอครากที่สามกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่แปรตามเวลาโดยกำหนดให้อินพุต V_Y เป็นสัญญาณรูปฟันเลื่อยความถี่ 100 Hz ที่มีกรยกระดัดของสัญญาณให้มีค่าไม่เป็นลบผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ผลการทดลองของวงจรอครากที่สามเมื่ออินพุต V_Y เป็นสัญญาณฟันเลื่อย (เส้นบน) และเอาต์พุต (เส้นล่าง)

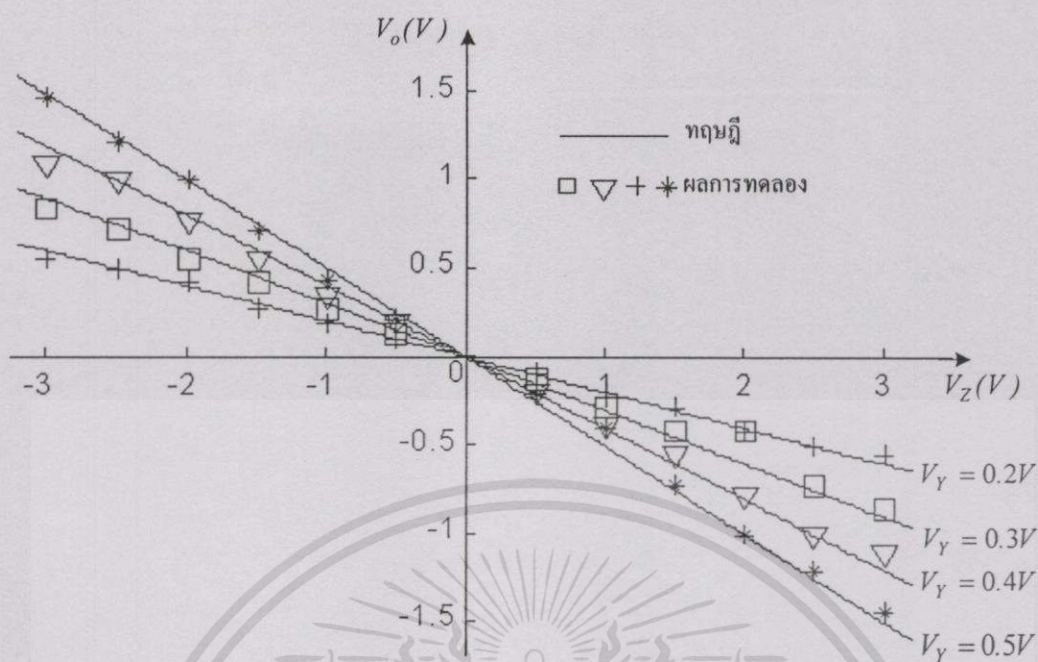
5.4.5 วงจรคูณและหารสัญญาณ

ในการทดลองวงจรคูณและหารสัญญาณ ได้ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 5.9 โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = 10\text{ nF}$ ค่าความต้านทาน $R_1 = R_3 = 10\text{ k}\Omega$ $R_2 = R_4 = 5\text{ k}\Omega$ $R_5 = 100\text{ k}\Omega$ $C_H = 0.1\text{ }\mu\text{F}$ และใช้แรงดันอ้างอิง $V_{ref} = 2\text{ V}$ แสดงดังรูปที่ 5.22



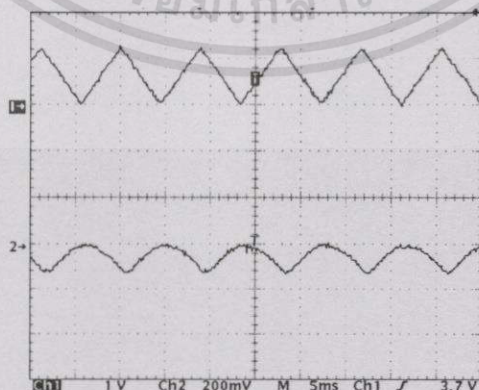
รูปที่ 5.22 วงจรคูณและหารสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 5.22 สามารถสร้างเป็นวงจรคูณสัญญาณ โดยทำการแทนค่าอุปกรณ์ต่างๆลงในสมการ (5.35) จะได้แรงดันเอาต์พุตเป็น $V_o(t) = kV_YV_Z$ เมื่ออัตราขยายของวงจร $k = -\frac{1}{V_X}$ โดยได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_Z กับแรงดันเอาต์พุต V_o เมื่อแรงดันอ้างอิง V_Y มีค่าต่างๆกันนั่นคือ $V_Y = 0.2, 0.3, 0.4$ และ 0.5 โวลต์ ตามลำดับ โดยที่ค่าของแรงดัน $V_X = 1$ โวลต์ จะได้ค่า $k = -1.0$ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอ้างอิง V_y ของวงจรคูณสัญญาณ เมื่อ $V_y = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์ โดยที่ $V_x = 1$ โวลต์

ในการทดลองวงจรคูณสัญญาณกรณีที่อินพุตเป็นสัญญาณที่แปรตามเวลาโดยกำหนดให้อินพุต V_y และอินพุต V_z เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมความถี่ 100 Hz ที่มีการยกระดับของสัญญาณให้มีค่าไม่เป็นลบผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ดังนั้นจะได้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น $V_o(t) = -V^2$ เมื่อ $V_y = V_z = V$ และแรงดันอ้างอิง $V_x = 1$ โวลต์ จะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 ผลการทดลองของวงจรคูณสัญญาณเมื่ออินพุต V_y และ V_z เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (เส้นบน) และเอาต์พุต (เส้นล่าง)

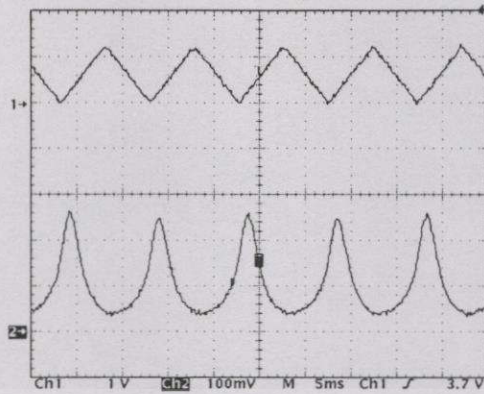
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันเมื่อนำวงจรจากรูปที่ 5.22 สร้างเป็นวงจรหารสัญญาณโดยทำการแทนค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในสมการ (5.35) จะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรหารสัญญาณเป็น $V_o(t) = k \frac{V_Y}{V_X}$ เมื่ออัตราขยายของวงจร $k = -V_Z$ โดยได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_X กับแรงดันเอาต์พุต V_o เมื่อแรงดัน V_Y มีค่าต่าง ๆ กัน นั่นคือ $V_Y = 0.2, 0.3, 0.4$ และ 0.5 โวลต์ โดยที่ค่าของแรงดัน $V_Z = -1$ โวลต์ตามลำดับ และค่า $k = 1$ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอ้างอิง V_X ของวงจรคูณสัญญาณ เมื่อ $V_Y = 1.0, 2.0, 3.0$ และ 4.0 โวลต์ โดยที่ $V_Z = -1$ โวลต์

ในการทดลองวงจรหารสัญญาณกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่แปรตามเวลาโดยกำหนดให้อินพุต V_X เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมความถี่ 100 Hz ที่มีการยกระดับของสัญญาณให้มีค่าไม่เป็นลบผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณและให้แรงดันอ้างอิง V_Y เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.3 โวลต์ ดังนั้นจะได้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น $V_o(t) = \frac{0.3}{V_X}$ เมื่อแรงดันอ้างอิง $V_Z = -1$ โวลต์ จะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 ผลการทดลองของวงจรหารสัญญาณ เมื่ออินพุต V_X เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (เส้นบน) และเอาต์พุต (เส้นล่าง)

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำการทดลองทั้งในกรณีที่ป้อนอินพุตเป็นไฟตรงและในกรณีที่ป้อนอินพุตที่แปรตามเวลา จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ในแต่ละวงจรเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ

5.5 สรุป

วงจรยกกำลังที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีพื้นฐานอยู่บนการนำวงจรอินทิเกรเตอร์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับหลักการสุ่มค่าสัญญาณเช่นเดียวกับ [15] แต่ได้ทำการปรับปรุงให้สะดวกในการใช้งานมากขึ้นซึ่งก่อให้เกิดข้อดีคือไม่ต้องใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอกมาควบคุมการทำงานของวงจร นอกจากนี้ยังให้ระดับเอาต์พุตที่สูงและมีความแม่นยำ อย่างไรก็ตามข้อควรระวังในการใช้งานคือสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจรในกรณีที่อินพุตแปรตามเวลาจะต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้น และข้อควรระวังอีกประการหนึ่งคือความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 และความถี่ของสัญญาณอินพุตจะต้องเป็นไปตามทฤษฎีการสุ่มค่าสัญญาณ (sampling theorem) นั่นคือความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 จะมีค่าไม่น้อยกว่าสองเท่าของความถี่สัญญาณอินพุต

บทสรุปและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึงการปรับปรุงวงจรวัดความถี่และวงจรรยกกำลัง โดยได้นำหลักการ
 สุ่มค่าสัญญาณมาประยุกต์ใช้ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นโดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท เริ่มด้วยบท
 ที่ 1 ได้กล่าวถึงปัญหาของการสร้างวงจรวัดความถี่และวงจรรยกกำลัง ซึ่งเป็นเหตุจูงใจให้เกิดการ
 ค้นคว้าและวิจัยเพื่อทำการปรับปรุงวงจรรทั้งสองนี้ จากนั้นในบทที่ 2 จึงได้กล่าวถึงหลักการและ
 วงจรที่เคยเสนอที่เกี่ยวข้องกับวงจรวัดความถี่ นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงข้อดีและข้อด้อยของวิธี
 การเหล่านี้ ส่วนในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการสุ่มค่า
 สัญญาณที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรวัดความถี่และวงจรรยกกำลังที่นำเสนอต่อไป

สำหรับบทที่ 4 และบทที่ 5 เป็นเนื้อหาที่สำคัญของวิทยานิพนธ์นี้เพราะได้กล่าวถึงการ
 สร้างวงจรและผลการทดลองเกี่ยวกับวงจรวัดความถี่และวงจรรยกกำลังตามลำดับ

วงจรวัดความถี่ในบทที่ 4 นั้นหลักหลักการใช้เทคนิคการป้อนประจุ ซึ่งนิยมใช้กันอยู่ใน
 ปัจจุบันในรูปไอซี ทั้งนี้เพราะวิธีการดังกล่าวจะให้แรงดันเอาต์พุตมีการกระเพื่อมอยู่ตลอดเวลา
 ส่วนหลักการและวงจรรที่นำเสนอในบทนี้อาศัยหลักการสุ่มค่าสัญญาณและคงค่าสัญญาณไว้ชั่วขณะ
 จึงทำให้ได้ระดับของเอาต์พุตที่คงที่แปรตามค่าความถี่ของอินพุตและเป็นไฟตรงที่ราบเรียบซึ่งไม่
 เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ข้อดีอีกประการหนึ่งคือสามารถสร้างวงจรรให้อยู่ในรูปแบบของวงจรร
 สวิตซ์คาปาซิเตอร์โดยสมบูรณ์ได้ ซึ่งสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรรวมได้โดยง่าย

ในบทที่ 5 ได้นำเสนอเรื่องเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างวงจรรยกกำลังโดยอาศัยวิธีการ
 สุ่มค่าสัญญาณ ที่นำวงจรอินทิเกรเตอร์มาเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับวงจรรตาม [15] แต่ได้
 ทำการปรับปรุงให้วงจรรสามารถกำเนิดสัญญาณนาฬิกาได้เองเพื่อใช้ในการรีเซตวงจรอินทิเกรเตอร์
 ซึ่งรูปแบบของวงจรรยกกำลังที่นำเสนอมี 2 รูปแบบคือในรูปแบบแรกจะใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ 2 ชุด
 ชุดแรกใช้วงจรอินทิเกรเตอร์สมมติให้เป็น p ชุดและชุดที่สองใช้อินทิเกรเตอร์สมมติให้เป็น q ชุด
 หรือกล่าวได้ว่าใช้จำนวนอินทิเกรเตอร์ $p+q$ วงจรร ส่วนรูปแบบที่ 2 จะใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เพียง
 ชุดเดียว ซึ่งจำนวนวงจรอินทิเกรเตอร์ที่นำมาใช้จะมีค่าเป็นเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับค่าของ p หรือ q ว่าค่า
 ใดมีค่ามากกว่ากัน ซึ่งในรูปแบบนี้จะสามารถลดจำนวนวงจรอินทิเกรเตอร์ลงได้แต่จะไม่สามารถ
 นำไปสร้างเป็นวงจรรคูณและหารสัญญาณเหมือนกับวงจรรยกกำลังในรูปแบบแรกและได้ทำการ
 ทดลองวงจรรต่างๆที่ได้ออกแบบไว้ ได้แก่วงจรรยกกำลังสอง วงจรรยกกำลังสาม วงจรรถดรกที่สอง
 วงจรรถดรกที่สามและวงจรรคูณและหารสัญญาณ จากผลการทดลองที่ได้สนับสนุนว่าวงจรรทำงาน
 ได้ดีตามทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติจริงจะต้องคำนึงถึงค่าของเลขชี้กำลัง p และ q ด้วย เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงงานวิศวกรรมเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าถ้าจำนวนของวงจรถอดรูปที่นำมาต่อкасแคดกันมีค่ามากเกินไป ก็จะทำให้เกิดการผิดพลาดขึ้นได้จากการห้วงเวลาที่เกิดขึ้นในระบบ แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากว่าค่าของ p หรือ q ไม่มากนัก หลักการนี้ก็ยังสามารถนำไปใช้งานได้เป็นอย่างดี

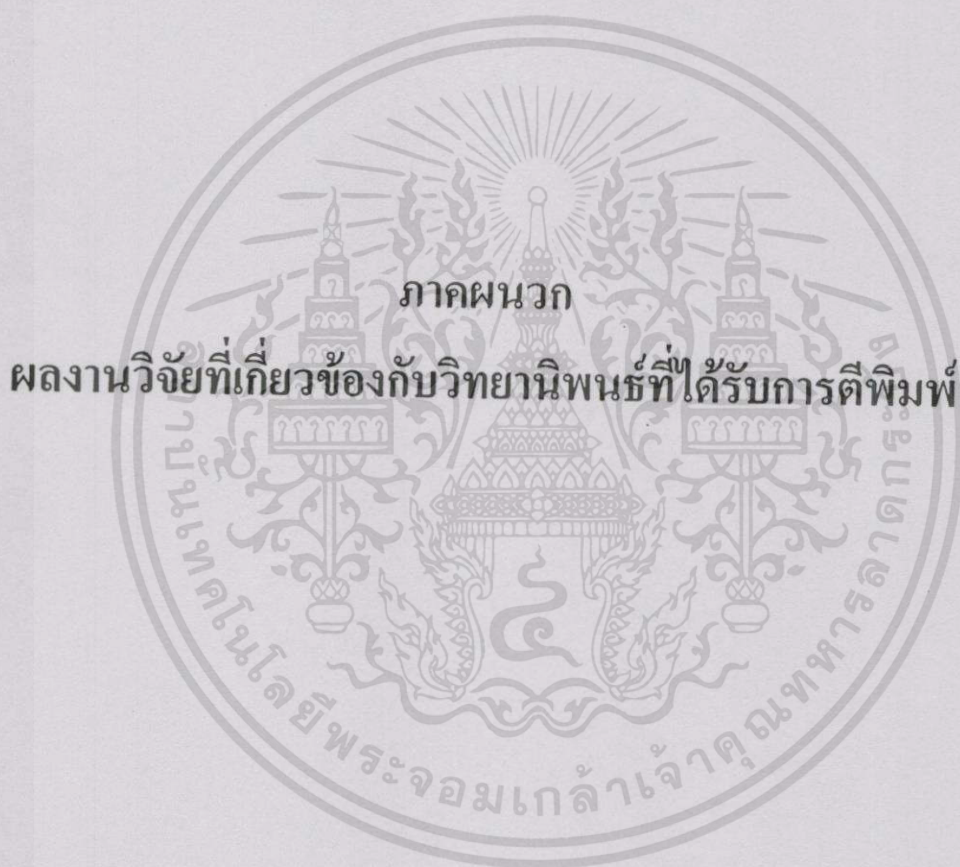


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.B. Grebene, **Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design**, Wiley & Sons, 1984.
- [2] R.M. Stitt and R. Burt, "Get F-V converter to settle fast without ripple," *Electronics Design*, vol.39, 1991, pp.73-79.
- [3] C. Papazoglou, et. al, "A Current Mode, CMOS F/V Converter for Low Frequency Application," *IEEE Trans. Industrial Electron*, vol.2, 1995, pp. 476-479.
- [4] W. Kiranon, et. al, "Simple Frequency/voltage converter with low output ripple," *Electron. Lett.*, vol.27, 1991, pp. 205-206.
- [5] J.S. Reynolds, "Frequency/voltage convertor with low output ripple," *Electron. Lett.*, vol.22, 1986, pp.205-206.
- [6] D.H. Shin and G.H. Cho, "A simple high - performance analog frequency-to-voltage converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.IE-34, no.2, 1987, pp.295-298.
- [7] TH.L. Laopolous, et. al, "Digital frequency to voltage conversion," *Int. J. Electronics*, vol. 39, 1994, pp.219-224.
- [8] TH.L.Laopolous and C.A. Karybakas, "High Performance Frequency-to-voltage converter," *Int. J. Electronics*, vol. 68, 1990, pp.303-307.
- [9] E.D. Deoblin, **Measurement System : Application and Design**, McGraw-Hill, 4th Ed. 1990, pp. 823-825.
- [10] J.G. Graeme et. al, **Operational Amplifier Design and Applications**, Singapore: McGraw-Hill, 1981
- [11] S. Franco, **Design with Operational Amplifier and Analog Integrated Circuits**, McGraw-Hill, 1988, pp. 544-549.
- [12] T.K. Sen, A. Ray and B.N. Ray, "An arbitrary Power-Law Device Based on Operational Transconductance Amplifier," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 42, 1993, pp.948-952.
- [13] R.J. Weigerink, **Analysis and Synthesis of MOS Translinear Circuits**, Norwood,MA: , 1993.
- [14] E. Seevinck, **Analysis and Synthesis of Translinear Integrated Circuits**, Amsterdam Elsevier, 1988.
- [15] วิจิตรา โอบก วิวัฒน์ กิรานนท์ จริญญา เลิศจรัสอร่ามดีและ วิภา แสงพิสธิ์. " วงจรยกกำลังใดๆโดยใช้อินทิเกรเตอร์" เอกสารรวมเล่มการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, 2540, หน้า 70-75.

- [16] TH.L. Laopoulous, et. al, "Analog divider/multiplier for low frequency application," Int. J. Electronics, vol. 73, 1992, pp.1261-1266.
- [17] C.J. Savant, et. al, **Electronic Design Circuits and Systems**, 2nd Ed. California: The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1991
- [18] วิวัฒน์ กิรานนท์ **วิศวกรรมการสื่อสาร**. กรุงเทพฯ พิมพ์ครั้งที่ 1 อักษรสยามการพิมพ์ 2540.
- [19] F.G. Stremler, **Introduction to communication systems**, Reading Mass: Addison-Wesley, 1977.
- [20] JR.N. Holonyak, **Application of Analog Integrated Circuits**, Prentice-Hall, 3rd.
- [21] J. R. Hufault, **OP-AMP Network Design**, John Wiley & Sons, 1986.
- [22] F. Robert and F.D. Frederick, **Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits**, Prentice-Hall, 1998.
- [23] R.G. Irvine, **Operational Amplifiers Characteristics and Application**, 3rd, Prentice - Hall, 1994
- [24] H. H. Chiang, **Electronic Wave Forming and Processing Circuits**, John Wiley & Sons, 1986.
- [25] C. J. Richard, **Microelectronic Circuit Design**, McGraw-Hill, 1997.
- [26] R. C. Dorf and J.A. Svoboda, **Introduction to Electric Circuits**, 4th, John Wiley & Sons, 1990.



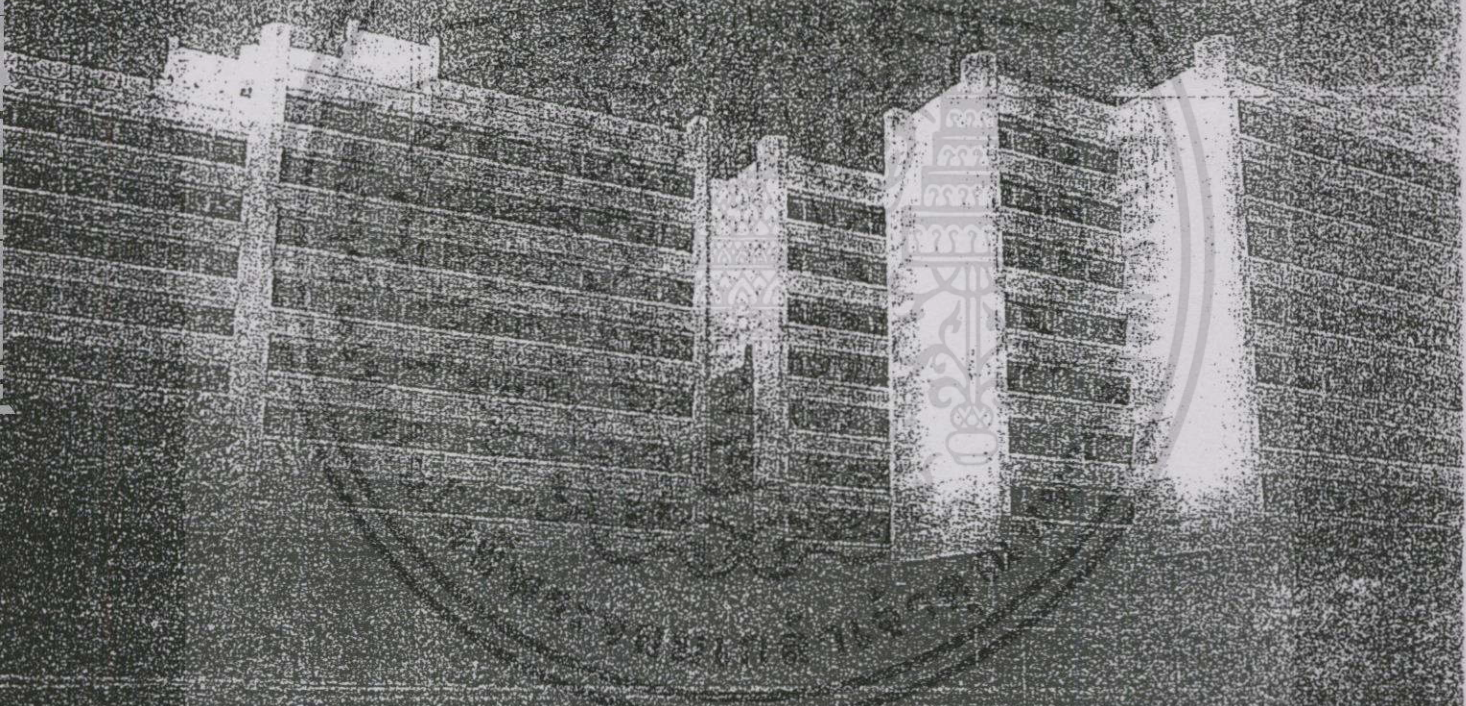
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21

21st Electrical Engineering Conference (EECON-21)

วันที่ 12-13 พฤศจิกายน 2541
ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ต.สุขสวัสดิ์ 48 เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
KING MONKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ไม่วารณีใ้ทุกทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อห และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่ใช้อินทิเกรเตอร์

Frequency-to-Voltage Converter based on Integrators

วิศวกรรม นาคินทร์ วิวัฒน์ กิรานนท์ จริยา เลิศจรสรามดี และวิภา แสงพิลาธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร (02) 326-6055 ต่อ 2549

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรเปลี่ยนความถี่ให้เป็นแรงดันแบบอนาล็อกที่มีเอาต์พุตที่ราบเรียบ โดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นอุปกรณ์ประกอบการใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าสัญญาณ วงจรซึ่งนำเสนอมีคุณสมบัติประจำตัวคือมีความเป็นเชิงเส้นในการเปลี่ยนความถี่ให้เป็นแรงดัน มีผลตอบสนองที่รวดเร็วและเอาต์พุตเป็นสัปดาห์ไฟฟ้าที่ไม่มีกรกระเพื่อม (ripple) ในวงจรไม่ต้องใช้โมโนสเตเบิล (monostable) ในการควบคุมสวิทช์ ดังนั้นจึงไม่เกิดความคลาดเคลื่อนของเวลาขณะที่ยุ่มค่าแรงดันเอาต์พุต ข้อดีอีกประการหนึ่งของวงจรที่นำเสนอนี้คือสามารถนำวงจรไปสร้างในรูปแบบของสวิทช์คาปาซิเตอร์ที่สมบูรณ์ได้

Abstract

An analog frequency-to-voltage (F/V) converter based on the use of integrators and sample and hold technique is presented. The proposed scheme offers numerous favorable characteristics as the resulting circuit linearly converts a signal frequency into a smooth output with remarkably rapid response. In contrast to the recently proposed converter, the method does not employ a monostable multivibrator for controlling switches, but rather clock pulses from a zero crossing detector. Therefore, good accuracy is achieved as a result of precision in time-determination during output sampling. The method can also be easily modified in a complete switched-capacitor version.

1. บทนำ

วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันคือวงจรที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่อินพุต แต่เดิมสร้างขึ้นด้วยหลักการที่เรียกว่า charge-pumping principle [1,2] วงจรนี้มีจุดด้อยเนื่องจากแรงดันที่เอาต์พุต ซึ่งเกิดจากกระแสเฉลี่ยในวงจรการคายประจุของ pumping capacitor มีการกระเพื่อมไปตามความถี่ของสัญญาณอินพุต วงจรนี้จึงไม่เหมาะสมในการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสัญญาณอินพุตมีความถี่ต่ำ ซึ่งจะทำให้การกระเพื่อมของสัญญาณเอาต์พุตปรากฏชัดขึ้นและให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนความถี่ปรากฏขึ้นช้า อีกประการหนึ่งหลักการทำงานของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันโดยทั่วไปที่มีอยู่นั้นมักถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้กับสัญญาณที่มีความถี่ปานกลางและความถี่สูงเท่านั้น [3]

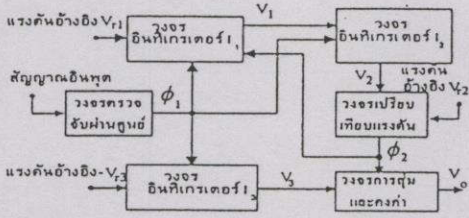
ดังนั้นหลักการจึงไม่เหมาะกับการใช้วัดความถี่ของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำๆ แม้ได้มีการคิดค้นออกแบบวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่ใช้งานในย่านความถี่ต่ำอยู่บ้าง [3-6] เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่รวดเร็วขึ้น แต่ยังคงใช้งานได้ในย่านความถี่แคบๆ และบางวิธียังคงมีการกระเพื่อมของสัญญาณเอาต์พุตเกิดขึ้นหรือต้องมีอุปกรณ์ภายนอกมาประกอบใช้ร่วมด้วย ใน [4] Reynolds ได้เสนอวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันโดยใช้หลักการ sampled-data feedback แม้ว่าวงจรจะมีการกระเพื่อมของระดับแรงดันเอาต์พุตต่ำ แต่วงจรยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของความซับซ้อนในการควบคุมสวิทช์และผลตอบสนองค่อนข้างช้า ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาสร้างวงจรใน [5] เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว วงจรที่นำเสนอมีความเรียบง่ายในการควบคุมสวิทช์และให้ค่าแรงดันที่มีการกระเพื่อมต่ำและมีผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวงจรของ Reynolds อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีข้อควรได้รับการพัฒนาให้สื่อผลตอบสนองยังสามารถปรับปรุงให้เร็วขึ้นได้ Laopoulos และ Karybakas [3] ได้นำเสนอวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันแบบอนาล็อกวงจรสามารถทำงานได้ดีคือมีผลตอบสนองที่รวดเร็วและลดปัญหาเกี่ยวกับการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต แต่ทว่าวงจรยังคงมีข้อเสียคือผลตอบสนองที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความกว้างของพัลส์ (pulse) จากวงจรโมโนสเตเบิล ซึ่งใช้ในการควบคุมอนาล็อกสวิทช์ ทำให้เกิดการหน่วงเวลาในการกำหนดระดับสัญญาณเอาต์พุต ดังนั้นจึงเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นที่แรงดันเอาต์พุต เพื่อแก้ไขจุดบกพร่องนี้ทำได้โดยหลักการที่เสนอในบทความนี้ซึ่งจะใช้การตรวจจบการผ่านศูนย์ (zero crossing) ของสัญญาณอินพุต เพื่อสร้างพัลส์ควบคุมอนาล็อกสวิทช์ร่วมกับใช้วงจรอินทิเกรเตอร์และวงจรเปรียบเทียบแรงดันเป็นตัวช่วยจัดการประมวลผล วิธีการนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตเป็นเชิงเส้นกับความถี่สัญญาณอินพุต โดยลดความคลาดเคลื่อนจากวิธีการใช้โมโนสเตเบิลลงได้และให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและไม่มีการกระเพื่อมที่แรงดันเอาต์พุต

2. หลักการและวงจร

วงจรที่นำเสนอโดยพื้นฐานประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ 3 ชุด ซึ่งควบคุมจังหวะการทำงานด้วยสัญญาณนาฬิกาที่สร้างมาจากการผ่านสัญญาณอินพุตที่ต้องการเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไปในวงจรตรวจจบผ่านศูนย์ การรีเซ็ตค่าเริ่มต้นของการอินทิเกรตสัญญาณทำได้โดยการใช้สัญญาณนาฬิกาที่สร้างขึ้นและจะใช้การจัดสวิทช์ที่เหมาะสมทำการชักค่าระดับแรงดันจากวงจรอินทิเกรเตอร์และคงค่าสัญญาณที่เอาต์พุต ให้เป็น

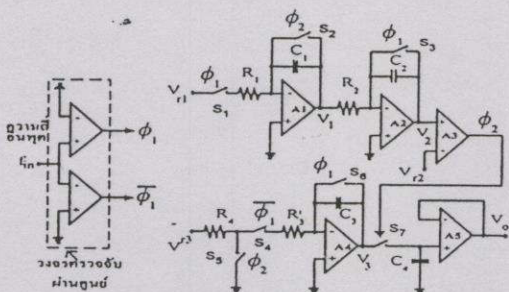
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟตรง แขนงของวงจรที่นำเสนอมีแสดงในรูปที่ 1 พื้นฐานการทำงานของวงจรอริบาชได้ด้วยหลักการดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ 1 แผนผังของวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดัน

วงจรอินทิเกรเตอร์ I_1 จะถูกควบคุมโดยสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ให้อินทิเกรตแรงดันอ้างอิง V_{r1} ตลอดช่วงระยะเวลาที่ ϕ_1 เป็นบวกและในช่วงที่ ϕ_1 เป็นลบ แรงดัน V_{r1} จะถูกตัดออกจากอินพุตของ I_1 ทำให้เอาต์พุตของ I_1 มีค่าคงที่เท่ากับค่าที่อินทิเกรตได้ในช่วงเวลาที่ ϕ_1 เป็นบวก ซึ่งจะมีค่าแปรตามคาบเวลา T ของสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ซึ่งก็คือแปรผันตามคาบเวลาของสัญญาณอินพุตนั่นเอง วงจรอินทิเกรเตอร์ I_2 ถูกต้องวงจรให้อินทิเกรตค่าเอาต์พุตของ I_1 โดยเริ่มต้นการทำงานจากเวลาที่สัญญาณนาฬิกา ϕ_1 เป็นลบ วงจรอินทิเกรเตอร์ I_2 จะถูกทำการอินทิเกรตสัญญาณเอาต์พุตของ I_1 ไปจนกระทั่งค่าเอาต์พุตของ I_2 มีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิง V_{r2} ในกรณีนี้ทำได้โดยนำเอาต์พุตของ I_1 ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกับ V_{r2} ซึ่งจะให้อาต์พุตเป็นบวกเมื่อเอาต์พุตของ I_1 มากกว่า V_{r2} และเอาต์พุตจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณดังกล่าวจะถูกใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาเพื่อตัดอินพุตออกจากวงจรอินทิเกรเตอร์ I_2 ข้อควรสังเกตที่สำคัญประการหนึ่งคือค่าระยะเวลาที่ I_2 ถูกปล่อยให้อินทิเกรตเอาต์พุตจาก I_1 นี้จะมีค่าแปรผกผันกับความแรงของแรงดันเอาต์พุตจาก I_1 นั่นคือจะแปรผกผันกับคาบเวลา T ซึ่งก็คือค่าระยะเวลานี้มีค่าที่แปรตามความถี่ของสัญญาณอินพุตนั่นเอง การแปลงค่าระยะเวลาที่ I_2 ใช้ในการอินทิเกรตสัญญาณนี้เป็นแรงดัน ซึ่งทำได้โดยการใช่วงจรอินทิเกรเตอร์ I_3 ทำการอินทิเกรตแรงดันอ้างอิง V_{r3} ในช่วงระยะเวลาเดียวกับที่วงจรอินทิเกรเตอร์ I_2 ทำการอินทิเกรตสัญญาณจาก I_1 และเอาต์พุตจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณยังถูกนำไปใช้ในการควบคุมจังหวะการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณให้ทำการซัดและคงค่าแรงดันเอาต์พุตจาก I_2 ได้อย่างถูกต้องแม่นยำซึ่งจะทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าคงที่ที่แปรตามความถี่ของสัญญาณอินพุตตามต้องการ



รูปที่ 2 วงจรแบบหนึ่งที่ตั้งสร้างได้จากแผนผังรูปที่ 1

จากหลักการและแผนผังของวงจรตามรูปที่ 1 สามารถนำมาออกแบบวงจรได้แบบหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจะให้รูปสัญญาณตามจุดสำคัญต่างๆภายในวงจรดังแสดงในรูปที่ 3 พื้นฐานการทำงานของวงจรอริบาชได้ดังต่อไปนี้

วงจรตรวจจับผ่านศูนย์จะทำหน้าที่แปลงอินพุต ซึ่งอาจเป็นคลื่นรูปไซน์หรือรูปสามเหลี่ยมหรือสัญญาณซึ่งมีคาบเวลาที่มีความสมมาตรระหว่างครึ่งคาบเวลาให้เป็นสัญญาณนาฬิกา 2 เฟส คือ ϕ_1 และ ϕ_2 ซึ่งมีเฟสตรงข้ามกัน การทำงานของวงจรรอบหนึ่งจะเริ่มจากช่วงเวลาครึ่งคาบบวกของสัญญาณอินพุต ซึ่งเป็นจังหวะที่ ϕ_1 เป็นบวก ทำให้สวิทช์ S_1 ปิดวงจร แล้วอินทิเกรเตอร์ I_1 ตามรูปที่ 2 คือวงจรที่ประกอบด้วยออปแอมป์ $A1$ จะทำการอินทิเกรตแรงดัน V_{r1} ไปตลอดช่วงครึ่งคาบเวลาของสัญญาณอินพุต ถ้ากำหนดให้เวลาเริ่มต้นของคาบเวลาคือ $t = 0$ ดังนั้นที่เวลาครึ่งคาบสัญญาณ $\frac{T}{2}$ จะสามารถหาค่า V_{r1} ได้คือ

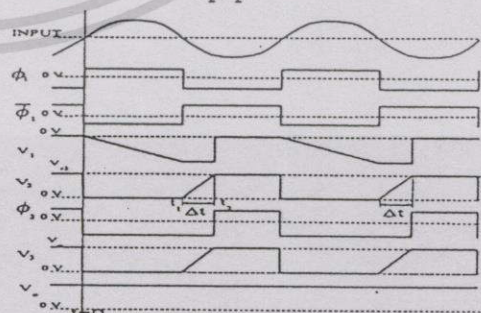
$$V_{r1}\left(\frac{T}{2}\right) = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{i1} dt$$

หรือ

$$V_{r1}\left(\frac{T}{2}\right) = -\frac{V_{r1} T}{2 R_1 C_1} \quad (1)$$

ในช่วงเวลาครึ่งคาบลบต่อมาของสัญญาณอินพุตคือเมื่อ ϕ_1 เป็นลบจะทำให้สวิทช์ S_1, S_2 และ S_3 เปิดวงจร ทำให้ไม่มีอินพุตเข้ามาถึงวงจรอินทิเกรเตอร์ I_1 ดังนั้นตัวเก็บประจุ C_1 จะคงค่าของ $V_{r1}\left(\frac{T}{2}\right)$ ไว้ซึ่งค่าแรงดันนี้จะเป็นอินพุตให้แก่วงจรอินทิเกรเตอร์ I_2 ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ $A2$ ให้ทำการอินทิเกรตไปด้วยเวลาตั้งแต่ $\frac{T}{2}$ ไปจนกระทั่งเวลาที่เอาต์พุตของ I_2 คือ V_{r2} มีค่าเท่ากับ V_{r1} ถ้ากำหนดให้ช่วงเวลานี้คือ Δt และขณะเวลาที่ $V_{r2}(t)$ เท่ากับ V_{r1} คือ t_2 ดังแสดงในรูปที่ 3 จะทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้คือ

$$V_{r2}(t_2) = -\frac{V_{r1}\left(\frac{T}{2}\right) \Delta t}{R_2 C_2} = V_{r2} \quad (2)$$



รูปที่ 3 รูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่างๆภายในวงจรรูปที่ 2

เมื่อเงื่อนไขตาม (2) เกิดขึ้น กล่าวคือ $V_{r2}(t) = V_{r1}$ วงจรเปรียบเทียบแรงดัน $A3$ จะเปลี่ยนสถานะของสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 ให้มีค่าเป็นบวก ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการรีเซ็ตค่าเริ่มต้นของอินทิเกรเตอร์ I_1 ทำให้อินพุตเข้าสู่วงจร

อินทิเกรเตอร์ I , กลายเป็นศูนย์ แต่ด้วยผลของตัวเก็บประจุ C , จึงทำให้เอาต์พุตของ I , มีค่าคงที่ตาม (2) และเมื่อแทน (1) ลงใน (2) จะหาค่าช่วงเวลา Δt ได้คือ

$$\Delta t = \frac{2V_{r2}R_1C_1R_2C_2}{V_{r1}T} \quad (3)$$

จาก (3) จะเห็นว่า Δt มีค่าแปรผกผันกับคาบเวลา T ซึ่งก็คือ Δt นั้นแปรผันโดยตรงกับความถี่ของสัญญาณอินพุต การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่างๆนี้มีแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นว่า $\bar{\phi}_1$ และ ϕ , จะควบคุมการทำงานในช่วงเวลาที่ครึ่งคาบของสัญญาณอินพุตนี้ วงจรอินทิเกรเตอร์ I , ซึ่งประกอบจากออปแอมป์ $A4$ จะทำการอินทิเกรตสัญญาณ $-V_{r1}$ ไปเป็นระยะเวลา Δt ซึ่งทำให้ได้ค่าเอาต์พุต V_3 ดังนี้

$$V_3 = \frac{V_{r3}\Delta t}{(R_3 + R_4)C_3} \quad (4)$$

จากการควบคุมของ ϕ , จะทำให้วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งประกอบจากออปแอมป์ $A5$ และตัวเก็บประจุ C , ทำการซั๊กค่า V_3 ตาม (4) ที่เวลา t , และค่านี้ไว้จนกว่าวงจรจะเริ่มการทำงานรอบใหม่ โดยการแทนค่า Δt จาก (3) ลงใน (4) จะสามารถเขียนแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต V_0 กับค่าตัวแปรอื่นในวงจร ได้ดังนี้

$$V_0 = \frac{2V_{r2}V_{r3}R_1C_1R_2C_2}{V_{r1}(R_3 + R_4)C_3T} f_{in} \quad (5)$$

หรือสามารถเขียนค่าเอาต์พุต V_0 ใหม่ได้เป็นดังนี้คือ

$$V_0 = \frac{2V_{r2}V_{r3}R_1C_1R_2C_2}{V_{r1}(R_3 + R_4)C_3} f_{in} = kf_{in} \quad (6)$$

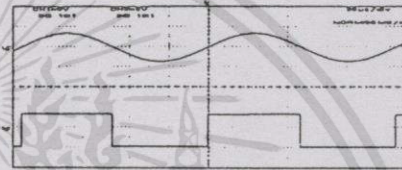
เมื่อ $k = \frac{2V_{r2}V_{r3}R_1C_1R_2C_2}{V_{r1}(R_3 + R_4)C_3}$

จาก (6) แสดงให้เห็นว่าวงจรมีคุณสมบัติตามหลักการคือสัญญาณเอาต์พุตมีค่าแปรผันโดยตรงกับความถี่อินพุตและที่ความถี่ค่าหนึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นค่าคงที่

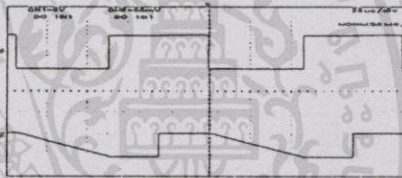
3. การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองได้ต้องจรรยาบรรณรูปที่ 2 โดยใช้อุปกรณ์ค่าต่างๆดังนี้ วงจรรวมจับผ่านศูนย์, $A1, A2, A3, A4$, และ $A5$ จะใช้ไอซีเบอร์ LF356 และใช้ $R_1 = 74 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 13 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 10 \text{ nF}$, $C_2 = C_3 = 1 \text{ nF}$, $C_4 = 100 \text{ nF}$ และไฟเลี้ยง $\pm 5 \text{ V}$ ใช้ขนาดลอจิกสวิทช์เบอร์ 4066 และใช้แรงดันอ้างอิงค่าต่างๆคือ $V_{r1}, V_{r2} = 3.8 \text{ V}$ และ $V_{r3} = 0.3 \text{ V}$ เมื่อใช้สัญญาณอินพุตที่มีความถี่ 10 kHz เพื่อทำการทดสอบการวัดสัญญาณตามจุดต่างๆที่สำคัญมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอไว้ข้างต้นและเพื่อทดสอบผ่านการดำเนินงานของระบบได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตและวัดค่าเอาต์พุต V_0 โดยใช้ค่าแรงดันอ้างอิง V_{r2} ต่างๆกัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง

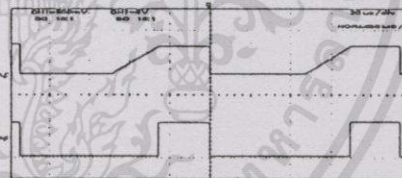
ความถี่อินพุตกับแรงดันเอาต์พุต V_0 ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างความถี่อินพุตกับแรงดันเอาต์พุต แต่อย่างไรก็ดีพบว่าเมื่อ V_{r2} มีค่ามากจะเกิดความผิดพลาดของค่าเอาต์พุตที่วัดได้เมื่ออินพุตมีความถี่สูงขึ้นพอสมควร แต่เมื่อเลือก V_{r2} ให้มีค่าน้อยจะทำให้สามารถขยายช่วงการวัดความถี่ในการใช้งานให้กว้างออกไปได้ เป็นที่น่าสังเกตว่าการลด V_{r2} นี้จะทำให้ค่า sensitivity (อัตราการแปลงค่าอินพุตเป็นเอาต์พุต) ของเอาต์พุตต่ออินพุตลดลงด้วย อย่างไรก็ตามยังคงมีพารามิเตอร์อื่นๆในวงจรที่สามารถช่วยเพิ่ม sensitivity ของระบบได้ ในการทดสอบผลของ V_{r1} และ V_{r3} ต่อระดับแรงดันเอาต์พุต ผลที่ได้ดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่าสามารถเพิ่มค่า sensitivity ของระบบนี้ได้ง่ายโดยการลดค่า V_{r1} หรือเพิ่มค่า V_{r3} ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการทดลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับทฤษฎี



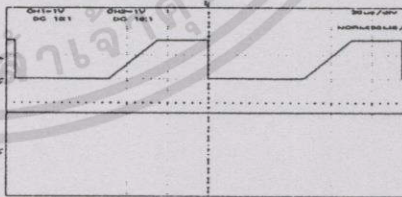
(ก) สัญญาณอินพุต (เส้นบน) และสัญญาณ ϕ (เส้นล่าง)



(ข) สัญญาณ $\bar{\phi}_1$ (เส้นบน) และสัญญาณ V_3 (เส้นล่าง)

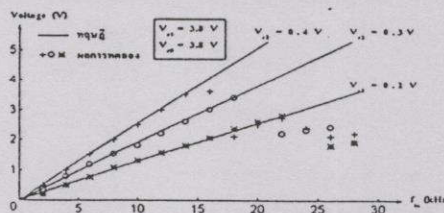


(ค) สัญญาณ V_2 (เส้นบน) และสัญญาณ ϕ (เส้นล่าง)



(ง) สัญญาณ V_1 (เส้นบน) และสัญญาณ V_0 (เส้นล่าง)

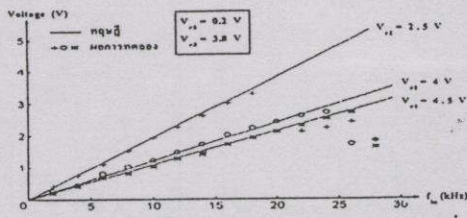
รูปที่ 4 ลักษณะสัญญาณที่จุดต่างๆวัดได้จากวงจรซึ่งสร้างขึ้นตามรูปที่ 2



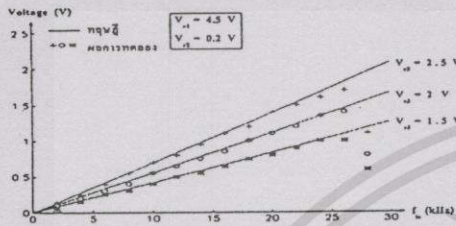
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุต

เมื่อ $V_{r2} = 0.2 \text{ V}, 0.3 \text{ V}$ และ 0.4 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุต เมื่อ $V_{ref} = 2.5 \text{ V}, 4.0 \text{ V}$ และ 4.5 V



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่อินพุต เมื่อ $V_{ref} = 1.5 \text{ V}, 2.0 \text{ V}$ และ 2.5 V

4. สรุปผลและวิจารณ์

วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันที่น่าเสนอในบทความนี้ ได้รับการพัฒนาโดยใช้วงจรอินทิเกรตเตอร์ร่วมกับหลักการสุ่มค่าสัญญาณ วงจรนี้มีหลักการเบื้องต้นโดยอาศัยการแบ่งทำงานของวงจรเป็น 2 สภาวะคือ เริ่มจากสภาวะแรกเป็นช่วงเวลาครึ่งคาบบวกของสัญญาณอินพุต วงจรจะทำหน้าที่วัดคาบเวลาของสัญญาณอินพุต จากนั้นในช่วงเวลาครึ่งคาบลบของสัญญาณอินพุต วงจรจึงทำการแปลงค่าผลจากการประมวลผลของส่วนแรกให้เป็นศักดาไฟฟ้าที่มีค่าแปรตามความถี่ของสัญญาณอินพุต วงจรใช้การตรวจจับการผ่านศูนย์ของสัญญาณอินพุตในการสร้างสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวควบคุมอนุภาคสวิตช์ จึงทำให้เกิดความแม่นยำในการกำหนดเวลาที่หาค่าแรงดันเอาต์พุต หลักการนี้ทำให้วงจรทำงานได้ดีกว่าวงจรที่น่าเสนอใน [3] ซึ่งใช้วงจรโมโนสเตเบิลสำหรับการควบคุมอนุภาคสวิตช์เพื่อกำหนดแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้เพราะโมโนสเตเบิลจะทำให้เกิดการหน่วงเวลาในการกำหนดค่าคาบเวลาของสัญญาณ จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุตที่วัดได้ วงจรนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วสามารถระบุค่าเอาต์พุตตั้งแต่รอบแรกของการทำงานทำให้วงจรนี้มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าวงจรที่สร้างโดยอาศัยหลักการ sampled - data feedback ซึ่งนำเสนอใน [4] และ [5] ข้อดีอีกประการหนึ่งคือแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟตรงราบเรียบ ไม่มีการกระเพื่อมของแรงดัน อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองเกี่ยวกับการตอบสนองต่อวงจรที่ความถี่ต่างๆ ดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าเมื่อ V_{ref} มีค่ามากจะเกิดความผิดพลาดของค่าเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีความถี่สูงขึ้น สาเหตุเกิดจากเมื่อความถี่สูงขึ้นนั้นช่วงเวลาที่อินทิเกรตเตอร์ I_1 ใช้ในการอินทิเกรตแรงดันมีเวลาไม่พอในการสร้างเอาต์พุตให้มีค่าสูงพอที่จะไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} ในการสร้างสัญญาณนาฬิกา ϕ กล่าวคือ ϕ ถูกสร้างให้มีจังหวะการทำงานไม่ถูกต้องเพราะมีจังหวะซ้ำซ้อนกับ ϕ จึงทำให้การสุ่มค่าเอาต์พุตเกิดความผิดพลาดขึ้น กระนั้นก็

ความปัญหานี้ก็จะสามารถถูกจัดได้ด้วยการเลือกค่า V_{ref} ให้น้อยลง ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราการแปลงอินพุตเป็นเอาต์พุตมีค่าต่ำลง แต่อย่างไรก็ยังสามารถชดเชยเพิ่มค่านี้ได้เพียงอาศัยการปรับพารามิเตอร์บางตัวในวงจร นั่นคือสามารถเพิ่มอัตราการแปลงอินพุตเป็นเอาต์พุต โดยลดค่า V_{ref} หรือเพิ่มค่า V_{ref} โดยไม่ต้องใช้วงจรขยายภายนอกเพิ่มเติมแต่อย่างใด ข้อสรุปอีกประการหนึ่งที่ควรกล่าวไว้ ณ ที่นี้คือวงจรสามารถดัดแปลงเป็นวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่สมบูรณ์ได้โดยง่าย เพียงแต่แทนตัวต้านทานทั้งหมดด้วยวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์เบื้องต้นเท่านั้น [7] วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่เป็นไปได้มีแสดงไว้ในภาคผนวกท้ายบทความนี้

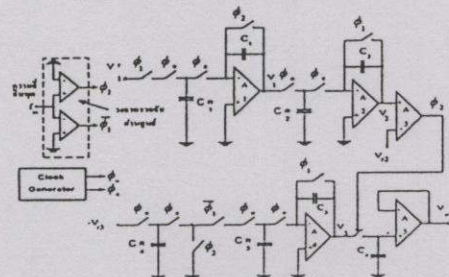
เอกสารอ้างอิง

- [1] E. O. Doebelin, *Measurement systems: Application and design*. McGraw - Hill 4th edn., 1990, pp.823-825.
- [2] P. H. Horowitz and W. Hill, *The art of electronic*. Cambridge University Press, 1980, p.413.
- [3] TH. L. Laopulos and C. A. Karybakas, "High performance frequency-to-voltage converter," *Int. J. Electronics*, 1990, vol.68, pp.303-307.
- [4] J. S. Reynolds, "Frequency/voltage converter with low output ripple," *Electron. Lett.*, 1986, vol.22, pp.205-206.
- [5] W. Kiranon *et al.*, "Simple frequency/voltage converter with low output ripple," *Electron. Lett.*, 1991, vol.27, pp.205-206.
- [6] W. Surakamponthorn *et al.*, "An analog sinusoidal frequency-to-voltage converter," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1991, vol.40, pp.925-929.
- [7] M.E.Van valkenburg, *Analog filter design*. Holt-Sunders, 1982, pp.491-493.

ภาคผนวก

วงจรมตามรูปที่ 2 สามารถดัดแปลงให้อยู่ในรูปของวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งจะแทนที่ตัวความต้านทานแต่ละตัวด้วยวงจรที่ประกอบขึ้นจากการใช้ตัวเก็บประจุทำงานร่วมกับสวิตช์ 2 ตัว ซึ่งผลิตกันทำงาน โดยอาศัยการควบคุมจากสัญญาณนาฬิกา 2 เฟส คือ ϕ_1 และ ϕ_2 โดยมีค่าความถี่ f_c ความสัมพันธ์ของเอาต์พุต V_o กับความถี่อินพุต ใน (6) สามารถหาได้ดังนี้คือ

$$V_o = \frac{2V_{r2}V_{r3}C_1C_2C_{R3}C_{R4}}{V_{r1}f_c C_{R1}C_{R2}C_3(C_{R3} + C_{R4})} f_{in} \quad (7)$$



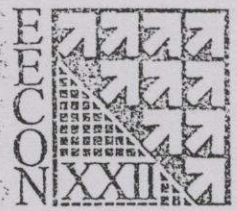
รูปที่ 8 วงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันในรูปของวงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ

ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22



22nd Electrical Engineering Conference
(EECON-22)

วันที่ 2-3 ธันวาคม 2542

ณ อาคารสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทองอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

วงจรถักกำลังอย่างง่ายที่ใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณ

A Simple Power Law Circuit based on Sampling Technique

วิภาวัลย์ นาคทรัพย์* วิจิตร เทพรกิจ* วินัย ศิลารวม** และวิภา แสงพิสิทธิ์***

*คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160 โทร (02)4570068 ต่อ 123,140

**ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 โทร (02)9883655 ต่อ 113

***คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนจตุรทิศ เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร (02)3266055 ต่อ 2549 *

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างวงจรถักกำลังโดยอาศัยวงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรสมิททริกเกอร์ (Schmitt trigger) และวงจรเปรียบเทียบแรงดันทำงานร่วมกับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยเลขชี้กำลังสามารถกำหนดได้ด้วยจำนวนของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ในวงจร ซึ่งเอาต์พุตของวงจรถักกำลังเกิดจากการนำเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์มาทำการสุ่มและคงค่าสัญญาณในช่วงเวลาที่เหมาะสม โดยไม่ต้องอาศัยสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกมาควบคุมการทำงาน จึงทำให้มีความสะดวกในการนำไปใช้งาน และวงจรนี้ยังให้ระดับแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าสูงเป็นที่น่าสนใจ ขึ้นขึ้นได้จากผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณ

Abstract

A power law circuit using integrator, Schmitt trigger, comparator and sample and hold circuit is presented. An index is determined by the number of the integrator circuits. The output can be produced by sampling and holding the output from the integrator at appropriate time interval. The advantages are that the proposed circuit gives high output and does not use external clock signal. The paper shows the results of an experiment to verify the theory.

1. บทนำ

วงจรที่มีความสำคัญในการประมวลผลสัญญาณอนาล็อกที่นำเสนอในวงจรหนึ่งคือวงจรถักกำลัง ซึ่งวงจรเหล่านี้นอกจากจะเป็นต้นแบบในการสร้างวงจรถักกำลังและถอดรอกของสัญญาณ [1,2] ได้แล้ว ยังสามารถนำมาสร้างวงจรถักและเรทสัญญาณ [2] ได้ด้วย โดยที่วงจรถักกำลังนั้นได้มีผู้คิดค้นและสร้างขึ้นมามากหลายรูปแบบ เช่นรูปแบบที่สร้างขึ้นโดยการนำวงจรคูณมาเก็บค่าเฉลี่ยของวงจรถัก [4] ข้อเสียของวงจรที่สร้างขึ้นจากวิธีนี้คือ มีความยุ่งยากในการปรับแต่งเพื่อหาจุดทำงานที่เหมาะสมให้กับวงจร เพราะต้องคำนึงถึงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ในคุณสมบัติของวงจรถัก ส่วนรูปแบบของวงจรถักกำลังที่อาศัยความผันแปรระหว่างค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ g_m กับค่า

กระแสไปอัส I_o ของ OTA [1] และรูปแบบที่อาศัยคุณสมบัติของวงจรถักทรานส์ลิเนียร์ (translinear) [5] นั้น ถึงแม้ว่าสามารถที่จะนำไปออกแบบเป็นวงจรถักกำลังได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ภายในวงจรมักขึ้นกับอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะก่อให้เกิดความไม่แน่นอนเชิงเส้น ส่งผลให้วงจรถักความแม่นยำในการประมวลผลของสัญญาณ ถึงแม้ว่าคอมพิวเตอร์จะนำเสนอการชดเชยอุณหภูมิภายในตัวอุปกรณ์ [6] เพื่อลดปัญหาดังกล่าว แต่จะทำให้วงจรมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้น ในบทความนี้นำเสนอวิธีการสร้างวงจรถักกำลังโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักเช่นเดียวกับ [2,3] โดยได้ทำการพัฒนาวงจรถักกำลัง [3] ให้สามารถทำหน้าที่ชดถ่วงความ [2] ได้ ซึ่งทำให้ได้วงจรถักกำลังที่มีความกระชับขึ้น กล่าวคือวงจรถัก [2] จะใช้จำนวนวงจรถักอินทิเกรเตอร์เท่ากับผลรวมของเลขชี้กำลังและส่วนของเลขชี้กำลัง แต่ในบทความนี้สามารถใช้จำนวนของวงจรถักอินทิเกรเตอร์เท่ากับค่าของเลขชี้กำลังหรือส่วนของเลขชี้กำลังเท่านั้น ซึ่งจะใช้เท่ากับค่าของเลขชี้กำลังหรือส่วนที่ขึ้นอยู่กับว่าค่าใดมากกว่ากัน และเนื่องจากวงจรถัก [2,3] นั้นยังคงต้องอาศัยสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกมาช่วยในการรีเซ็ตการทำงานของวงจร ซึ่งทำให้ไม่สะดวกในการนำไปใช้งาน ดังนั้นในบทความนี้จึงได้พัฒนาให้วงจรถักกำลังสามารถกำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายในวงจรได้เองด้วย เพื่อขึ้นต้นความถูกต้องของหลักการนี้ จึงได้ทำการทดลองวงจรถักกำลังที่สร้างขึ้น โดยใช้สัญญาณอินพุตเป็นเฟสตรงและเป็นฟังก์ชันที่แปรตามเวลาดังรายละเอียดต่อไปนี้

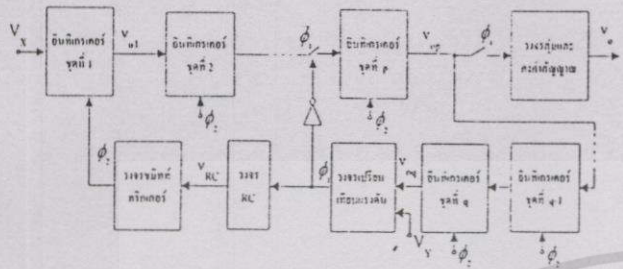
2. หลักการ

วงจรถักกำลัง p/q เมื่อ p และ q เป็นเลขจำนวนเต็มค่าบวกใดๆที่นำเสนอในบทความนี้มีแผนผังการทำงานตามรูปที่ 1 และตัวอย่างรูปคลื่นตามจุดต่างๆแสดงในรูปที่ 2 โดยแผนผังการทำงานตามรูปที่ 1 ประกอบด้วยวงจรถักอินทิเกรเตอร์ วงจรสมิททริกเกอร์ วงจรเปรียบเทียบแรงดัน และวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยให้นำวงจรถักอินทิเกรเตอร์มาต่อแคสเคด (cascade) กัน p หรือ q ขึ้นอยู่กับว่าค่าใดมากกว่ากัน นั่นคือ เมื่อ p มีค่ามากกว่า q ก็จะนำวงจรถักอินทิเกรเตอร์มาต่อแคสเคด p

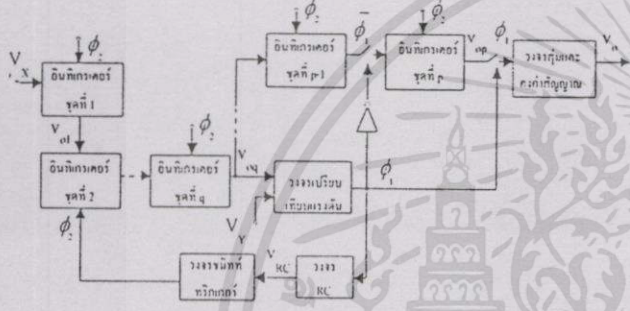
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

วงจรยกกำลังอย่างง่ายที่ใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณ

วงจรและเมื่อ q มีค่ามากกว่า p ก็จะนำวงจรอินทิเกรเตอร์มาต่อแคสเคด q วงจร แผนผังการทำงานของวงจรในแต่ละกรณีแสดงตามรูปที่ 1(ก) และรูปที่ 1(ข) ตามลำดับ



(ก) วงจรยกกำลัง p/q โดยที่เลขชี้กำลัง $p < q$



(ข) วงจรยกกำลัง p/q โดยที่เลขชี้กำลัง $p > q$

รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของวงจรยกกำลัง p/q

โดยทั้งสองกรณีนี้สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้คือ เมื่อทำการป้อนแรงดันอินพุต V_X เป็นไฟตรงให้กับวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดแรกและสมมติให้ค่าแรงดันเริ่มต้นของวงจรอินทิเกรเตอร์ทุกวงจรที่ตำแหน่งอ้างอิง $t = 0$ มีค่าเป็นศูนย์ตามรูปที่ 2 แล้ว จะได้ค่าเอาต์พุต $v_{o1}(t)$ ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต V_X กับเวลา t เป็นดังนี้

$$v_{o1}(t) = \frac{1}{\tau_1} \int_0^t V_X d\tau = \frac{1}{\tau_1} V_X t \quad (1)$$

เมื่อ τ_1 คือค่าคงตัวเวลา (time constant) ของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 และจากการออกแบบแผนผังตามรูปที่ 1 พบว่าวงจรอินทิเกรเตอร์ทุกชุดทำการอินทิเกรตสัญญาณในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งจะได้เอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ q ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_X กับเวลา t ได้เป็นดังนี้

$$v_{oq}(t) = \frac{V_X t^q}{q! \tau_1 \tau_2 \dots \tau_q} = \frac{V_X t^q}{q! \prod_{m=1}^q \tau_m} \quad (2)$$

เมื่อ τ_m คือค่าคงตัวเวลาของวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ m



รูปที่ 2 ตัวอย่างของรูปคลื่นคาบจุดต่างๆของวงจรยกกำลัง

แรงดัน $v_{oq}(t)$ ที่ได้นี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับระดับแรงดันอ้างอิง V_Y ซึ่งให้เอาต์พุตเป็น ϕ ที่มีค่าเป็นศูนย์เมื่อ $v_{oq}(t)$ น้อยกว่า V_Y และมีค่าเป็นบวกเมื่อ $v_{oq}(t)$ มากกว่า V_Y และเมื่อกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตสัญญาณเท่ากับ t_1 เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุต $v_{oq}(t)$ เท่ากับค่าแรงดันอินพุต V_X แล้ว จะได้ความสัมพันธ์ข้อต่อไปนี้คือ

$$v_{oq}(t_1) = \frac{V_X t_1^q}{q! \prod_{m=1}^q \tau_m} = V_Y \quad (3)$$

ซึ่งสามารถแก้ค่าช่วงเวลา t_1 ได้เป็น

$$t_1 = \left[\frac{V_Y q! \prod_{m=1}^q \tau_m}{V_X} \right]^{\frac{1}{q}} \quad (4)$$

ที่เวลา $t = t_1$ นี้ เอาต์พุต ϕ ของวงจรเปรียบเทียบกับแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลง และจะไปควบคุมการสุ่มค่าเอาต์พุต $v_{op}(t)$ จากวงจรอินทิเกรเตอร์ชุดที่ p ออกมาเป็นเอาต์พุต $v_o(t)$ นั่นคือ

วงจรถอดกำลังอย่างง่ายที่ใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณ

$$v_o(t) = v_{op}(t_1) = \frac{V_X t_1^p}{p! \prod_{m=1}^p \tau_m} \quad (5)$$

แทน (4) ใน (5) จะได้

$$v_o(t) = \frac{\left[q! V_Y \prod_{m=1}^q \tau_m \right]^{p/q}}{p! \prod_{m=1}^p \tau_m} (V_X)^{-p/q} \quad (6)$$

หรือ

$$v_o(t) = k (V_X)^{-p/q} \quad (7)$$

เมื่อ

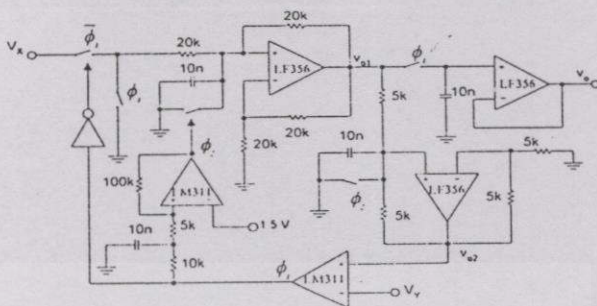
$$k = \frac{\left[q! \prod_{m=1}^q \tau_m \right]^p}{p! \prod_{m=1}^p \tau_m} (V_X)^{-p/q}$$

จะเห็นว่าค่าแรงดัน $v_o(t)$ ตามสมการ (7) มีค่าที่แปรตามแรงดันอินพุต V_X ยกกำลัง p/q นั้นแสดงว่าวงจรที่นำเสนอตามหลักการสามารถใช้เป็นวงจรถอดกำลัง p/q ได้ตามที่ต้องการ และเพื่อทำให้วงจรทำงานได้จริงในทางปฏิบัติ จึงต้องมีสัญญาณนาฬิกามาคอยรีเซ็ตวงจรให้ทำงานเป็นจังหวะตลอดเวลา และเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน จึงได้สร้างสัญญาณนาฬิกาขึ้นมาภายในวงจรเอง โดยนำ ϕ_1 ไปเป็นอินพุตให้กับวงจร RC ซึ่งลักษณะของแรงดัน V_{RC} ในช่วงที่ ϕ_1 เป็นบวกจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential) และในช่วงที่ ϕ_1 ค่าเป็นศูนย์ แรงดัน V_{RC} จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 2 สัญญาณที่ได้นี้ถูกนำไปเป็นอินพุตให้กับวงจรมัลติเพล็กซ์ที่ให้อาต์พุตเป็น ϕ_2 โดยสัญญาณ ϕ_2 เป็นบวกเมื่อ V_{RC} มีค่ามากกว่าระดับแรงดันอ้างอิงด้านสูง (upper threshold voltage: V_U) ของวงจรมัลติเพล็กซ์ และเมื่อ V_{RC} มีค่าต่ำกว่าระดับแรงดันอ้างอิงด้านต่ำ (lower threshold voltage: V_L) ดังนั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ϕ_2 จะมีการเปลี่ยนสภาวะจากศูนย์เป็นบวกช้ากว่า ϕ_1 และเมื่อ ϕ_1 ไปรีเซ็ตวงจรอินทิเกรเตอร์ทั้งหมดในระนาบ เอาต์พุตของวงจรมัลติเพล็กซ์ทุกชุดก็จะมีค่าเป็นศูนย์ที่ค่าเท่ากับ ϕ_1 มีการเปลี่ยนสภาวะจากศูนย์เป็นบวก และขณะเดียวกัน ϕ_2 หรือเอาต์พุตของวงจรมัลติเพล็กซ์เปรียบเทียบกับแรงดันก็จะมีค่าเป็นศูนย์ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2 และจากวิธีการนี้ก็จะสามารถทำให้วงจรทำงานวนรอบซ้ำๆ ได้

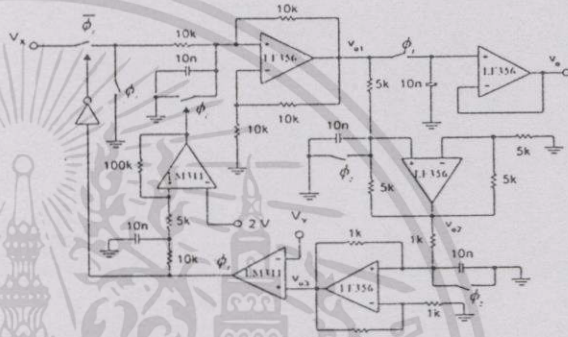
3. การทดลองและผล

ได้ทำการทดสอบวงจรที่นำเสนอโดยทำการต่อวงจรที่ได้ออกแบบไว้บนแผ่นพิมพ์ตามรูปที่ 1 ดังแสดงรูปที่ 3, 4 และ 5 ได้แก่วงจรถอดรหัสที่สอง ($p=1, q=2$) วงจรถอดรหัสที่สาม ($p=1, q=3$) และวงจร

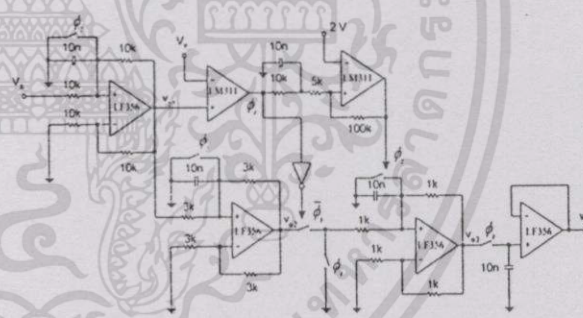
ยกกำลังสาม ($p=3, q=1$) ตามลำดับ ใช้ไอแวน์เตอร์เบอร์ 7404 อนุภาค สวิตช์เบอร์ 4066 และไฟเลี้ยงระบบของวงจร $\pm 5V$



รูปที่ 3 วงจรถอดรหัสที่สองที่ใช้ในการทดลอง

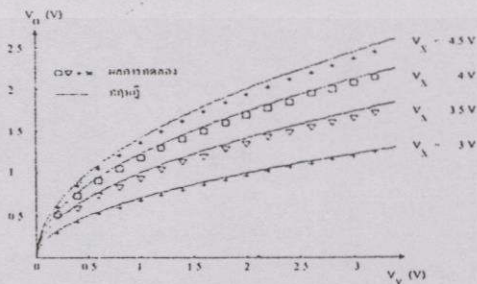


รูปที่ 4 วงจรถอดรหัสที่สามที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5 วงจรถอดกำลังสามที่ใช้ในการทดลอง

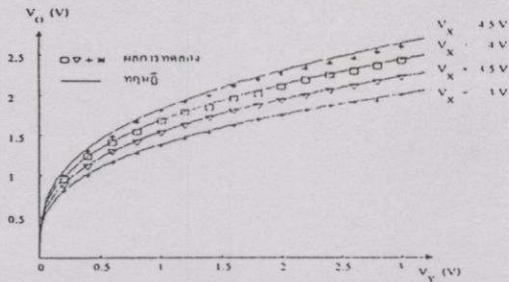
ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_X กับแรงดันเอาต์พุต v_o เมื่อกำหนดให้ V_U มีค่าต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6, 7 และ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรสามารถตอบสนองต่อสัญญาณแรงดันอินพุตที่เป็นกระแสตรงได้เป็นอย่างดี



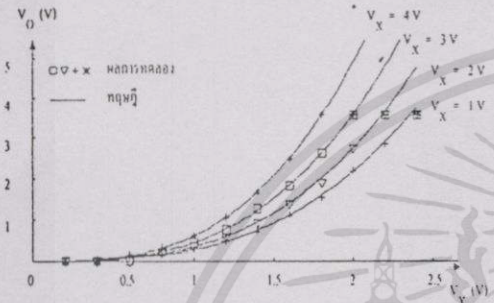
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต v_o กับอินพุต V_X เมื่อ $V_U = 3, 3.5, 4$ และ $4.5V$ ของวงจรถอดรหัสที่สอง ($p=1, q=2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรถูกกำลังอย่างง่ายที่ใช้วิธีการสุ่มค่าสัญญาณ

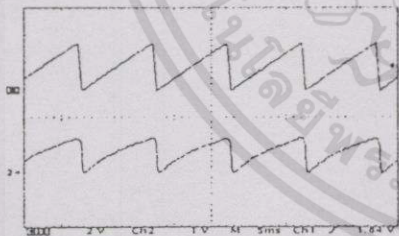


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต v_o กับอินพุต V_V เมื่อ $V_X = 3, 3.5, 4$ และ 4.5 V ของวงจรถอดกราฟที่สาม ($p=1, q=3$)

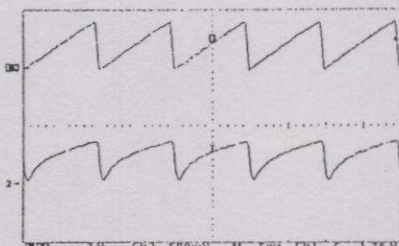


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต v_o กับอินพุต V_V เมื่อ $V_X = 1, 2, 3$ และ 4 V ของวงจรถูกกำลังสาม ($p=3, q=1$)

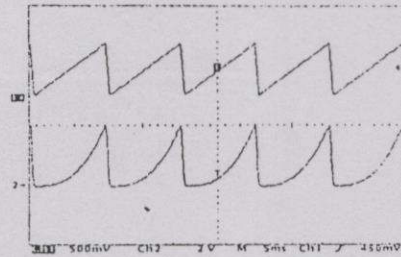
จากนั้นได้ทำการป้อนแรงดันอินพุตแปรตามเวลาให้กับวงจรที่ ออกแบบไว้ โดยป้อนอินพุตเป็นสัญญาณรูปฟันเลื่อยความถี่ 100 Hz และทำการปรับระดับค่าของสัญญาณให้เป็นบวกทั้งหมด ผ่านวงจรถูกและ คงค่าสัญญาณโดยใช้ ϕ_2 ความคุมจังหวะการทำงานของวงจร แล้วป้อน เป็นสัญญาณอินพุต V_V ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 9, 10 และ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 9 ผลการทดลองของวงจรถอดกราฟที่สอง เมื่ออินพุต V_V เป็นสัญญาณรูปฟันเลื่อย (เส้นบน) และเอาต์พุต $v_o(t)$ (เส้นล่าง)



รูปที่ 10 ผลการทดลองของวงจรถอดกราฟที่สาม เมื่ออินพุต V_V เป็นสัญญาณรูปฟันเลื่อย (เส้นบน) และเอาต์พุต $v_o(t)$ (เส้นล่าง)



รูปที่ 11 ผลการทดลองของวงจรถูกกำลังสาม โดยที่อินพุต V_V เป็นสัญญาณรูปฟันเลื่อย (เส้นบน) และเอาต์พุต $v_o(t)$ (เส้นล่าง)

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอหลักการสร้างวงจรถูกกำลัง p/q โดย มีพื้นฐานอยู่บนการนำวงจรถูกอินทิเกรเตอร์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรถูกและคงค่าสัญญาณเช่นเดียวกับ [2] แต่ได้ปรับปรุงวงจรถูกให้กระชับ และสะดวกในการใช้งานมากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดข้อดีคือสามารถลดวงจรถูกอินทิเกรเตอร์ได้จำนวนมาก และไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก มาควบคุมการทำงานของวงจรถูก นอกจากนี้ยังให้ระดับเอาต์พุตที่สูงและ มีความแม่นยำ อย่างไรก็ตามข้อควรระวังในการใช้งานคือความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณอินพุต V_V และความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ϕ_2 จะเป็นไปตามทฤษฎีการสุ่มค่าสัญญาณ (sampling theorem) กล่าวคือ ความถี่ของอินพุต V_V ในกรณีที่ป้อนเป็นฟังก์ชันของเวลาจะต้องมีเมื่ น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของ ϕ_2 ที่เกิดขึ้นภายในวงจรเพื่อให้สัญญาณอินพุต V_V ไม่มีการสูญหายไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.K. Sen, A. Ray, and B.N. Ray, "An Arbitrary Power - Law Device Based on Operational Transconductance Amplifier", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 42, 1993, pp. 948 - 952.
- [2] วิจิตร โอคง วิวัฒน์ กิรานนท์ จริยา เลิศจรธอรามดี และวิภา แสงพิลาธิ, วงจรถูกกำลังโคจโดยใช่วงจรถูกอินทิเกรเตอร์, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, 2540, หน้า 70- 75.
- [3] วิจิตร โอคง วิวัฒน์ กิรานนท์ จริยา เลิศจรธอรามดี และวิภา แสงพิลาธิ, วงจรถูกกำลังสองและถอดกราฟที่ 2 แบบง่าย, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, 2541, หน้า 289-292.
- [4] S. Franco, *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*, McGraw-Hill, 1988, pp. 544 - 549.
- [5] E., Seevinck, *Analysis and Synthesis of Translinear Integrated Circuits*, Amsterdam Elsevier, 1988.
- [6] W. Surakumponorn, V. Riewruja, K. Kumwachara, and C. Fongsamut, "Temperature Compensation of Translinear Current Conveyor and OTA", Electronics Letters, vol. 34, 1998, pp. 707- 709.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN:0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2542

1. แบบจำลองอุ้มแม่น้ำเขาย-เขกเพื่อการวางแผนพัฒนาแหล่งน้ำ ภัทรภรณ์ เมฆพุดกขางศ์ จักรพันธ์ ชัยทริณู	1
2. การออกแบบและพัฒนาระบบสัญญาณแบบสัมผัสชนิดเคลื่อนที่อิสระได้ 2 แกนของเครื่องวัด 3 แกน มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ศรวิน ทันทิกรณ	7
3. การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบราบเวกนภายในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมโดยวิธีการปริมาตรสี่บ่ง พงษ์เจต พรหมวงศ์ สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์	13
4. การสร้างภาพตัดขวางของความเค้นทานไฟใ้ภายในวัสดุตัวนำ เทอดชัย ธนศาวโรดม ประภากร สุวริยะ กิตติพล สัตตกุล มนัส สังวรศิลป์	19
5. การหาแบบจำลองอิดเดนมาร์คอฟที่เหมาะสมสำหรับการรู้จำเสียงวรรณยุกต์ภาษาไทยเพื่อให้ได้ความแม่นยำสูง จิตรลดา จารมัสร์ ไกรสิน สังวตนา อภิสิทธิ์ อรุณศรีแสงไวย	25
6. การปรับปรุงรายละเอียดของสถาปัตยกรรมไอทีในการแปลงเวกเตอร์ สุทัศน์ ลีวิลาภัย สมศักดิ์ มิตตะดา วิภาวิสา บำเพ็ญมาศ ศิริพงษ์ วงษ์การ	31
7. การทวนสอบโมเดลโปรแกรมเมอร์ ARM 7 ที่ออกแบบด้วยภาษา VHDL เจริญ วงษ์คุ้มเย็น สมศักดิ์ มิตตะดา วรณรัช สัตติอมรทัต อาทิตย์ ทองทักษ์	36
8. การเพิ่มความถูกต้องของสัญญาณไมโครเวฟไดนามิก Add Branching วิยะดา ดอกไม้ วรภาพย์ อัครสมบุรณ์ กอบชัย เดชธานี	41
9. วงจรยกกำลังใด ๆ แบบง่าย วิจิตรา โกลง วิภาวิทย์ นาคกรวิทย์ อัจฉรวรรณ เนียมบัณฑิต วิรัช ศีลารวม จริยา เลิศจรส์อร่ามดี	46
10. การสังเคราะห์ประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแบบหน่วยความจำรวม วัชรพงศ์ ทวีจิตร พัทธษฐ์ ศรีสงวาม กลมเก็ก เดชธานี สุรพันธ์ กัมมัน มนัญ พ่วงพล	52
11. วงจรให้ผลคูณที่เกเรเตอร์ของความถี่ต่ำที่มีการสูญเสียที่รวมในโหมดกระแส สังกานา จารวราชกุล กอบชัย เดชธานี	58
12. วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์โหมดกระแสโดยใช้อัจฉรวรรณกระแส กอบชัย เดชธานี พนมาร์ อุบลเมือง นภิศ สระเสียน เข็ญ นกอนู พิธีรินทร์ สุนัยชัย	62
13. On The Realization Of Current-Mode Filter-Based High-Pass Filter And Inverse Filter Boonrak Chaiyapop Wanlop Surakampontorn	67
14. การแสดงถึงคุณสมบัติเด่นของ P-NNI ที่รูปแบบ Routing ในเครือข่ายชนิด ATM รุทธิรงค์ สุนกุล กอบชัย เดชธานี พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์	72
15. การทดสอบสายส่งตัวนำที่มีการส่งและรับที่มุมฉากที่โคโรนัส ภักษาดิ นีเสศมเสาศร์ กอบชัย เดชธานี พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์	78
16. การควบคุมกระบวนการหลายจุดแบบอิสระแบบสแต็ค สุนัย นภัทรสุภกร นิสร์จณี ศิริวิมลวรรณ สมกิจ เข็มนิมิตร	84
17. การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพลังงานสมมูลร่วมกับตัวควบคุม PID ในการควบคุมระดับของของเหลว ประภาส เรืองวัน พัทธา ปานนิล ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ สนิตย์ ศิริสุวรรณวัฒน์ สุพรรณ กุลหาณิชย์	90
18. การพยากรณ์เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โดยใช้อัลกอริทึม จักรพงษ์ เกาเทียน วิทยา ทิพย์สุวรรณพร วิริยะ กลมวัลย์	96
19. การควบคุมระดับโดยให้ตัวควบคุมแบบฟอสซี เน็ฐฎว โมประดิษฐ์ ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ วิรัช วิวัจจา	102
20. Analytical Stability Of Fuzzy (PI+D) Control Systems Pinkhae Sooraksa Wasan Yamdek	108
21. การสร้างหัวอ่านสำหรับเครื่องตรวจสอบแบบผันตัวอัตโนมัติ พรชัยยศ ศรีปัญญาพงศ์ สุนัย นภัทรสุภกร โยธิน เปรมปรานวีรัตน์ พิมพ์พิชญ์สร ศรีปัญญาพงศ์	113
22. เทคนิคอย่างง่ายในการตรวจสอบตัวเหนี่ยวนำลัดวงจร อุทัย ศักโก วิทยา ทิพย์สุวรรณพร เวศิน ปิกรัตน์	119
23. การสังเกตการแกว่งของหัววัด Accelerometer โดยการใช้เทคนิคของ Laser Interferometry สุภาพร จาตุรัตน์เรืองศรี พงมาน ชันษาญทัศน์ สุริภษา สมควรหาณิชย์	125
24. เทคนิคการวัดตัวเก็บประจุแรงดันสูงชนิดกึ่งตัวนำ SI ₆ นัทสิน กฤษณจินดา วีรชัย ศิริวิภาคนต์	129
25. เครื่องประจุแบตเตอรี่ประจุกลับกำลังสูง สุทธิพงษ์ อุทัยโสม ดีโรโรน เทศแก้ว กนวิรัตน์ จารนิตเสถิต	134
26. คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยก๊าซพลาสมา โยธิน วงศ์ประเสริฐ วิสุทธิ วิฐิฐเรือง อธิพล แจงจัด	140
27. โปรแกรมจำลองแบบและวิเคราะห์ระบบ บุญยงค์ เมื่วิเศษดี บุญศิริ เครือศรี	145

เอกสารฉบับนี้เผยแพร่โดยไม่คิดค่าลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนและการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรยกำลังใดๆ แบบง่าย

A Simple Arbitrary Power-Law Circuit

วิจิตรา โอคง

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

วิภาวัลย์ นาคทรัพย์

ภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

อัจฉรารวรรณ เนื่องนิตย์

ภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วินัย ศิลารวม

ภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

จริยา เลิศจรัสอร่ามดี

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวความคิดในการสร้างวงจรรยกำลังใดๆ แบบง่าย ซึ่งแนวทางในการสร้างวงจรมีการนำเสนอด้วยกัน 2 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบใช้วงจรรวมอินทิเกรเตอร์และวงจรรีเซ็ตเทียบแรงดันร่วมกับวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่สร้างสัญญาณจากการสุ่มค่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ในช่วงเวลาที่เหมาะสม สัญญาณที่ได้จากวงจรมุมและคงค่าสัญญาณนี้จะป้อนเข้าเอาต์พุตของวงจรรยกำลัง ซึ่งมีเลขชี้กำลังกำหนดโดยจำนวนของวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ จากผลการทดลองพบว่าวงจรมุมและคงค่าสัญญาณที่สร้างจากแนวคิดทั้ง 2 วิธีการมีข้อดีคือให้ค่าเอาต์พุตที่มีความแม่นยำสูงและมีความเป็นเชิงเส้นอย่างเป็นที่น่าพอใจ

Abstract

This paper proposes a simple technique to realize an arbitrary power-law circuit. Two general types of circuitry are presented. Each uses integrators together with a comparator and a sample and hold circuit. The sample and hold circuit extracts a sample from an integrator output at an appropriate time interval. This sample represents the power-law output with an index associated with the number of the integrator circuits. It is shown that the experimental results agree well with the theory as high accuracy and linearity is achieved from both of the circuit designs.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าวงจรรยกำลังใดๆ ของสัญญาณเป็นวงจรมุมที่มีประโยชน์อย่างมากในการประมวลผลสัญญาณ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบต่างๆ

ได้มากมาย ดังนั้นวงจรรยกำลังใดๆ (m/n) เมื่อ m และ n เป็นเลขจำนวนเต็มค่าบวกใดๆ จึงเป็นวงจรมุมที่น่าสนใจมาก นอกจากนี้ยังสามารถใช้วงจรมุมเพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างเป็นวงจรรยกำลังและถอดรอกของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

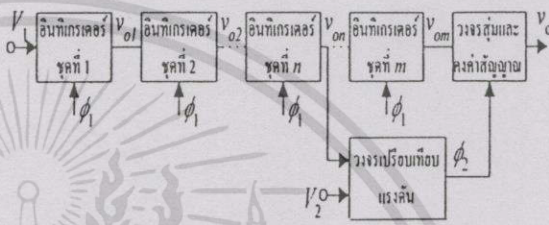
ได้ด้วย [1,2] โดยปรกติวงจรยกกำลังใดๆ ของสัญญาณสามารถสร้างขึ้นได้หลายวิธี เช่น โดยการใช้วงจรขยายสัญญาณแบบลอการิทึมร่วมกับวงจรขยายสัญญาณแบบเอกซ์โพเนนเชียล [3] หรือโดยการใช้วงจรทรานสลิเนียร์ [4] เป็นต้น ทั้งนี้แต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการซึ่งนำมาใช้ ตัวอย่างเช่น วงจรที่ออกแบบโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (transconductance) g_m กับค่ากระแสไบอัส I_o ของ OTA นั้นถึงแม้สามารถนำไปออกแบบเป็นวงจรต่างๆ ได้ง่าย แต่กระนั้นวงจรเหล่านี้ยังคงมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากค่าของ g_m ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่แปรผกผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้น ซึ่งจะมีผลกระทบทำให้วงจรขาดความแม่นยำในการประมวลผล

ในบทความนี้นำเสนอวิธีการสร้างวงจรรยกกำลังใดๆ โดยอาศัยหลักการซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนการนำวงจรอินทิเกรเตอร์มาประยุกต์ใช้เช่นเดียวกับ [2] แต่ได้ทำการปรับปรุงวงจรให้มีความกระชับขึ้น ซึ่งทำให้ได้วงจรที่สามารถลดจำนวนของวงจรรยกกำลังอินทิเกรเตอร์ลงได้เป็นจำนวนมาก กล่าวคือวงจรที่สร้างตาม [2] จะต้องใช้จำนวนวงจรรยกกำลังอินทิเกรเตอร์ถึง $(m+n)$ วงจร ส่วนวงจรซึ่งสร้างจากหลักการที่จะได้นำเสนอนี้จะใช้วงจรรยกกำลังอินทิเกรเตอร์เพียง m หรือ n วงจรเท่านั้นขึ้นอยู่กับว่าค่าใดจะมากกว่ากัน และเพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องทางทฤษฎี ในบทความนี้จะได้นำเสนอผลการทดลองที่ได้จากวงจรรยกกำลังค่าต่างๆ ที่สร้างขึ้นตามหลักการนี้ โดยได้ทำการทดลองในกรณีที่มีสัญญาณอินพุตของวงจรเป็นไฟตรงที่มีค่าคงที่ ซึ่งจะให้เห็นต่อไปว่าการทดลองให้ผลถูกต้องตามหลักการเป็นอย่างดี

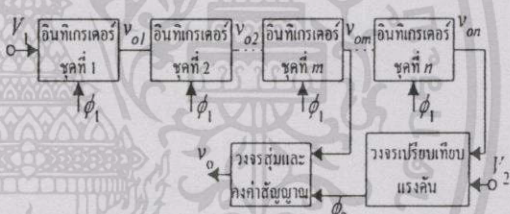
2. หลักการทำงาน

แผนผังการทำงานเบื้องต้นของวงจรรยกกำลัง m/n เมื่อ m และ n เป็นเลขจำนวนเต็มค่าบวกใดๆ แสดงดังในรูปที่ 1 โดยแผนผังการทำงานตามรูปที่ (ก) นั้นใช้ในกรณีที่มี $m > n$ ส่วนแผนผังการทำงานตามรูปที่ (ข) ใช้ในกรณีที่มี $m < n$ การทำงานของแผนผัง

วงจรรยกกำลังตามรูปที่ 1 สามารถอธิบายได้ดังนี้ นำวงจรรยกกำลังอินทิเกรเตอร์มาต่อเรียงลำดับ (cascade) กัน m หรือ n วงจรขึ้นอยู่กับว่าค่าใดมากกว่ากันระหว่างค่าของ m กับค่าของ n และป้อนไฟตรง V_1 โวลต์ เข้าที่อินพุตของอินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1



(ก) วงจรรยกกำลัง m/n ในกรณี $m > n$



(ข) วงจรรยกกำลัง m/n ในกรณี $m < n$

รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของวงจรรยกกำลัง m/n เมื่อ m และ n เป็นเลขจำนวนเต็มค่าบวกใดๆ

เมื่อกำหนดให้แรงดันค่าเริ่มต้นของเอาต์พุตของอินทิเกรเตอร์ทุกชุดมีค่าเป็นศูนย์โดยการใช้สัญญาณนาฬิกา ϕ_1 เป็นตัวควบคุม และสมมติให้เวลาเริ่มต้นของการอินทิเกรตสัญญาณเป็น $t = 0$ ดังนั้นจะได้ว่าค่าเอาต์พุต v_{oi} ของวงจรรยกกำลังอินทิเกรเตอร์ชุดที่ i มีค่าเป็น

$$v_{oi}(t) = \frac{V_1 t^i \prod_{j=1}^i \alpha_j}{i!} \tag{1}$$

โดยในที่นี้ α_j คือค่าความไวหรือเกน (gain) ในการอินทิเกรตสัญญาณของอินทิเกรเตอร์ในแต่ละชุด

ข้อควรระวังในการใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรถูกกำลัง $\frac{m}{n}$ นี้จะใช้แรงดันเอาต์พุตของวงจรรีโวลต์เรเตอร์ชุดที่ n มาเปรียบเทียบกับแรงดันที่ต้องการยกกำลังคือ V_2 โดยใช้วงจรถือเปรียบเทียบกับแรงดันเป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งเอาต์พุต ϕ_2 ของตัวเปรียบเทียบแรงดันนี้จะถูกนำไปใช้ควบคุมวงจรมุมและคงค่าสัญญาณจากเอาต์พุตของวงจรรีโวลต์เรเตอร์ชุดที่ m เพื่อนำมาเป็นเอาต์พุต v_o ของวงจรถูกกำลังที่ต้องการ ช่วงเวลา T ที่อินทิเกรเตอร์ชุดที่ n ใช้ เพื่อเพิ่มค่าเอาต์พุตจนมีค่าเท่ากับค่าแรงดัน V_2 นั้น คำนวณได้โดยการเทียบเท่าค่าแรงดันเอาต์พุต v_{om} กับ V_2 ดังต่อไปนี้คือ

$$v_{om}(T) = \frac{V_1 T^n \prod_{j=1}^n \alpha_j}{n!} = V_2 \quad (2)$$

ซึ่งเมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$T = \left(\frac{n! V_2}{V_1 \prod_{j=1}^n \alpha_j} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

ที่เวลา $t=T$ นี้ เอาต์พุต ϕ_2 ของวงจรถือเปรียบเทียบกับแรงดันจะมีการเปลี่ยนสภาวะ และจะไปควบคุมการชักราค่าตัวอย่างสัญญาณเอาต์พุต v_{om} จากวงจรรีโวลต์เรเตอร์ชุดที่ m ออกมาเป็นเอาต์พุต v_o นั่นคือ

$$v_o(t) = v_{om}(T) = \frac{V_1 T^m \prod_{j=1}^m \alpha_j}{m!} \quad (4)$$

ซึ่งเมื่อแทน T ตามสมการ (3) แล้วจะได้ว่า

$$v_o(t) = \frac{(n!)^{\frac{m}{n}} \prod_{j=1}^m \alpha_j}{m!(V_1)^{\frac{m}{n}} \left(\prod_{j=1}^n \alpha_j \right)^{\frac{m}{n}}} (V_2)^{\frac{m}{n}} \quad (5)$$

หรือ

$$v_o(t) = k(V_2)^{\frac{m}{n}} \quad (6)$$

โดยในที่นี้กำหนดให้

$$k = \frac{(n!)^{\frac{m}{n}} \prod_{j=1}^m \alpha_j}{m!(V_1)^{\frac{m}{n}} \left(\prod_{j=1}^n \alpha_j \right)^{\frac{m}{n}}}$$

จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต v_o ซึ่งได้มาจากวงจรมุมและคงค่าสัญญาณมีค่าแปรตามค่า V_2 ยกกำลัง $\frac{m}{n}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วงจรนี้สามารถใช้เป็นวงจรถูกกำลัง $\frac{m}{n}$ ได้ตามต้องการเมื่อใช้ V_2 เป็นแรงดันอินพุต

ในการนำวงจรไปใช้งานจริง จะใช้สัญญาณนาฬิกา ϕ_1 มาทำการรีเซตระบบเพื่อให่วงจรมีการประมวลผลวนอยู่ซ้ำแล้วซ้ำอีก การกระทำเช่นนี้จะทำให้เกิดการปรับค่าของเอาต์พุต v_o เมื่อค่าอินพุต V_2 เปลี่ยนแปลงไป ในการกำหนดสัญญาณนาฬิกา ϕ_1 นั้น ควรให้ค่า ϕ_1 มีความถี่มากกว่าค่าอัตราไนควิสต์ (Nyquist rate) ของสัญญาณอินพุต V_2 เพื่อให้ข้อมูลในสัญญาณ V_2 ไม่สูญหายไปตามหลักการของทฤษฎีการชักราค่าตัวอย่างสัญญาณ (Sampling Theorem)

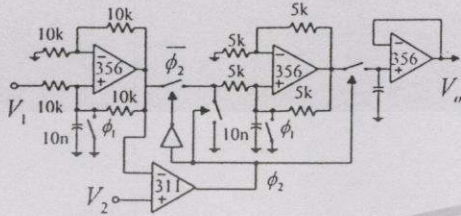
3. การทดลองและผล

เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของหลักการ ในทางปฏิบัติจึงได้สร้างวงจรถูกกำลังขึ้นตามหลักการที่นำเสนอ วงจรที่นำมาทำการทดลองได้แก่ วงจรถูกกำลังสอง ($m=2, n=1$) วงจรถอดรหัสดิจิตอล ($m=1, n=2$) วงจรถูกกำลังสาม ($m=3, n=1$) วงจรถอดรหัสดิจิตอล ($m=1, n=3$) และวงจรถูกกำลัง 1.5 ($m=3, n=2$) ดังแสดงในรูปที่ 2, 4, 6, 7 และ 10 ตามลำดับ

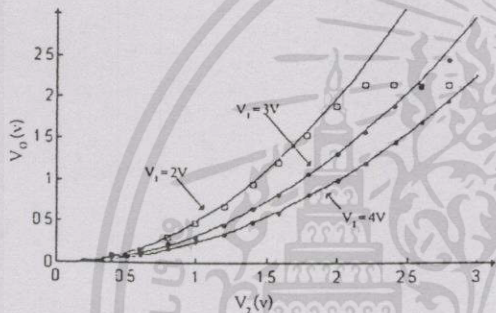
ในการทดลองนี้ได้ใช้อินเวอร์เตอร์เบอร์ 7404 ใช้อานาล็อกสวิตช์เบอร์ 4066 ใช้ ϕ_1 มีความถี่เท่ากับ 100 ไมโครวินาที duty cycle เท่ากับ 50% และใช้ไฟเลี้ยงระบบของวงจร ± 5 โวลต์ จากการต่อวงจรตามรูปที่ 2 ซึ่งออกแบบโดยใช้ดีโอบินทิเกรเตอร์ (Deboo integrator) หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_2 กับแรงดันเอาต์พุต v_o เมื่อ V_1 มีค่าต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเส้นทึบแทนค่าเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณ และสัญลักษณ์ต่างๆแทนค่าที่วัดได้จากการทดลอง

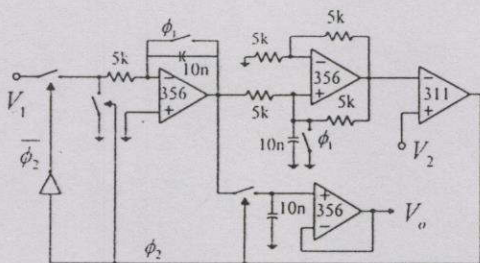


รูปที่ 2 วงจรยกกำลังสองที่ใช้ในการทดลอง

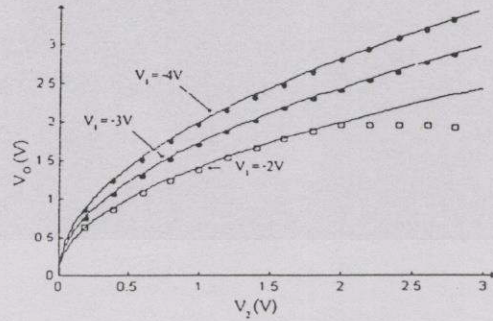


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V2 กับแรงดันเอาต์พุต v0 เมื่อ V1 มีค่าต่างๆ ของวงจรกำลังสอง (m=2, n=1)

จากผลการทดลองตามรูปที่ 3 จะสังเกตเห็นได้ว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นบ้างในกรณีที่ V1 = 2 โวลต์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าค่าที่ได้จากการอินทิเกรต V1 ซึ่งเป็นค่าที่นำมาเปรียบเทียบกับ V2 นั้นมีค่าน้อยกว่า V2 เมื่อ V2 > 2 โวลต์ ทำให้ไม่เกิดพัลส์ phi2 ที่จะนำไปควบคุมวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ จึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น แต่สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ V1 ที่มีค่าสูงขึ้น



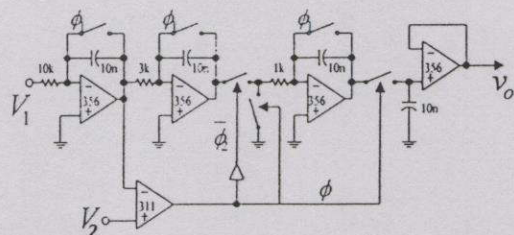
รูปที่ 4 วงจรถอดครากที่สองที่ใช้ในการทดลอง



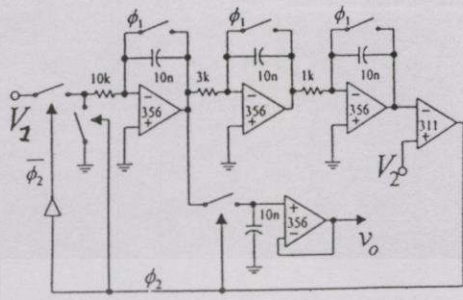
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V2 กับแรงดันเอาต์พุต v0 เมื่อ V1 มีค่าต่างๆ ของวงจรถอดครากที่สอง (m=1, n=2)

วงจรรูปที่ 4 สร้างขึ้นโดยใช้อินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 เป็นแบบมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์ (Miller integrator) ร่วมกับคิโบอินทิเกรเตอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ V1 มีค่าเป็นลบ ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V2 กับแรงดันเอาต์พุต v0 เมื่อ V1 มีค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5 โดยเส้นทึบแทนค่าเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณ และสัญลักษณ์ต่างๆแทนค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อสังเกตผลการทดลองในรูปที่ 5 จะพบว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นบ้างในกรณีที่ V1 = -2 โวลต์ ซึ่งเป็นความผิดพลาดในทางองเดียวกันกับกรณีของวงจรกำลังสองที่มีค่า V1 = 2 โวลต์ ตามที่ได้อธิบายมาแล้วในรูปที่ 3

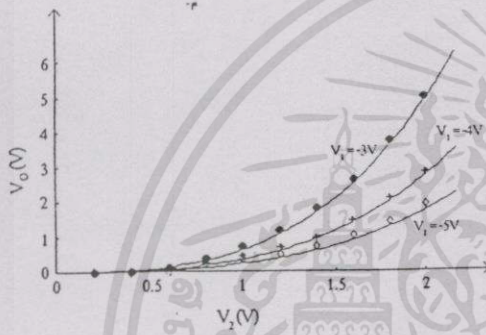
วงจรรูปที่ 6 และ 7 ได้จากการออกแบบโดยใช้มิลเลอร์อินทิเกรเตอร์เพื่อให้ได้วงจรที่ง่ายขึ้นในการทดลอง ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V2 กับแรงดันเอาต์พุต v0 เมื่อ V1 มีค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ โดยเส้นทึบแทนค่าเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณและสัญลักษณ์ต่างๆแทนค่าที่วัดได้จากการทดลอง



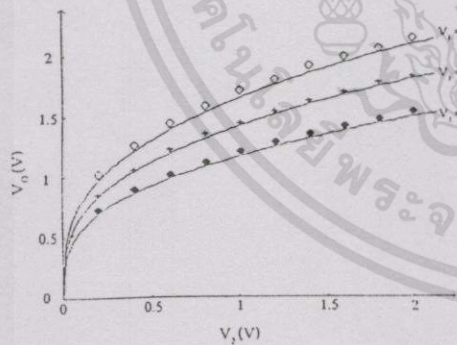
รูปที่ 6 วงจรยกกำลังสามที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 7 วงจรอครากที่สามที่ใช้ในการทดลอง



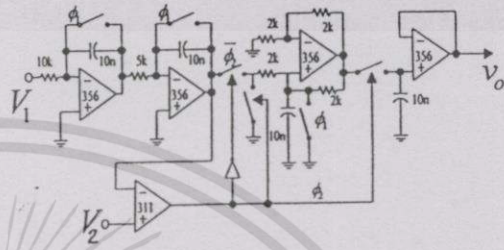
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_2 กับแรงดันเอาต์พุต v_o เมื่อ V_1 มีค่าต่างๆ ของวงจรถอยก่าลังสาม ($m=3, n=1$)



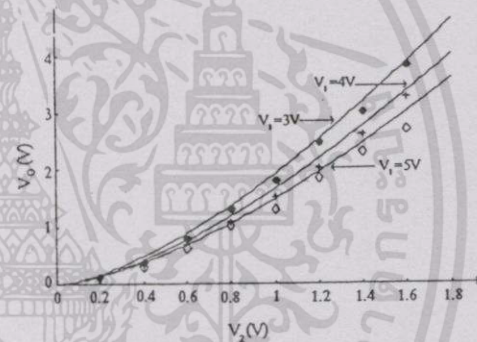
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_2 กับแรงดันเอาต์พุต v_o เมื่อ V_1 มีค่าต่างๆ ของวงจรถอยครากที่สาม ($m=1, n=3$)

และวงจรถอยครากที่ 10 ได้ทำการออกแบบโดยใช้ อินทิเกรเตอร์ชุดที่ 1 และ 2 เป็นแบบมิลเลอร์อินทิเกรเตอร์ ร่วมกับดีโอบินทิเกรเตอร์ หากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน

อินพุต V_2 กับแรงดันเอาต์พุต v_o เมื่อ V_1 มีค่าต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 11 โดยเส้นที่บแทนค่าเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณและสัญลักษณ์ต่างๆแทนค่าที่วัดได้จากการทดลอง



รูปที่ 10 วงจรถอยก่าลัง 1.5ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต V_2 กับแรงดันเอาต์พุต v_o เมื่อ V_1 มีค่าต่างๆ ของวงจรถอยก่าลัง 1.5 ($m=3, n=2$)

จะเห็นจากการทดลองทุกชุดว่าวงจรถอยครากทำงานได้ดีตามหลักการทางทฤษฎีที่น่าเสนอ

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรถอยก่าลัง m/n แบบง่าย โดยนำเทคนิคการสุ่มและคงค่าสัญญาณมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรถอยครากและวงจรถอยเปรียบเทียบแรงดัน โดยได้ทำการดัดแปลงวงจรถอยครากพื้นฐานตามวิธีการที่เขย่นำเสนอไว้ใน [2] ข้อดีที่ได้เปรียบของหลักการซึ่งนำเสนอนี้คือ สามารถลดจำนวนของวงจรถอยครากได้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงทำให้วงจรถอยคราก

ที่ได้มีส่วนประกอบที่ง่ายขึ้น นอกจากนี้วงจรที่ได้จากการออกแบบโดยใช้หลักการนี้ยังมีข้อดีต่างๆ อีกหลายประการคือให้ค่าระดับเอาต์พุตสูง มีความแม่นยำ และมีเสถียรภาพ (ทางทฤษฎี) ที่ดี ข้อควรพิจารณาในวงจรที่นำเสนอนี้ก็คือได้มีการนำหลักการซิกค่าตัวอย่างสัญญาณ (sampling theorem) มาประยุกต์ใช้ จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในการทำงานของวงจรคือความถี่สัญญาณนาฬิกาจะต้องมีค่ามากกว่า 2 เท่าของความถี่สูงสุดขององค์ประกอบในสัญญาณการใช้งาน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเงื่อนไขการใช้งานให้เหมาะสมแล้ว วงจรที่นำเสนอในบทความนี้จะมี ความเหมาะสมอย่างมากกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบที่เกี่ยวกับการสื่อสาร การวัด การควบคุม และการประมวลผลสัญญาณแบบอนาล็อก

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. K. Sen, A. Ray and B. N. Ray, "An Arbitrary Power-law Device Based on Operational Transconductance Amplifier," IEEE. Trans. Instrum. Meas., 1993, Vol.42, pp. 948-952.
- [2] วิจิตรา โอคง, จริยา เลิศจรสอร่ามดี, วิภา แสงพิสิทธิ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์; "วงจรถักกำลังใดๆ โดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์," เอกสารรวมเล่มการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, พ.ศ.2540, หน้า 70-75.
- [3] G. E. Tobey, I. G. Grame and L. P. Huelsman, *Operational Amplifier Design and Application*. New York: McGraw-Hill, 1971.
- [4] E. Seevinck, *Analysis and Synthesis of Translinear Integrated Circuits*. Amsterdam Elsevier, 1988.

ประวัติผู้เขียน

นางวิภาวัลย์ นาคทรัพย์ เกิดเมื่อวันพฤหัสบดีที่ 23 เมษายน 2513 ที่จังหวัดหนองคาย
สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย สายวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนบัวขาว
อ.ภูผินารายณ์ จ.กาฬสินธุ์ ในปีการศึกษา 2531 และวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการวัดคุม)
จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2535

ปัจจุบันทำหน้าที่เป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสยาม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้