วงจรผลิตสัญญาณโดยใช้การประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

A FUNCTION GENERATOR WITH OPTIMAL TRIANGULAR-TO-SINE WAVE CONVERTER

วินัย ศิลารวม

VINAI SILARUAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-951-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรผลิตสัญญาณโดยใช้การประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

A FUNCTION GENERATOR WITH OPTIMAL TRIANGULAR-TO-SINE WAVE CONVERTER

T038021

วินัย ศิลารวม

VINAI SILARUAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2543

ISBN 974-622-951-6

เลขหมู่.........

เลขทะเบียน 38021

วัน, เดือน, ปี 20 พ.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสาร[illegible]ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A FUNCTION GENERATOR WITH OPTIMAL TRIANGULAR-TO-SINE WAVE CONVERTER

VINAI SILARUAM

A THSIS 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
2000

ISBN 974-622-951-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2000
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรผลิตสัญญาณโดยใช้การประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

A FUNCTION GENERATOR WITH OPTIMAL TRIANGULAR-TO-SINE WAVE CONVERTER

ชื่อนักศึกษา นายวินัย ศิลารวม

รหัสประจำตัว 37061119

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วันชัย ริ้วรุจา	(ลงนาม)
รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน	ปราโมทย์ วาดเขียน
ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ	(ลงนาม)
ผศ.ดร.จริยา เลิศจรัสอร่ามดี	(ลงนาม)
ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์	(ลงนาม)

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 5 ตุลาคม 2543 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น 4 ห้อง (E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่....19.....**เดือน**....ตุลาคม.........**พ.ศ.**..2543.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรผลิตสัญญาณโดยใช้การประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม
นักศึกษา	นายวินัย ศิลารวม
รหัสประจำตัว	37061119
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลงานวิจัยการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณอย่างง่ายที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกัน คือ สัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้แบบแผนที่บังเกิดผลดีที่สุดในการเปลี่ยนสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์และการเลียนแบบการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอนี้มีข้อดีกว่าวิธีการที่เคยนำเสนอมาแล้ว คือ นอกจากจะให้สัญญาณรูปไซน์ที่มีค่า THD ต่ำที่สุดเพียง $5.02\times10^{-5}\%$ แล้วการสร้างวงจรยังใช้เทคนิคที่ทำให้วงจรมีลักษณะเรียบง่ายไม่ซับซ้อนอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ค่า THD ที่ได้จากการทดลองต่อวงจรจริงมีค่าต่ำที่สุด 0.01% ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Function Generator with Optimal Triangular-to-Sine Wave Converter
Student	Mr. Vinai Silaruam
Student ID.	37061119
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Professor Wiwat Kiranon, D. Eng.

ABSTRACT

This thesis describes the development of designing the signal generator to produce sinusoidal wave, triangular wave and rectangular wave from the same circuitry. The focal point is the new establishments of sinusoidal wave from triangular wave base on optimization scheme with respect to a total harmonic distortion (THD) to transform a triangular wave into a parabola section-like sinusoidal wave. The equations describing the method are derived and solved both analytically and by computer. This allows the superb optimum performance such that the THD is low as $5.02\times10^{-5}\%$, but also a simple-to-implement circuitry. However, the experimental results obtained indicate that the THD are limited by the practical hardware to be around 0.01%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จแห่งวิทยานิพนธ์นี้เป็นผลเนื่องมาจากการอบรมและสั่งสอนด้วยแนวคิดและแนวปฏิบัติแห่งความเป็นครูบาอาจารย์ของศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ กิรานนท์ ซึ่งข้าพเจ้าได้นบน้อมไว้ในจิตใจเสมอมาและจะนำไปประพฤติปฏิบัติเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์แก่สังคมตราบจนชีวิตจะหาไม่ นอกจากนี้ขอขอบคุณถึงคุณแม่ละออง-คุณพ่อลิขิต ศิลารวม คุณปิยะนุช สุขเสรีรักษ์และเพื่อนๆและน้องๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครและภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยามที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดต่างๆ

วินัย ศิลารวม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VI

สารบัญรูป.....VII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....1

1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์.....1

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 การสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม.....3

2.1 กล่าวนำ.....3

2.2 หลักการเดิมที่นำเสนอ.....3

2.2.1 วิธีการประมาณเชิงเส้นแบบช่วง.....4

2.2.2 วิธีการแบบลอการิทึม.....6

2.3 หลักการประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมแบบใหม่.....12

บทที่ 3 วงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....15

3.1 กล่าวนำ.....15

3.2 วงจรคูณสัญญาณ.....15

3.3 วงจรแคลมป์สัญญาณ.....20

3.4 วงจรขยายผลต่าง.....22

3.5 วงจรอนาลอกสวิตช์.....23

3.6 วงจรขยายแรงดันแบบสลับค่าอัตราขยายได้.....25

3.7 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....26

3.7.1 วงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์.....26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.7.2 วงจรชมิตต์ทริกเกอร์..28

3.8 วงจรอินทิเกรเตอร์..30

3.8.1 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์..30

3.8.2 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบดีโบ..33

บทที่ 4 หลักการและการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณ..35

4.1 กล่าวนำ..35

4.2 หลักการและการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1..35

4.2.1 หลักการ..35

4.2.2 การออกแบบวงจร..37

4.3 หลักการและการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2..41

4.3.1 หลักการ..42

4.3.2 การออกแบบวงจร..45

บทที่ 5 การทดลองและผล..50

5.1 กล่าวนำ..50

5.2 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ก)..50

5.3 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ข)..53

5.4 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2..55

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์..61

เอกสารอ้างอิง..63

ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปไซน์..65

ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์..68

ประวัติผู้เขียน..80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

5.1 ค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป...59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรบีบกดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปไซน์......3

2.2 (ก) วงจรบีบกดสัญญาณด้วยวิธีการเชิงเส้นแบบช่วง......4

2.2 (ข) ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรในรูปที่ 2.2 (ก)......4

2.3 วงจรบีบกดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์ด้วยวิธีการประมาณเชิงเส้นแบบช่วง..6

2.4 วงจรบีบกดสัญญาณที่อาศัยวงจรคู่ผลต่างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์......6

2.5 วงจรคู่ผลต่างแบบ NMOS......9

2.6 วงจรคู่ผลต่างแบบ MOS n ชุด......11

2.7 วงจรบีบกดสัญญาณที่อาศัยวงจรคู่ผลต่างแบบ MOS......11

2.8 (ก) สัญญาณรูปสามเหลี่ยม......14

2.8 (ข) สัญญาณที่เกิดจากการยกกำลังสองของ $f_1(t)$......14

2.8 (ค) สัญญาณที่เกิดจากการแคลมป์ระดับลงมาของ $f_2(t)$......14

2.8 (ง) สัญญาณที่เกิดจากการสลับกลับทิศทุกช่วงเวลา $\frac{T}{2}$ ของ $f_3(t)$......14

3.1 วงจรพื้นฐานของวงจรคูณสัญญาณแบบสี่ควอแดรนท์......16

3.2 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส......17

3.3 วงจรคูณสัญญาณสี่ควอแดรนท์แบบแปรค่าทรานส์คอนดักแตนซ์......17

3.4 วงจรยกกำลังสอง......19

3.5 วงจรแคลมป์สัญญาณอย่างง่าย......20

3.6 (ก) อินพุตของวงจรในรูปที่ 3.5......21

3.6 (ข) เอาต์พุตในสภาวะคงตัวของวงจรในรูปที่ 3.5......21

3.7 วงจรขยายผลต่าง......22

3.8 (ก) วงจรอนาลอกสวิตช์ในอุดมคติ......24

3.8 (ข) คุณลักษณะทางแรงดันและกระแสของวงจรอนาลอกสวิตช์ในรูปที่ 3.8 (ก)......24

3.9 วงจรอนาลอกสวิตช์พื้นฐาน......24

3.10 วงจรขยายแรงดันแบบสลับค่าอัตราขยายได้......25

3.11 (ก) วงจรตรวจจับข้ามศูนย์แบบนอนอินเวอร์ติง......27

3.11 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตของวงจรในรูปที่ 3.11 (ก)......27

3.12 วงจรขยายที่มีการป้อนกลับแบบบวก......28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.13 (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์.....29

3.13 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและอินพุตของวงจรในรูปที่ 3.13 (ก).....29

3.14 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์พื้นฐาน.....31

3.15 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์ในทางปฏิบัติ.....31

3.16 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์พื้นฐานในโดเมน S.....32

3.17 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบดีโบ.....33

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ $f_1(t)$ และสัญญาณ $f_2(t)$.....36

4.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1.....37

4.3 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ก).....38

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ v_{o1} และสัญญาณ v_{o2}.....39

4.5 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ข).....41

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ $f_4(t)$ และสัญญาณ $f_5(t)$.....43

4.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2.....43

4.8 (ก) ผลการเลียนแบบเอาต์พุตจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.7.....44

4.8 (ข) สเปกตรัมกำลังที่ได้จากการเลียนแบบของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 4.8 (ก).....44

4.8 (ค) ค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานของบล็อกไดอะแกรม ในรูปที่ 4.7 ในช่วงความถี่ 0.1 *Hz* ถึง 10 *MHz*.....44

4.9 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2.....46

4.10 (ก) สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม.....47

4.10 (ข) สัญญาณรูปสามเหลี่ยม.....47

5.1 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ก) ที่ใช้ในการทดลอง.....51

5.2 (ก) สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณรูปสามเหลี่ยม.....52

5.2 (ข) สัญญาณรูปพาราโบลาและสัญญาณรูปไซน์.....52

5.2 (ค) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 5.2 (ข).....52

5.3 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ข) ที่ใช้ในการทดลอง.....53

5.4 (ก) สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณรูปสามเหลี่ยม.....54

5.4 (ข) สัญญาณรูปพาราโบลาและสัญญาณรูปไซน์.....54

5.4 (ค) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 5.4 (ข).....54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.5 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2 ที่ใช้ในการทดลอง..56

5.6 (ก) สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม..57

5.6 (ข) สัญญาณรูปพาราโบลาและสัญญาณรูปไซน์...57

5.6 (ค) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 5.6 (ข)..57

5.7 (ก) ขนาดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป........58

5.7 (ข) ขนาดของสัญญาณรูปไซน์ขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป...58

5.8 ค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป..59

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องกำเนิดสัญญาณนับว่าเป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็น จะขาดเสียมิได้ในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า สัญญาณพื้นฐานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณควรจะจ่ายได้ คือ สัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม และสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม โดยสัญญาณควรมีขนาดคงที่แน่นอนเมื่อปรับเปลี่ยนความถี่ไปซึ่งเครื่องมือที่ดีนั้นจะมีราคาแพงและยุ่งยาก ในทางปฏิบัติ สัญญาณที่มักจะเกิดปัญหาในการสร้างคือสัญญาณรูปไซน์ ถึงแม้ว่าจะสามารถสร้างได้ง่ายจากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบเชิงเส้น (linear oscillator) แต่ก็ไม่ง่ายนักในการรักษาขนาดของสัญญาณให้คงที่ขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป อย่างไรก็ตาม สามารถที่จะลดปัญหานี้ได้โดยอาศัยวงจรควบคุมแบบไม่เชิงเส้น แต่ก็มักจะมีส่วนทำให้สัญญาณรูปไซน์เกิดความผิดเพี้ยนขึ้น [1] ดังนั้น ในย่านความถี่ที่ไม่สูงมากนัก จึงนิยมสร้างสัญญาณรูปไซน์ขึ้นจากการนำสัญญาณรูปสามเหลี่ยมซึ่งสามารถสร้างให้มีขนาดคงที่ได้ง่ายไปผ่านวงจรบีบกดสัญญาณออกมาเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาดคงที่ได้ง่ายเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ดี ความพยายามในการลดค่าความเพี้ยนของสัญญาณรูปไซน์ที่นิยมกำหนดด้วยค่า THD (total harmonic distortion) มักทำให้วงจรบีบกดสัญญาณดังกล่าว มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น [2] โดยรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไป

ดังนั้น หากสามารถหาวิธีการลดความซับซ้อนของวงจรบีบกดสัญญาณดังกล่าวนี้ได้ ก็จะทำให้การสร้างวงจรผลิตสัญญาณที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกันนี้ มีความน่าสนใจอย่างยิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

ด้วยเหตุดังกล่าวมาในหัวข้อที่แล้วนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาและวิจัยการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกัน คือ สัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม โดยทำการสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมด้วยแนวความคิดที่ว่า สัญญาณรูปไซน์นั้นมีลักษณะเหมือนกับการนำส่วนโค้งพาราโบลา (parabola section) สองส่วนมาต่อกัน ซึ่งวิธีการนี้จะแสดงให้เห็นว่า สามารถสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีค่าความผิดเพี้ยนต่ำกว่าวิธีการที่เคยนำเสนอมาแล้วด้วยวงจรที่มีโครงสร้างเรียบง่ายไม่ซับซ้อน

1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

วงจรผลิตสัญญาณที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกันที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบแรกอาศัยวงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์ วงจรอินทิเกรเตอร์และวงจรประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมทำงานร่วมกันในลักษณะลูปปิดของวงจรออสซิลเลเตอร์ ส่วนรูปแบบที่สองอาศัยวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (astable multivibrator) ที่ประกอบขึ้นจากวงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์ (Miller's integrator) และวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ (schmitt trigger) ทำงานร่วมกับวงจรประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของแต่ละวงจรจะได้กล่าวถึงต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากวงจรผลิตสัญญาณที่นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณขนาดกระทัดรัดที่จ่ายเอาต์พุตได้ 3 รูปแบบพร้อมกัน คือ สัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม นอกจากนี้แนวความคิดที่นำเสนอยังมีความน่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรได้หลากหลายรูปแบบอีกด้วย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

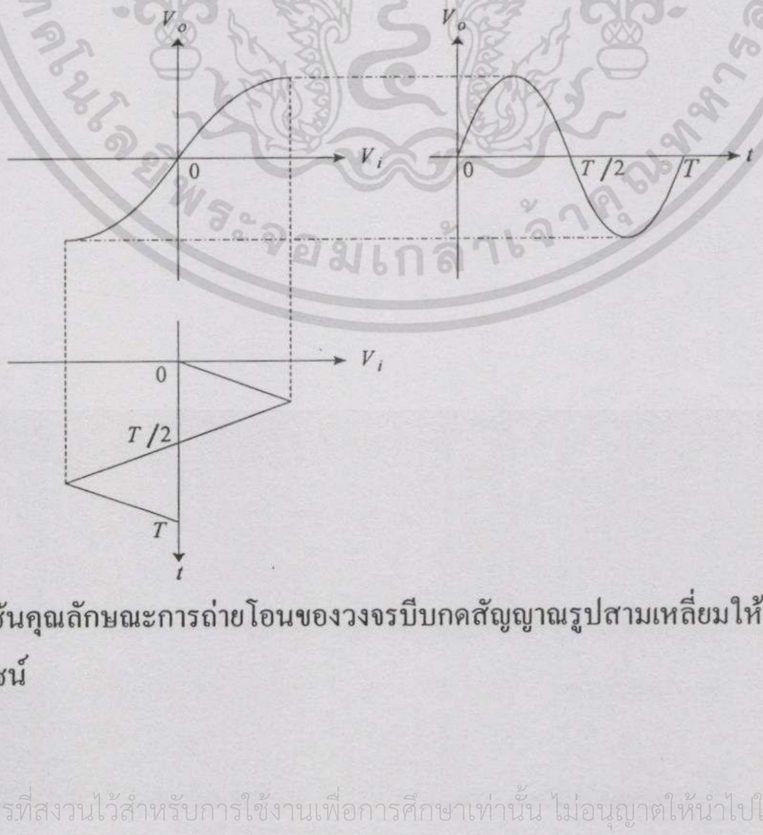
การสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

2.1 กล่าวนำ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายในการนำเสนอวงจรผลิตสัญญาณที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกัน โดยเน้นไปที่การสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ดังที่ได้อธิบายมาบ้างแล้วในบทนำ ดังนั้นในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึง เรื่องที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมพอสังเขป

2.2 หลักการเดิมที่นำเสนอ

การสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมสามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยอาศัยวงจรบีบกดสัญญาณแบบไม่เชิงเส้นทำการบีบกดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้มีรูปร่างประมาณเป็นสัญญาณรูปไซน์ โดยวงจรบีบกดสัญญาณดังกล่าวมักจะมีฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอน (transfer characteristic function) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและอินพุตของวงจรเป็นไปตามคุณสมบัติของฟังก์ชันรูปไซน์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดย V_i แทนแรงดันอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีคาบเวลา T วินาทีและ V_o เป็นแรงดันเอาต์พุตที่มีรูปร่างเป็นสัญญาณรูปไซน์ ผลจากการ



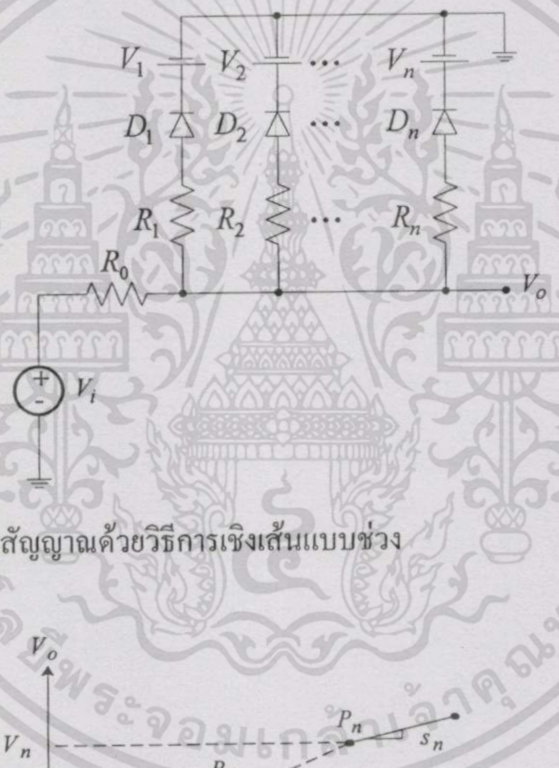
รูปที่ 2.1 ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรบีบกดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

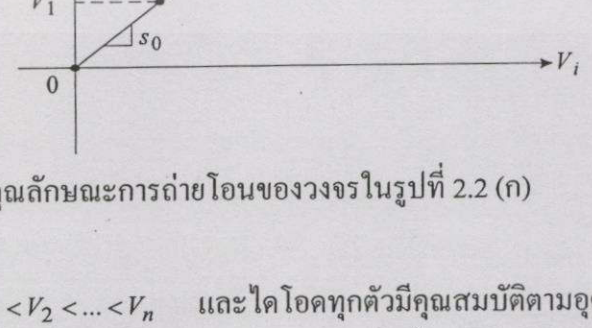
บีบกดสัญญาณแบบนี้จะทำให้สัญญาณรูปไซน์มีความถี่เดียวกันกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา เทคนิคการออกแบบวงจรบีบกดสัญญาณดังกล่าวมักจะแบ่งออกเป็น 2 วิธี ด้วยกันคือ

2.2.1 วิธีการประมาณเชิงเส้นแบบช่วง (piecewise linear approximation method)

วิธีการนี้ได้อาศัยการประมาณรูปร่างของฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรที่ต้องการด้วยการนำส่วนของเส้นตรงมาต่อกัน ซึ่งก็เป็นที่ทราบกันดีว่า ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนรูปแบบนี้สามารถสร้างขึ้นได้ง่ายจากวงจรที่ประกอบด้วยไดโอดและตัวต้านทานต่อร่วมกัน [3]-[6] เพื่อให้ง่ายในการทำความเข้าใจ พิจารณาการทำงานของวงจรในรูปที่ 2.2 (ก) เมื่อกำหนด



รูปที่ 2.2 (ก) วงจรบีบกดสัญญาณด้วยวิธีการเชิงเส้นแบบช่วง



รูปที่ 2.2 (ข) ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรในรูปที่ 2.2 (ก)

ให้แรงดันอ้างอิง $V_1 < V_2 < ... < V_n$ และไดโอดทุกตัวมีคุณสมบัติตามอุดมคติและมีความแมตช์ (match) กัน ขณะที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_i ค่อยๆเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์โวลต์ ไดโอดทุกตัวยังได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) จึงทำให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_i ไม่มีภาระ (load) จะได้ $V_o = V_i$ ดังนั้น จากรูปที่ 2.2 (ข) จะได้ค่าความชัน s_0 เป็น

$$s_0 = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = 1 \tag{2.1}$$

โดยที่ ΔV_o และ ΔV_i เป็นผลการเปลี่ยนแปลงค่าของ V_o และ V_i ตามลำดับ ขณะนี้ V_i และ V_o เพิ่มขึ้นด้วยค่าเดียวกัน จนกระทั่งเมื่อ V_o มีค่า V_1 ที่จุดเบรค (break point) P_1 ไดโอด D_1 เริ่มได้รับไบอัสตรง (forward bias) จึงทำให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_i ในวงจรรูปที่ 2.2 (ก) มีภาระเกิดขึ้น ดังนั้น จากรูปที่ 2.2 (ข) จะได้ค่าความชัน s_1 เป็น

$$s_1 = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{R_1}{R_0 + R_1} \tag{2.2}$$

นั่นคือ จากจุดเบรค P_1 ขณะที่ V_i เพิ่มขึ้นจะทำให้ V_o เพิ่มขึ้นตามด้วยค่าความชัน s_1 ในลักษณะเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของ V_i จนทำให้ V_o มีค่า V_n ที่จุดเบรค P_n ไดโอด D_n เริ่มได้รับไบอัสตรง ดังนั้น จากรูปที่ 2.2 (ข) ก็จะได้ค่าความชัน s_n เป็น

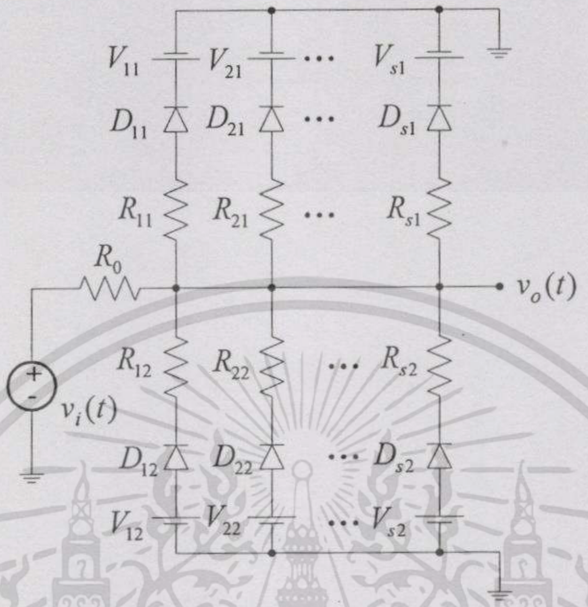
$$s_n = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{R_1 // R_2 // .... // R_n}{R_0 + R_1 // R_2 // ... // R_n} \tag{2.3}$$

นั่นคือ วงจรในรูปที่ 2.2 (ก) เป็นวงจรบีบกดสัญญาณที่มีฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) ดังนั้น ถ้าหากนำส่วนของเส้นตรงมาต่อกันให้มีรูปร่างประมาณเป็นฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรบีบกดสัญญาณดังในรูปที่ 2.1 แล้วจะได้วงจรพื้นฐานที่ทำให้เกิดการบีบกดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปไซน์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อกำหนดให้ $R_{k1} = R_{k2}$ และ $V_{k1} = -V_{k2}$ แล้วกลุ่ม R_{k1}, D_{k1}, V_{k1} และกลุ่ม R_{k2}, D_{k2}, V_{k2} จะทำให้เกิดการบีบกดแรงดันอินพุตที่เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม V_i ในครึ่งซีกบวกและซีกลบตามลำดับ โดยที่ $k = 1, 2, 3, ..., s$

เนื่องจากคุณภาพของสัญญาณรูปไซน์ที่เกิดจากวงจรบีบกดสัญญาณตามรูปที่ 2.3 นี้ขึ้นอยู่กับการเลือกจำนวนและตำแหน่งของจุดเบรคบนฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจร ดังที่พบได้จากผลงานวิจัยของ Evans และ Schiffer [7] โดยข้อด้อยที่สำคัญของวงจรบีบกดสัญญาณรูปแบบนี้ คือ ถ้าหากต้องการสัญญาณรูปไซน์ที่มีค่า THD ต่ำเพียงใด ในการออกแบบวงจรก็ต้องใช้ไดโอดและตัวต้านทานจำนวนมากขึ้นตามด้วย จึงทำให้วงจรมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน วงจรบีบกดสัญญาณแบบนี้ยังคงใช้งานกันอยู่ ดังเช่นโครงสร้างภายในของไอซีกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

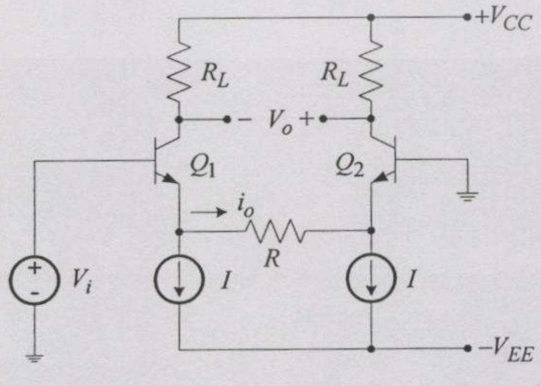
สัญญาณเบอร์ ICL8038 โดยสัญญาณรูปไซน์มีค่า THD ต่ำสุดเพียง 0.5% เท่านั้นเมื่อเลือกใช้จำนวนจุดเบรคทั้งหมด 8 จุด [3]-[4]



รูปที่ 2.3 วงจรบีบกดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์ด้วยวิธีการประมาณเชิงเส้นแบบช่วง

2.2.2 วิธีการแบบลอการิทึม (logarithmic method)

วิธีการนี้ได้อาศัยเทคนิคการปรับฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรคู่ผลต่าง (differential pair) ให้มีรูปร่างประมาณเป็นฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยแนวความคิดนี้มีการนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ.1972 โดย Grebence [8] แนะนำว่า วงจรดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นวงจรคู่ผลต่างที่ใช้คู่ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (bipolar transistor) Q_1 และ Q_2 ที่มีความแมตช์กัน โดยมีตัวต้านทาน R ต่ออยู่ระหว่างขาอิมิตเตอร์ (emitter) ของทราน



รูปที่ 2.4 วงจรบีบกดสัญญาณที่อาศัยวงจรคู่ผลต่างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิสเตอร์ทั้งสอง เมื่อป้อนแรงดันอินพุต V_i เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีขนาดเหมาะสมให้กับวงจรและปรับตัวต้านทาน R ให้มีค่าเหมาะสมแล้วจะทำให้ได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณรูปไซน์ โดยในที่นี้เอาต์พุตอาจเป็นแรงดัน V_o ที่ตกคร่อมระหว่างขาคอลเลคเตอร์ของ Q_1 และ Q_2 หรืออาจเป็นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R ก็ได้ถ้าหากว่าอัตราขยายกระแสอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter current gain) β ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีค่ามากกว่าหนึ่งมากๆ ต่อมาในปี ค.ศ.1976 Meyer และคณะ [9] ได้ทำการตรวจสอบฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรในรูปที่ 2.4 โดยอาศัยคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่ว่า

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} \tag{2.4}$$

โดยที่ I_C เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ (collector current) I_S เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (saturation current) V_{BE} เป็นแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเบส (base) และขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์และ V_T เป็นแรงดันเนื่องจากอุณหภูมิ จากวงจรในรูปที่ 2.4 เมื่ออาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law : KVL) จะได้

$$V_i = V_{BE1} + i_o R - V_{BE2} \tag{2.5}$$

แต่จากสมการ (2.4) จะได้ $V_{BE1} = V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_S}$, $V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_S}$ แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (2.5) แล้วจัดสมการใหม่ จะได้ว่า

$$V_i = i_o R + V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \tag{2.6}$$

ถ้าหากว่า $\beta >> 1$ จะได้ $I_{C1} = I + i_o$, $I_{C2} = I - i_o$ แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (2.6) แล้วจัดสมการใหม่ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_i และ i_o เป็น

$$\frac{V_i}{V_T} = (\frac{IR}{V_T})\frac{i_o}{I} + \ln \frac{1+\frac{i_o}{I}}{1-\frac{i_o}{I}} \tag{2.7}$$

เมื่อเทอมลอการิทึมในสมการ (2.7) สามารถกระจายอนุกรมกำลังเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln\frac{1+\frac{i_o}{I}}{1-\frac{i_o}{I}} \approx 2\frac{i_o}{I}+\frac{2}{3}(\frac{i_o}{I})^3+\frac{2}{5}(\frac{i_o}{I})^5 \tag{2.8}$$

โดยที่ $\frac{i_o}{I} < 1$ เมื่อแทนสมการ (2.8) ลงในสมการ (2.7) แล้วจัดสมการใหม่ จะได้

$$\frac{1}{V_T(\frac{IR}{V_T}+2)}V_i \approx \frac{i_o}{I}+\frac{2}{3}\frac{1}{\frac{IR}{V_T}+2}(\frac{i_o}{I})^3+\frac{2}{5}\frac{1}{\frac{IR}{V_T}+2}(\frac{i_o}{I})^5 \tag{2.9}$$

เมื่ออาศัยแนวความคิดจากรูปที่ 2.1 ทำให้ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนที่ต้องการสำหรับวงจรในรูปที่ 2.4 เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$i_o = K_1 \sin(K_2 V_i) \tag{2.10}$$

โดยที่ K_1 และ K_2 เป็นค่าคงที่ จากสมการ (2.10) จัดสมการใหม่ได้เป็น

$$K_2 V_i = \sin^{-1}(\frac{i_o}{K_1}) \tag{2.11}$$

จากสมการ (2.11) เมื่อทำการกระจายอนุกรมกำลัง จะได้ว่า

$$K_2 V_i \approx \frac{i_o}{K_1}+\frac{1}{6}(\frac{i_o}{K_1})^3+\frac{3}{40}(\frac{i_o}{K_1})^5 \tag{2.12}$$

ในการทำให้วงจรคู่ผลต่างในรูปที่ 2.4 เป็นวงจรบีบกดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปไซน์นั้น สมการ (2.9) และสมการ (2.12) ต้องมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจะได้ว่า

$$K_1 = I$$
$$K_2 = \frac{1}{V_T(\frac{IR}{V_T}+2)} \tag{2.13}$$

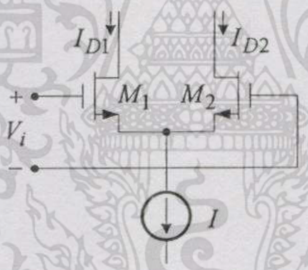
จากสมการ (2.13) จะเห็นว่า ค่ายอดของ i_o มีค่าเท่ากับ กระแสไบอัส I และถ้าหากแรงดันอินพุต V_i มีค่ายอด V_M แล้วสมการ (2.10) จะเป็นสัญญาณรูปไซน์ก็ต่อเมื่อ $K_2 V_M = \frac{\pi}{2}$ ดังนั้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_M}{V_T} = 1.57\frac{IR}{V_T} + 3.14 \tag{2.14}$$

ซึ่งสมการ (2.14) นี้แสดงให้เห็นค่าขนาดของแรงดันอินพุตที่ถูกนอร์มาไลซ์ (normalized) ด้วย V_T ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสเอาต์พุตที่มีค่า THD ต่ำที่สุดโดยการปรับเทอม $\frac{IR}{V_T}$ ถึงแม้ว่า วงจรบีบกดสัญญาณแบบลอการิทึมดังแสดงในรูปที่ 2.5 นี้จะมีจุดเด่นคือ มีโครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อน แต่จะมีข้อด้อยที่สำคัญคือ ค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์จะถูกจำกัดให้ต่ำสุดเพียง 0.2% เท่านั้นที่ $\frac{IR}{V_T} = 2.5$ นอกจากนี้ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรยังขึ้นกับอุณหภูมิอีกด้วย ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันยังคงมีการใช้งานวงจรบีบกดสัญญาณแบบนี้กันอยู่ ดังเช่นพบในโครงสร้างภายในของไอซีกำเนิดสัญญาณเบอร์ XR2206 ซึ่งให้สัญญาณรูปไซน์มีค่า THD ต่ำสุดเพียง 0.6% เท่านั้น [3]-[4]

สำหรับวงจรคู่ผลต่างแบบมอส (MOS differential pair) นั้น พบว่า มีการนำมาใช้ทำหน้าที่เป็นวงจรบีบกดสัญญาณเช่นเดียวกัน โดยในปี ค.ศ.1985 Futtaruso และคณะ [10] นำเสนอวงจรบีบกดสัญญาณที่ใช้วงจรคู่ผลต่างแบบ NMOS ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยอาศัยคุณสมบัติของ



รูปที่ 2.5 วงจรคู่ผลต่างแบบ NMOS

ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่ทำงานในบริเวณอิ่มตัว (saturation region) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน I_D (drain current) และแรงดันระหว่างขาเกต (gate terminal) และขาซอร์ส (source terminal) V_{GS} เป็น

$$I_D = \begin{cases} 0 & V_{GS} \le V_{TH} \\ k(V_{GS} - V_{TH})^2 & V_{GS} > V_{TH} \end{cases} \tag{2.15}$$

โดยที่ V_{TH} = แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold voltage)

$k = \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}$

μ_n = ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแชนเนล (electron channel mobility)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_{ox} = ค่าความจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของออกไซด์ (oxide capacitance per unit area)

W = ความกว้างของแชนเนล (effective channel width)

L = ความยาวของแชนเนล (effective channel length)

จากวงจรคู่ผลต่างในรูปที่ 2.5 เมื่อกำหนดให้ M_1 และ M_2 มีความแมตช์กันและ $I_o = I_{D1} - I_{D2}$ แล้วจะได้ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรนี้ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุต I_o และแรงดันอินพุต V_i เป็น

$$I_o = I\sqrt{2-(\frac{V_i}{V_{SW}})^2}\,\frac{V_i}{V_{SW}} \qquad -V_{SW} < V_i < V_{SW} \tag{2.16}$$

โดยที่ $V_{SW} = \sqrt{\frac{I}{k}}$ จากสมการ (2.16) เมื่อทำการกระจายอนุกรมกำลัง จะได้

$$I_o \approx \frac{\sqrt{2}}{V_{SW}} IV_i - \frac{\sqrt{2}}{4V_{SW}^3} IV_i^3 - \frac{\sqrt{2}}{32V_{SW}^5} IV_i^5 \tag{2.17}$$

ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนที่ต้องการสำหรับวงจรในรูปที่ 2.5 คือ

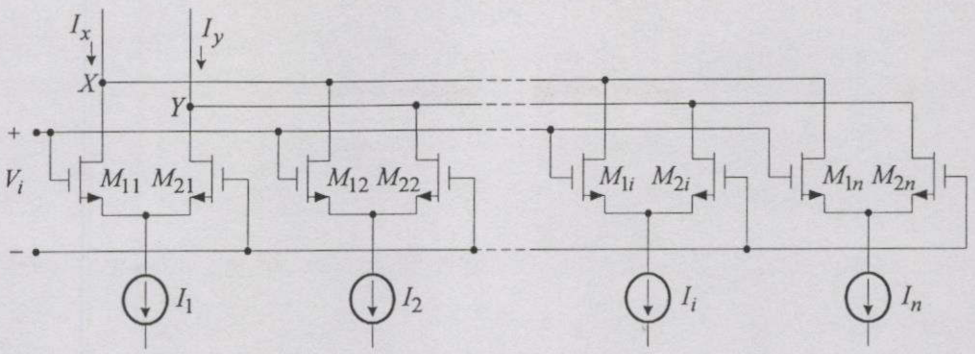
$$I_o = I_P \sin(\frac{\pi}{2}\frac{V_i}{V_P}) \tag{2.18}$$

โดยที่ I_P และ V_p เป็นค่าคงที่ซึ่งแทนค่ายอดของ I_o และ V_i ตามลำดับ จากสมการ (2.18) เมื่อทำการกระจายอนุกรมกำลัง จะได้

$$I_o \approx \frac{\pi}{2V_P} I_P V_i - \frac{1}{6}(\frac{\pi}{2V_P})^3 I_P V_i^3 - \frac{1}{120}(\frac{\pi}{2V_P})^5 I_P V_i^5 \tag{2.19}$$

นั่นคือ ถ้าหากต้องการให้วงจรดังในรูปที่ 2.5 ทำหน้าที่เป็นวงจรบีบกดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปไซน์ ดังนั้น สมการ (2.17) และสมการ (2.19) ต้องสอดคล้องกัน ซึ่งจะเห็นว่า $I_P = I$ และเมื่อทำการปรับค่า V_{SW} ให้เหมาะสมแล้ว พบว่า สัญญาณรูปไซน์มีค่า THD ต่ำสุดเพียง 0.88% เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าหากต้องการลดค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ ก็สามารถทำได้โดยการนำวงจรคู่ผลต่างแบบ MOS มาต่อร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยวงจรคู่ผลต่างลำดับที่ i จะมีกระแสเดรนของ M_{1i} ต่อเข้าที่จุด X และกระแสเดรนของ M_{2i} ต่อเข้าที่จุด Y โดยที่ $i = 1, 2, ..., n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

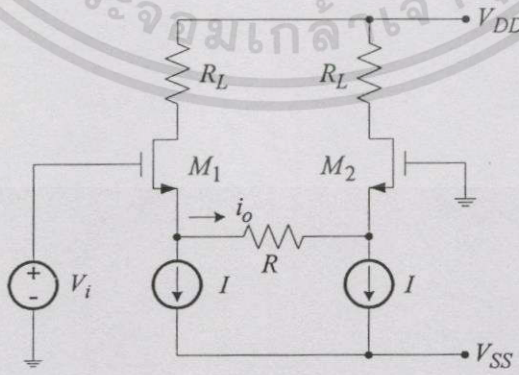


รูปที่ 2.6 วงจรคู่ผลต่างแบบ MOS n ชุด

กำหนดให้ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ในแต่ละวงจรคู่ผลต่างมีความแมตช์กันและมีกระแสเอาต์พุต ดังสมการ (2.20) คือ

$$I_{out} = I_x - I_y = \sum_{i=1}^{n} I_{oi} \tag{2.20}$$

โดยที่ I_{oi} เป็นไปตามสมการ (2.16) สำหรับวงจรคู่ผลต่างลำดับที่ i ถ้าหากต้องการให้กลุ่มวงจรคู่ผลต่างดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทำหน้าที่เป็นวงจรบีบกดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปไซน์ ดังนั้น สมการ (2.20) และสมการ (2.18) ต้องมีความสอดคล้องกัน ซึ่งเกิดขึ้นได้โดยการปรับสัมประสิทธิ์ของ I_{oi} สำหรับวงจรคู่ผลต่างลำดับที่ i พบว่า ถ้าหากต้องการสัญญาณรูปไซน์ที่มีค่า THD ต่ำเพียงใดก็ต้องใช้วงจรคู่ผลต่างจำนวนมากขึ้นตามด้วย ซึ่งนับเป็นข้อด้อยที่สำคัญของวงจรบีบกดสัญญาณแบบนี้ เพื่อลดข้อด้อยดังกล่าวนี้ ต่อมาในปี ค.ศ.1990 Tang และคณะ[11] ได้นำเสนอวงจรบีบกดสัญญาณที่ใช้วงจรคู่ผลต่างแบบ MOS อีกรูปแบบหนึ่งดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 โดย



รูปที่ 2.7 วงจรบีบกดสัญญาณที่อาศัยวงจรคู่ผลต่างแบบ MOS

กำหนดให้ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ทำงานในบริเวณจุดเริ่มเปลี่ยนย่อย (subthreshold region) ซึ่งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลจากขาเดรนไปขาซอร์ส I_{DS} และแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเกตและขาซอร์ส V_{GS} เป็น[12]

$$I_{DS} = I_{DSO} e^{V_{GS}/nV_T} \tag{2.21}$$

โดยที่ค่าองค์ประกอบความชัน n และกระแสคุณลักษณะ I_{DSO} เป็นค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับ V_{GS} และแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส V_{DS} เมื่อกำหนดให้ M_1 และ M_2 มีความแมตช์กัน จากรูปที่ 2.7 เมื่ออาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้

$$V_i = V_{GS1} + i_o R - V_{GS2} \tag{2.22}$$

เมื่ออาศัยความสัมพันธ์ในสมการ (2.21) จากสมการ (2.22) จะได้ฟังก์ชันคุณลักษณะการถ่ายโอนของวงจรนี้เป็น

$$\frac{V_i}{nV_T} = \frac{IR}{nV_T}\frac{i_o}{I} + \ln\frac{1+\frac{i_o}{I}}{1-\frac{i_o}{I}} \tag{2.23}$$

จากสมการ(2.23) จะเห็นว่ามีรูปแบบเหมือนกันกับสมการ (2.7) นั่นแสดงว่า วิธีการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 2.7 ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับวงจรในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ยังมีข้อด้อยเช่นเดียวกันด้วย นั่นคือ กระแสเอาต์พุต i_o ที่เป็นสัญญาณรูปไซน์มีค่า THD ต่ำสุดเพียง 0.2% เท่านั้น

เพื่อลดข้อบกพร่องต่างๆของวงจรบีบกดสัญญาณดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงหลักการสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมแบบใหม่โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3 หลักการประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมแบบใหม่

เป็นที่ทราบกันดีในการวิเคราะห์สัญญาณว่า สัญญาณรูปไซน์นั้นสามารถประมาณได้ด้วยการนำส่วนโค้งพาราโบลาสองส่วนมาต่อกัน โดยส่วนโค้งพาราโบลานั้นสร้างขึ้นได้ด้วยการยกกำลังสองของสัญญาณที่มีค่าเป็นเชิงเส้นตามเวลาในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นจะพบว่า สัญญาณรูปสามเหลี่ยมนั้นสามารถใช้เป็นสัญญาณเชิงเส้นดังกล่าวนั้นได้อย่างดี เมื่อนำสัญญาณนี้ไปยกกำลังสองและนำมาจัดการเรียงต่อกันอย่างเหมาะสมแล้วก็จะได้สัญญาณที่คล้ายสัญญาณรูปไซน์เกิดขึ้น [13] ซึ่งค่าความเพี้ยนหรือค่า THD ของสัญญาณที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชันของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ใช้ การปรับค่าความชันนี้ให้เหมาะสม จะทำให้สามารถลดค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุดได้

ถ้าหากมีสัญญาณรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) เมื่อนำมายกกำลังสองจะได้สัญญาณรูปพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) จะเห็นได้ว่า สัญญาณนี้คล้ายกับสัญญาณรูปไซน์ที่ถูกเรียงกระแสซึ่งได้ยกระดับให้ลอยสูงอยู่ ดังนั้น ถ้าหากทำการแคลมป์ระดับสัญญาณลงมาให้ค่ายอดอยู่ที่ระดับศูนย์ ก็จะได้สัญญาณที่คล้ายกับสัญญาณรูปไซน์ที่ถูกเรียงกระแสด้านลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ค) และเมื่อทำการพลิกสัญญาณแบบสลับกันคาบต่อคาบ จะได้สัญญาณที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณรูปไซน์ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ง)

เมื่อสัญญาณในรูปที่ 2.8 (ก) แทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เป็น

$$f_1(t) = \begin{cases} at & -\frac{T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ -a(t-\frac{T}{2}) & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \quad (2.24)$$

โดยที่ a เป็นค่าคงที่ซึ่งแสดงความลาดชัน (slope) และ T เป็นค่าคาบเวลาของสัญญาณ $f_1(t)$ ส่วนสัญญาณ $f_4(t)$ ตามรูปที่ 2.8 (ง) นั้นจะเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้คือ

$$f_4(t) = \begin{cases} \left(\frac{aT}{4}\right)^2 \left[1-\left(\frac{4}{T}\right)^2 t^2\right] & -\frac{T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ \left(\frac{aT}{4}\right)^2 \left[-1+\left(\frac{4}{T}\right)^2 \left(t-\frac{T}{2}\right)^2\right] & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \quad (2.25)$$

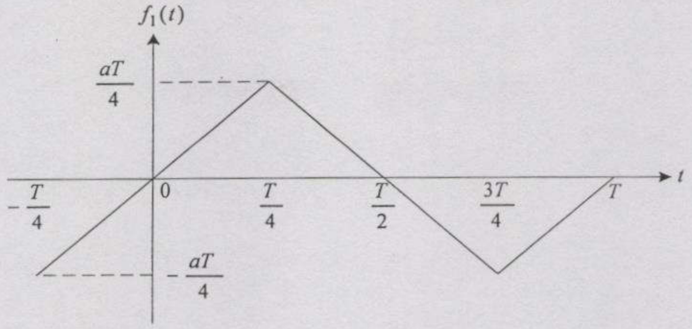
ซึ่งสัญญาณ $f_4(t)$ ตามสมการ (2.25) จะประมาณเท่ากับสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาด $(\frac{aT}{4})^2$ และมีความถี่เท่ากับ $\frac{1}{T}$ Hz ดังสมการ (2.26) นั่นคือ

$$f_5(t) \approx (\frac{aT}{4})^2 \cos(\frac{2\pi}{T}t) \quad (2.26)$$

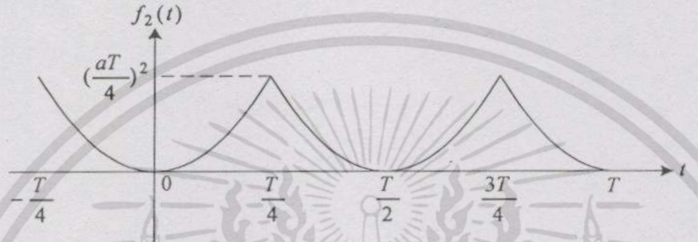
สำหรับการหาค่า THD ของ $f_4(t)$ ตามสมการ (2.25) นั้นสามารถคำนวณหาได้ [13] ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก โดยจะได้ค่า THD เท่ากับ 0.145% ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นค่าที่ต่ำแสดงว่าสัญญาณที่ประมาณขึ้นด้วยวิธีการนี้เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนน้อยมาก

จากแนวความคิดนี้สามารถนำไปสร้างวงจรประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมได้โดยอาศัยเพียงวงจรคูณสัญญาณ วงจรแคลมป์สัญญาณและวงจรขยายที่สามารถสลับอัตราขยายระหว่าง +1 และ -1ได้ ทำงานร่วมกันเท่านั้น ดังรายละเอียดในบทที่ 4 ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

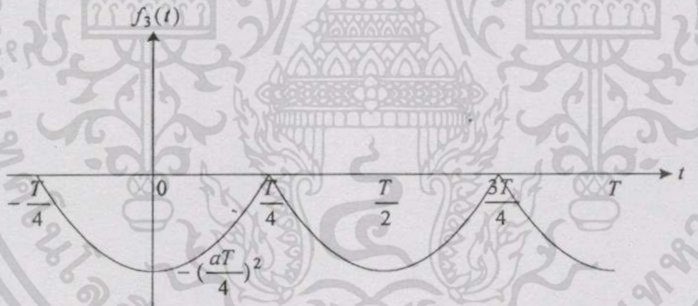
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



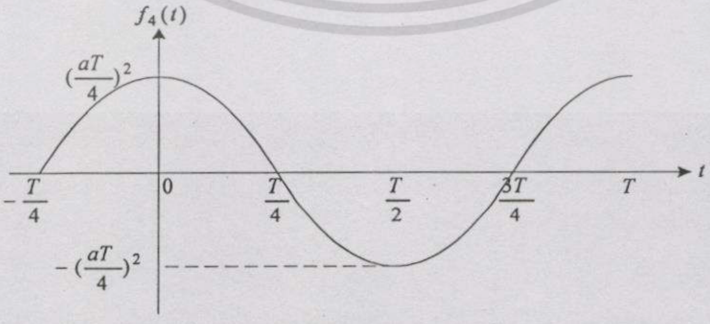
รูปที่ 2.8 (ก) สัญญาณรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 2.8 (ข) สัญญาณที่เกิดจากการยกกำลังสองของ $f_1(t)$



รูปที่ 2.8 (ค) สัญญาณที่เกิดจากการแคลมป์ระดับลงมาของ $f_2(t)$



รูปที่ 2.8 (ง) สัญญาณที่เกิดจากการสลับกลับทิศทุกช่วงเวลา $\frac{T}{2}$ ของ $f_3(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วงจรพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงกลุ่มวงจรพื้นฐานที่จะนำไปใช้ในการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณซึ่งอาศัยหลักการเบื้องต้นดังที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 2 โดยวงจรสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมอาศัยการทำงานร่วมกันของวงจรคูณสัญญาณ วงจรแคลมป์สัญญาณ (clamper) และวงจรขยายที่สามารถสลับค่าอัตราขยายระหว่าง +1 และ –1 ได้ ส่วนสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมนั้นสร้างได้ไม่ยากนักจากวงจรอินทิเกรเตอร์ (integrator) และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (voltage comparator) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2 วงจรคูณสัญญาณ (multiplier)

วงจรคูณสัญญาณเป็นวงจรที่ให้แรงดันเอาต์พุต V_o เป็นสัดส่วนกับผลคูณทางพีชคณิตของแรงดันอินพุต V_x และ V_y ซึ่งแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$V_o = KV_xV_y \tag{3.1}$$

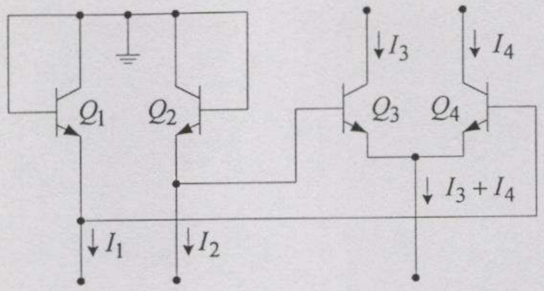
โดยที่ K เป็นค่าคงที่ซึ่งแทนค่าองค์ประกอบมาตราส่วน (scale factor) โดยมีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวงจรคูณสัญญาณ

สำหรับการทำวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้วงจรคูณสัญญาณในรูปของไอซี เนื่องจากสะดวกในการใช้งานและลดความซับซ้อนของวงจรที่จะได้ทำการออกแบบ โดยเลือกใช้ไอซีเบอร์ MC1494 ซึ่งเป็นวงจรคูณสัญญาณแบบสี่ควอแดรนท์ (four quadrant multiplier) ที่ทำงานด้วยหลักการแปรค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (transconductance) ของวงจรคู่ผลต่างซึ่งจะกล่าวถึงพอเป็นสังเขป [3] คือ

วงจรพื้นฐานที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของวงจรคูณสัญญาณแบบสี่ควอแดรนท์ ก็คือวงจรที่ทำให้ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์มีความเป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยวงจรคู่ผลต่างที่ประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ Q_3 และ Q_4 ทำให้เกิดการแปรค่าทรานส์คอนดักแตนซ์และคู่ไดโอด Q_1 และ Q_2 ซึ่งทำหน้าที่ป้อนกระแสที่เหมาะสมไปขับวงจรคู่ผลต่าง

ในการวิเคราะห์วงจร เมื่ออาศัยคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่ $V_{BE} = V_T \ln\frac{I_C}{I_S}$ โดยที่ V_{BE} เป็นแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเบสและขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ V_T เป็นแรงดันเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานของวงจรคูณสัญญาณแบบสี่ควอแดรนท์

จากอุณหภูมิ I_C เป็นกระแสคอลเลคเตอร์และ I_S เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ สมมุติว่า ทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีความแมตช์กันและละเลยค่ากระแสเบส (base current) ของทรานซิสเตอร์ เมื่ออาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้ว่า

$$V_{BE3} - V_{BE4} = V_{BE1} - V_{BE2}$$
$$V_T \ln\frac{I_3}{I_4} = V_T \ln\frac{I_1}{I_2}$$
$$\frac{I_3}{I_4} = \frac{I_1}{I_2} \tag{3.2}$$

จากสมการ (3.2) สามารถจัดรูปสมการใหม่เป็น

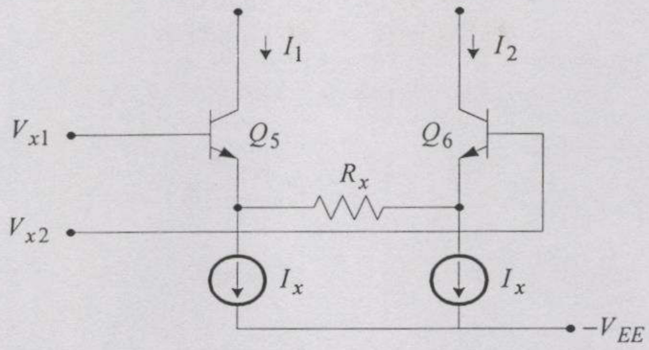
$$\frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$
$$I_3 - I_4 = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}(I_3 + I_4) \tag{3.3}$$

เนื่องจากอินพุตของวงจรคูณสัญญาณอยู่ในรูปของแรงดัน จากสมการ (3.3) เพื่อทำให้เกิดการใช้งานในทางปฏิบัติ ต้องเพิ่มวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (voltage to current converter) 2 ชุด เพื่อสังเคราะห์เทอม $(I_1 - I_2)$ และ $(I_3 + I_4)$ จากแรงดันอินพุต V_x และ V_y ตามลำดับ โดยพิจารณาจากวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะได้ $I_1 = I_x + I_{R_x}$ และ $I_2 = I_x - I_{R_x}$ ดังนั้น $I_1 - I_2 = 2I_{R_x}$ เมื่อ $I_{R_x} = (V_{E5} - V_{E6})/R_x$ แต่ $V_{E5} - V_{E6} = (V_{x1} - V_{x2}) - (V_{BE5} - V_{BE6})$ ดังนั้น $V_{E5} - V_{E6} = (V_{x1} - V_{x2}) - V_T \ln\frac{I_1}{I_2}$ เมื่อนำไปแทนในสมการ (3.3) จะได้

$$I_1 - I_2 = \frac{2}{R_x}(V_{x1} - V_{x2}) - \frac{2V_T}{R_x}\ln\frac{I_1}{I_2} \tag{3.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

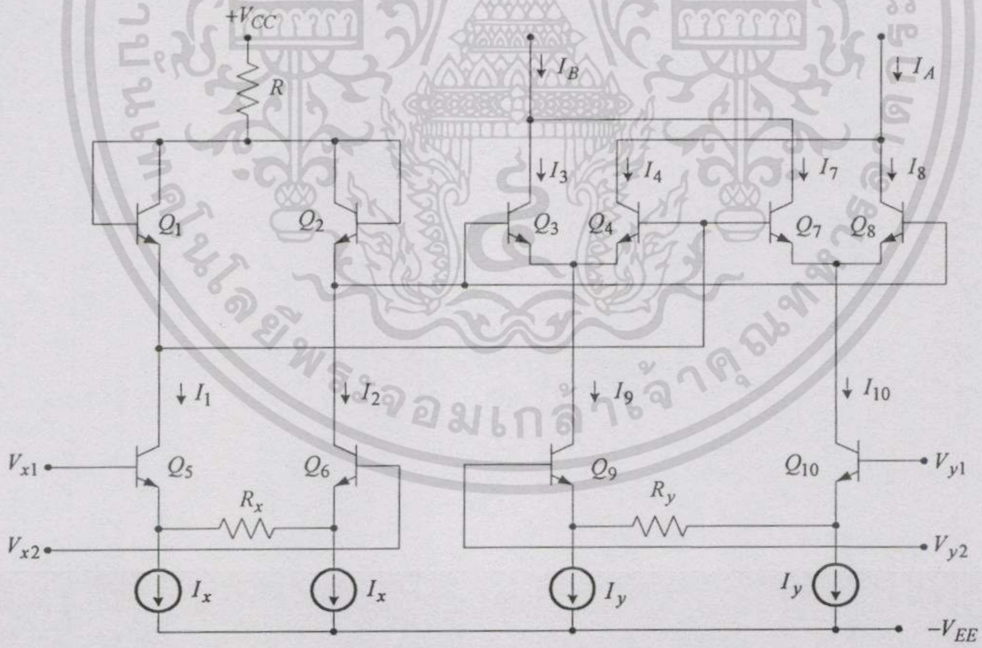


รูปที่ 3.2 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

ในการออกแบบวงจรคูณสัญญาณ เทอมลอการิทึมในสมการ (3.4) มีค่าน้อยมากจึงละเลย ดังนั้น

$$I_1 - I_2 = \frac{2}{R_x}(V_{x1} - V_{x2}) \tag{3.5}$$

จากสมการ (3.5) จึงสามารถนำวงจรดังในรูปที่ 3.2 มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรในรูปที่ 3.1 ให้ผลลัพธ์เป็นวงจรคูณสัญญาณสี่ควอแดรนท์แบบแปรค่าทรานส์คอนดักแตนซ์พื้นฐานดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรคูณสัญญาณสี่ควอแดรนท์แบบแปรค่าทรานส์คอนดักแตนซ์

ซึ่งมี $I_1 + I_2 = 2I_x$ และ $I_3 + I_4 = I_9$ เมื่อแทนค่าเหล่านี้พร้อมกับสมการ (3.5) ลงในสมการ (3.3) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_3 - I_4 = \frac{V_{x1} - V_{x2}}{R_x I_x} I_9 \tag{3.6}$$

ในทำนองเดียวกัน $I_7 + I_8 = I_{10}$ ก็จะได้

$$I_8 - I_7 = \frac{V_{x1} - V_{x2}}{R_x I_x} I_{10} \tag{3.7}$$

และที่แรงดันอินพุต V_y ก็จะได้ $I_{10} - I_9 = \frac{2}{R_y}(V_{y1} - V_{y2})$ ดังนั้น ถ้าหากนำสมการ (3.7) ลบด้วยสมการ (3.6) จะได้

$$\begin{aligned}(I_8 - I_7) - (I_3 - I_4) &= \frac{V_{x1} - V_{x2}}{R_x I_x}(I_{10} - I_9) \\ &= \frac{2}{R_x R_y I_x}(V_{x1} - V_{x2})(V_{y1} - V_{y2})\end{aligned} \tag{3.8}$$

แต่ $I_A - I_B = (I_8 + I_4) - (I_3 + I_7)$ ดังนั้นจากสมการ (3.8) จะได้ว่า

$$I_A - I_B = \frac{2}{R_x R_y I_x}(V_{x1} - V_{x2})(V_{y1} - V_{y2}) \tag{3.9}$$

เมื่อกำหนดให้ กระแสเอาต์พุต $I_o = I_A - I_B$, $V_x = V_{x1} - V_{x2}$ และ $V_y = V_{y1} - V_{y2}$ จากสมการ (3.9) จะได้

$$I_o = \frac{2}{R_x R_y I_x} V_x V_y \tag{3.10}$$

นั่นคือ เมื่อมีการต่อตัวต้านทานภาระ R_L ที่เอาต์พุต จะได้

$$V_o = I_o R_L = \frac{2R_L}{R_x R_y I_x} V_x V_y \tag{3.11}$$

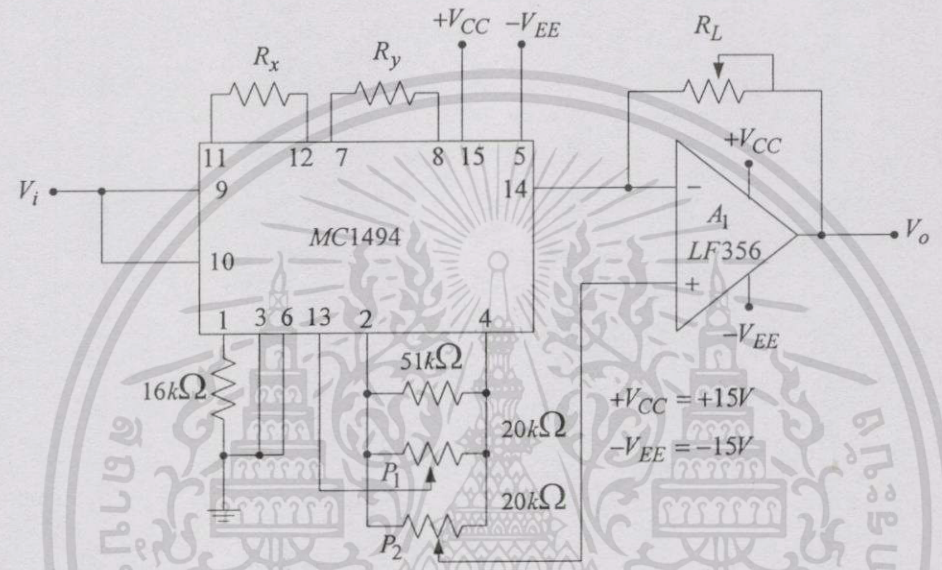
เมื่อเปรียบเทียบสมการ (3.11) กับสมการ (3.1) แล้วจะได้

$$K = \frac{2R_L}{R_x R_y I_x} \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติ วงจรคูณสัญญาณจะให้เอาต์พุตที่มีความคาดเคลื่อนจากสมการ (3.10) บ้าง เนื่องจากค่าแรงดันออฟเซต (offset voltage) และความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ของวงจรคูณสัญญาณเอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้สามารถปรับลดได้โดยการต่ออุปกรณ์ภายนอกร่วมกับวงจรคูณสัญญาณ ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้นำวงจรคูณสัญญาณมาสร้างเป็นวงจรยกกำลังสอง (squaring circuit) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยออปแอมป์ (opamp : operational amplifier) A_1 ต่อร่วมกับ R_L



รูปที่ 3.4 วงจรยกกำลังสอง

ทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน จึงทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็น

$$V_o = -\frac{2R_L}{R_x R_y I_x} V_i^2 \tag{3.13}$$

เมื่อสมมุติว่าวงจรไม่มีค่าความคาดเคลื่อน สำหรับตัวต้านทานปรับค่าได้ P_1 และ P_2 ทำหน้าที่ปรับลดค่าแรงดันออฟเซตที่อินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ ซึ่งมีขั้นตอนในการปฏิบัติดังนี้ คือ

<u>ขั้นตอนทางด้านกระแสไฟตรง</u>

1. ต่อขาอินพุตของวงจรลงกราวนด์ แล้วปรับ P_2 จนแรงดันเอาต์พุตมีค่าศูนย์โวลต์
2. ป้อนแรงดันอินพุตเป็น $1V_{DC}$ แล้วปรับ P_1 จนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ
3. ป้อนแรงดันอินพุตเป็น $10V_{DC}$ แล้วปรับ R_L จนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ
4. ป้อนแรงดันอินพุตเป็น $-10V_{DC}$ แล้วตรวจสอบความถูกต้องของแรงดันเอาต์พุต
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 อีกครั้งตามความจำเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ขั้นตอนทางด้านกระแสไฟกระแสสลับ</u>

1. ป้อนแรงดันอินพุตเป็นสัญญาณรูปไซน์ขนาด $15 V_{p-p}$ ความถี่ $1\,kHz$ ให้กับวงจร แล้วปรับค่า R_L จนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ

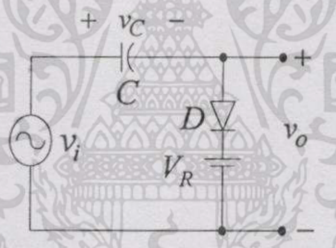
2. ปรับค่า P_1 จนกระทั่งแรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำสุด

3. ต่อขาอินพุตของวงจรลงกราวนด์แล้วปรับ P_2 จนแรงดันเอาต์พุตมีค่าศูนย์โวลต์

4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 อีกครั้งตามความจำเป็น

3.3 วงจรแคลมป์สัญญาณ (clamper) [14]

ในการประมวลสัญญาณแบบมีคาบเวลา บ่อยครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนแปลงระดับไฟตรงที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณนั้นซึ่งส่งผลทำให้ค่ายอดของสัญญาณดังกล่าวเลื่อนไปยังระดับอ้างอิงที่ต้องการได้ โดยวงจรที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ลักษณะนี้จะเรียกว่า วงจรแคลมป์สัญญาณ โดยวงจรแคลมป์สัญญาณอย่างง่ายมักประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ไดโอดและแหล่งจ่ายไฟอ้างอิง V_R ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นวงจรในสภาวะที่ไม่มีภาระ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน



รูปที่ 3.5 วงจรแคลมป์สัญญาณอย่างง่าย

เอาต์พุต v_o และแรงดันอินพุต v_i สามารถเขียนแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

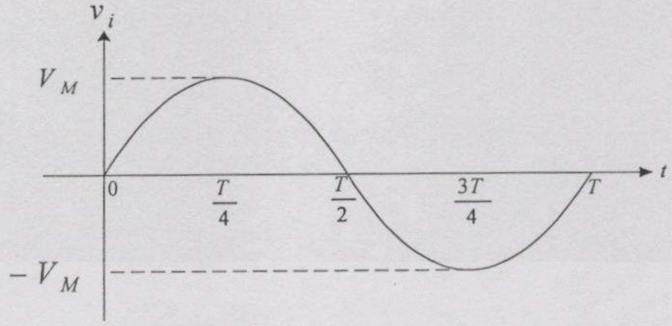
$$v_o = v_i - v_C \tag{3.14}$$

โดยที่ v_C เป็นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ สมมุติว่า ไดโอดมีความเป็นอุดมคติและไม่มีพลังงานสะสมภายในตัวเก็บประจุขณะที่วงจรเริ่มทำงาน เมื่อแรงดันอินพุต v_i เป็นสัญญารูปไซน์ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) เนื่องจากแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทันที นั่นคือ ขณะที่วงจรเริ่มทำงาน $v_C = 0$ โวลต์ ดังนั้นจากสมการ (3.14) จะได้ว่า

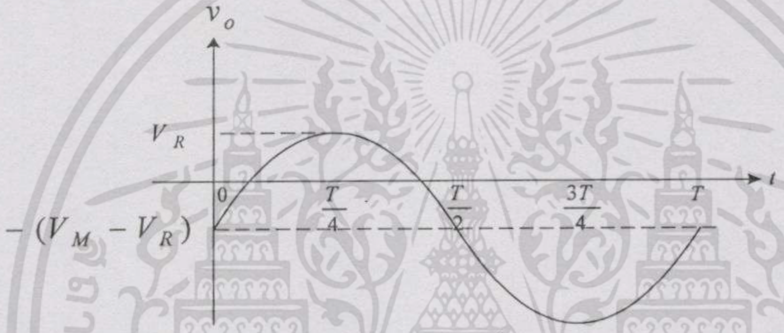
$$v_o = v_i \tag{3.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ v_i เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับและตัวเก็บประจุยังไม่ได้รับการอัดประจุ



รูปที่ 3.6 (ก) อินพุตของวงจรในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 (ข) เอาต์พุตในสภาวะคงตัวของวงจรในรูปที่ 3.5

จนกระทั่ง $v_i = V_R$ โวลต์ ไดโอดเริ่มได้รับไบอัสตรงและตัวเก็บประจุเริ่มได้รับการอัดประจุ จนกระทั่งถึงเวลา $t = \frac{T}{4}$ วินาที โดยที่ T คือค่าคาบเวลาของ v_i ตัวเก็บประจุจะได้รับการอัดประจุด้วยค่ายอด V_M ของ v_i ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็น

$$v_C = V_M - V_R \tag{3.16}$$

ดังนั้น ขณะเวลานี้ จากสมการ (3.14) จะได้

$$v_o = v_i - (V_M - V_R) \tag{3.17}$$

หลังจากเวลา $t = \frac{T}{4}$ วินาที การเปลี่ยนแปลงของ v_i จะทำให้ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับเสมอ เนื่องจาก v_o ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่า V_R จึงทำให้ตัวเก็บประจุไม่สามารถคายประจุได้ ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตเป็นไปตามสมการ (3.17) เสมอ ดังนั้น ในสภาวะคงตัว วงจรแคลมป์สัญญาณจะให้

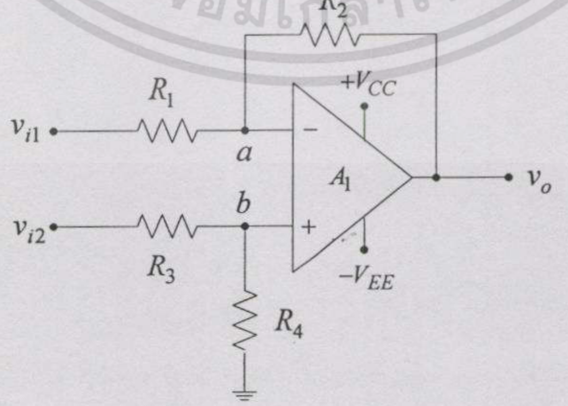
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาต์พุต v_o ที่เป็นการลอกเลียนแบบโดยปราศจากความผิดเพี้ยนทางด้านรูปร่างของอินพุต v_i ยกเว้นมีระดับไฟตรง $-(V_M - V_R)$ โวลต์เพิ่มขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข) ซึ่งจะเห็นว่า ค่ายอดด้านบวกของ v_i จะถูกเลื่อนระดับไปที่ V_R โวลต์ นอกจากนี้ ถ้าหากต้องการแคลมป์สัญญาณโดยให้ค่ายอดด้านลบของ v_i อยู่ที่ระดับ V_R โวลต์ จากวงจรในรูปที่ 3.5 ก็สามารถทำได้โดยการสลับขั้วของไดโอดเท่านั้นเอง

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ จากหลักการที่นำเสนอในบทที่ 2 จะทำการแคลมป์สัญญาณรูปพาราโบลาให้มีค่ายอดอยู่ที่ระดับศูนย์โวลต์ ดังนั้น จากวงจรแคลมป์สัญญาณในรูปที่ 3.5 กำหนดให้ V_R เท่ากับศูนย์โวลต์นั่นเอง ในทางปฏิบัติ แรงดันเอาต์พุตของวงจรแคลมป์สัญญาณอาจจะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจาก 2 สาเหตุ คือ สาเหตุแรก เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของไดโอด โดยขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง จะมีแรงดันตกคร่อมไดโอดเกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่ายอดของ v_o เกิดความคาดเคลื่อนได้ ความผิดพลาดดังกล่าวนี้สามารถลดได้โดยการปรับค่า V_R จนทำให้ได้ระดับค่ายอดของ v_o ตามต้องการ ส่วนสาเหตุที่สอง เมื่อมีการต่อภาระ R_L ให้กับวงจร จะทำให้ตัวเก็บประจุสามารถคายประจุได้ด้วยเวลาคงตัว (time constant) $\tau = CR_L$ วินาทีเมื่อค่าความต้านทานของไดโอดขณะได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่ามากกว่า R_L มากๆ ถ้าหาก R_L มีค่าน้อยจนทำให้ตัวเก็บประจุสามารถคายประจุได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้รูปร่างของ v_o เกิดความผิดเพี้ยนได้ ค่าความคาดเคลื่อนนี้สามารถลดได้โดยการต่อวงจรบัฟเฟอร์ (buffer) ที่เอาต์พุตของวงจรแคลมป์สัญญาณก่อนที่จะต่อ R_L เข้าไป

3.4 วงจรขยายผลต่าง (differential amplifier) [15]

วงจรขยายผลต่างเป็นวงจรที่ให้แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนกับผลต่างทางพีชคณิตของแรงดันอินพุต โดยทั่วไปมีวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต v_o และ



รูปที่ 3.7 วงจรขยายผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอินพุต v_{i1} และ v_{i2} โดยอาศัยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's current law : KCL) ซึ่งที่โนด (node) a จะได้ว่า

$$(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2})v_a-\frac{1}{R_1}v_{i1}-\frac{1}{R_2}v_o=0$$

$$v_a=\frac{R_2}{R_1+R_2}v_{i1}+\frac{R_1}{R_1+R_2}v_o \tag{3.18}$$

และที่โนด b จะได้ว่า

$$(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4})v_b-\frac{1}{R_4}v_{i2}=0$$

$$v_b=\frac{R_3}{R_3+R_4}v_{i2} \tag{3.19}$$

เมื่ออาศัยคุณสมบัติตามอุดมคติของออปแอมป์ จะได้ $v_a=v_b$ ดังนั้น เมื่ออาศัยสมการ (3.18) และสมการ(3.19) จะได้

$$\frac{R_2}{R_1+R_2}v_{i1}+\frac{R_1}{R_1+R_2}v_o=\frac{R_3}{R_3+R_4}v_{i2}$$

$$v_o=(\frac{R_1+R_2}{R_1})(\frac{R_3}{R_3+R_4})v_{i2}-\frac{R_2}{R_1}v_{i1} \tag{3.20}$$

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ เลือก R_1, R_2, R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น จากสมการ(3.20) จะได้ว่า

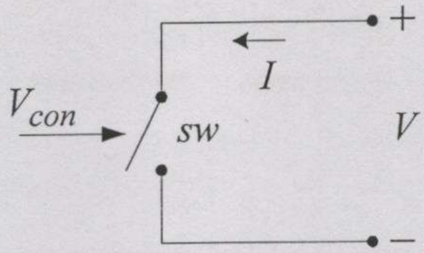
$$v_o=v_{i2}-v_{i1} \tag{3.21}$$

ซึ่งจากสมการ (3.21) จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตเป็นผลต่างระหว่างแรงดันอินพุต

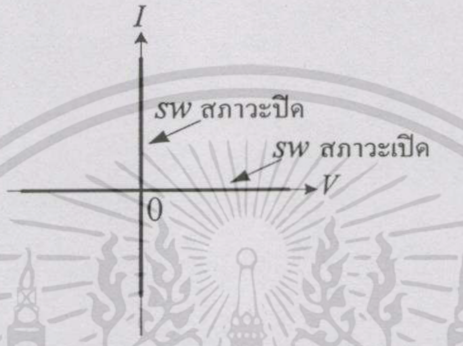
3.5 วงจรอนาลอกสวิตช์ (analog switch circuit) [3]

วงจรอนาลอกสวิตช์เป็นวงจรสวิตช์ที่สามารถควบคุมสภาวะปิด-เปิดได้ด้วยแรงดันควบคุม V_{con} ซึ่งสวิตช์แบบอุดมคติแสดงดังในรูปที่ 3.8 (ก) และมีคุณลักษณะทางแรงดันและกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ข) โดยเมื่อสวิตช์มีสภาวะปิด แรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่าศูนย์โวลต์เสมอไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 (ก) วงจรอนาลอกสวิตช์ในอุดมคติ

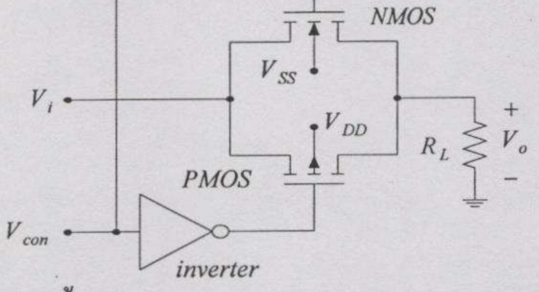


รูปที่ 3.8 (ข) คุณลักษณะทางแรงดันและกระแสของวงจรอนาลอกสวิตช์ในรูปที่ 3.8 (ก)

ว่ากระแสจะมีค่าเท่าใดก็ตาม ทำให้สวิตช์ไม่มีค่าความต้านทานและเมื่อสวิตช์มีสภาวะเปิด จะไม่มีกระแสไหลผ่านสวิตช์ไม่ว่าแรงดันจะเป็นเท่าใดก็ตาม ทำให้สวิตช์มีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ คุณลักษณะดังกล่าวนี้ของสวิตช์สามารถประมาณได้ด้วยอุปกรณ์ที่มีอัตราส่วนความต้านทานในสภาวะเปิด/ปิดที่มีค่ามากเป็นต้นว่า อุปกรณ์จำพวก MOS

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้มีการใช้วงจรอนาลอกสวิตช์เป็นส่วนหนึ่งในวงจรขยายแบบสลับค่าอัตราขยายได้ เพื่อก่อให้เกิดความสะดวกในการออกแบบวงจรขยายดังกล่าวนี้ จึงเลือกใช้วงจรอนาลอกสวิตช์ในรูปของไอซี โดยใช้ไอซีเบอร์ MC14016 และเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการใช้งาน จะขอกล่าวถึงหลักการทำงานของไอซีเบอร์ MC14016 พอสังเขป คือ

วงจรอนาลอกสวิตช์พื้นฐานภายในไอซีเบอร์ MC14016 แสดงดังในรูปที่ 3.9 ซึ่งมีส่วน



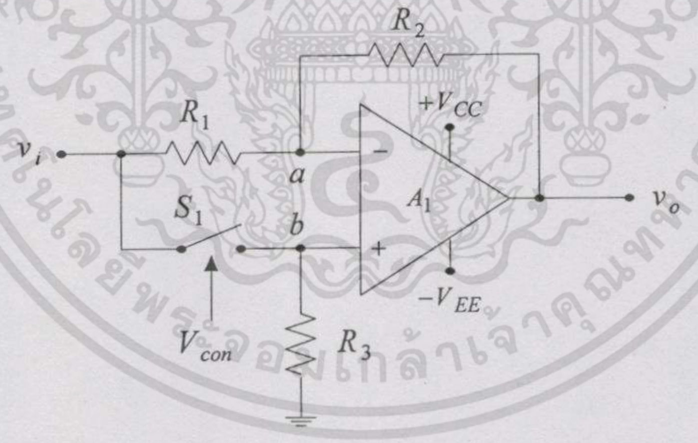
รูปที่ 3.9 วงจรอนาลอกสวิตช์พื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบที่สำคัญ คือ มีทรานซิสเตอร์แบบ NMOS (N channel metal oxide semiconductor) และ PMOS (P channel metal oxide semiconductor) ต่อขนานกัน เมื่ออาศัยคุณสมบัติของ NMOS ซึ่งนำกระแสเมื่อ V_{GS} ต้องมีค่ามากกว่าแรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนค่าบวก (positive threshold voltage) และคุณสมบัติของ PMOS ซึ่งนำกระแสเมื่อ V_{GS} ต้องมีค่าน้อยกว่าแรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนค่าลบ (negative threshold voltage) การทำงานของวงจรในรูปที่ 3.9 อธิบายได้ว่า เมื่อ V_{con} มีค่าใกล้เคียงกับ V_{DD} จะทำให้ NMOS และ PMOS นำกระแส ส่งผลให้วงจรอนาลอกสวิตช์มีสภาวะปิด จะได้ $V_o = V_i$ โวลต์และเมื่อ V_{con} มีค่าใกล้เคียงกับ V_{SS} จะทำให้ MOS และ PMOS ไม่นำกระแส มีผลให้วงจรอนาลอกสวิตช์มีสภาวะเปิด จึงทำให้ได้ $V_o = 0$ โวลต์ ในทางปฏิบัติ วงจรอนาลอกสวิตช์จะมีค่าความต้านทานภายในเล็กน้อยในสภาวะปิดและมีกระแสรั่วไหลน้อยมากในสภาวะเปิด จึงอาจเกิดมีค่าความผิดพลาดที่แรงดันเอาต์พุตได้

3.6 วงจรขยายแรงดันแบบสลับค่าอัตราขยายได้ (switching voltage amplifier)

วงจรขยายแรงดันแบบสลับค่าอัตราขยายได้เป็นวงจรขยายที่สามารถปรับค่าอัตราขยายได้ระหว่างค่าบวกและค่าลบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของสวิตช์ ซึ่งวงจรขยายลักษณะนี้มีวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.10 เมื่อกำหนดให้ V_{con} เป็นแรงดันที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์และถ้า



รูปที่ 3.10 วงจรขยายแรงดันแบบสลับค่าอัตราขยายได้

หากสมมุติว่าสวิตช์มีความเป็นอุดมคติ สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต v_i และแรงดันเอาต์พุต v_o ได้ดังนี้ คือ

กรณีสวิตช์ S_1 มีสภาวะเปิด เมื่ออาศัยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ที่โนด a จะได้

$$(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2})v_a - \frac{1}{R_1}v_i - \frac{1}{R_2}v_o = 0 \tag{3.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากออปแอมป์มีคุณสมบัติตามอุดมคติ พบว่า $v_a = v_b = 0$ โวลต์ ดังนั้นจากสมการ (3.22) จะได้ว่า

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_i \tag{3.23}$$

จากสมการ (3.23) แสดงว่า เมื่อสวิตช์ S_1 มีสภาวะเปิด วงจรขยายแรงดันแบบสลับค่าอัตราขยายได้จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟส (inverting amplifier) ที่มีอัตราขยายแรงดันเป็น $\frac{R_2}{R_1}$ เท่า

ในกรณีสวิตช์ S_1 มีสภาวะปิด เมื่อกำหนดให้ออปแอมป์มีคุณสมบัติตามอุดมคติ จะพบว่า $v_a = v_b = v_i$ จึงทำให้ตัวต้านทาน R_1 ไม่มีกระแสไหลผ่าน ดังนั้นจะได้

$$v_o = v_i \tag{3.24}$$

จากสมการ (3.24) นี้แสดงว่า ในสภาวะสวิตช์ปิด วงจรขยายแรงดันแบบสลับค่าอัตราขยายได้จะทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์นั่นเอง

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ต้องการให้วงจรขยายแรงดันแบบสลับค่าอัตราขยายได้มีอัตราขยายแรงดันเป็น -1 เมื่อสวิตช์มีสภาวะเปิด ดังนั้น จากสมการ (3.23) จะได้ $R_1 = R_2$ และมีอัตราขยายแรงดันเป็น 1 เมื่อสวิตช์มีสภาวะเปิด ซึ่งก็สอดคล้องตามสมการ (3.24) ในทางปฏิบัติ ความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5 จะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุต ซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้โดยเลือกตัวต้านทาน R_3 ให้มีค่า $R_{on} << R_3 << R_{off}$ โดยที่ R_{on} และ R_{off} เป็นค่าความต้านทานของสวิตช์ในสภาวะปิดและสภาวะเปิดตามลำดับ

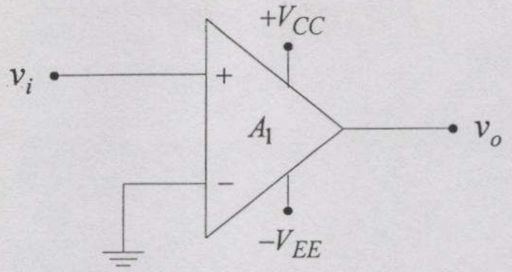
3.7 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (voltage comparator)

วงจรเปรียบเทียบแรงดันเป็นวงจรที่สภาวะของแรงดันเอาต์พุตขึ้นอยู่กับผลของการนำแรงดันอินพุตไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ซึ่งวงจรที่นิยมนำมาใช้งานแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ

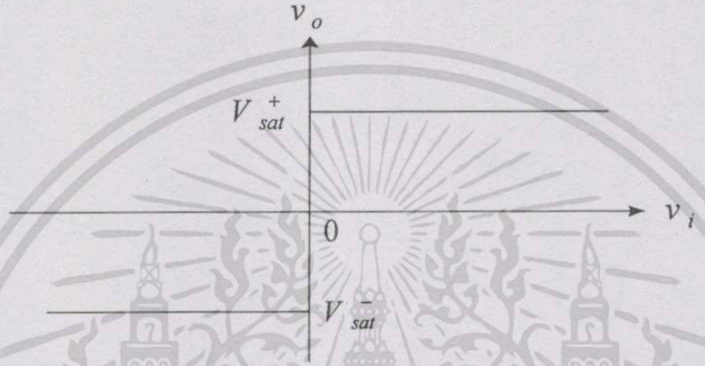
3.7.1 วงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์ (zero-crossing detector)

วงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่กำหนดให้แรงดันอ้างอิงมีค่าศูนย์โวลต์มีลักษณะของวงจรดังในรูปที่ 3.11 (ก) เป็นวงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์ชนิดนอนอิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 (ก) วงจรตรวจจับข้ามศูนย์แบบนอนอินเวอร์ติง



รูปที่ 3.11 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตของวงจรในรูปที่ 3.11 (ก)

เวอร์ติง (noninverting zero-crossing detector) โดยมีแรงดันอินพุตถูกป้อนเข้าที่ขานอนอินเวอร์ติงของออปแอมป์ ส่วนที่ขาอินเวอร์ติงของออปแอมป์ต่อลงกราวนด์ (ground) ทำหน้าที่เป็นขาแรงดันอ้างอิง เมื่อออปแอมป์มีการทำงานในลักษณะลูปเปิด (open loop) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตเป็น

$$v_o = A_o v_i \tag{3.25}$$

โดยที่ A_o เป็นอัตราขยายแรงดันของออปแอมป์ในขณะลูปเปิดโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 10^5 เท่า ดังนั้นจากสมการ (3.25) ถึงแม้ว่า v_i มีค่าน้อยก็สามารถทำให้ v_o มีค่ามากได้ แต่ในทางปฏิบัติ v_o จะถูกจำกัดด้วยแรงดันไฟเลี้ยงที่ป้อนให้กับออปแอมป์ซึ่งจากรูปที่ 3.11 (ก) คือ $+V_{CC}$ และ $-V_{EE}$ มีผลทำให้ออปแอมป์อยู่ในสภาวะอิ่มตัว จะได้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ V_{sat}^{+} และ V_{sat}^{-} ในกรณี v_i มีค่าบวกและลบตามลำดับ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.11 (ข) ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์เป็น

$$v_o = \begin{cases} V_{sat}^{-} & v_i < 0 \\ V_{sat}^{+} & v_i > 0 \end{cases} \tag{3.26}$$

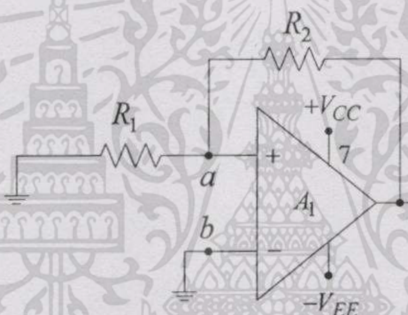
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนวงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์ชนิดอินเวอร์ติง (inverting zero-crossing detector) ก็สามารถอธิบายการทำงานได้ในทำนองเดียวกัน ต่างกันแต่เพียงสลับที่กันระหว่างขาแรงดันอินพุตและขาแรงดันอ้างอิงกันเท่านั้น ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็น

$$v_o = -A_o v_i = \begin{cases} V_{sat}^{+} & v_i < 0 \\ V_{sat}^{-} & v_i > 0 \end{cases} \tag{3.27}$$

3.7.2 วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ (schmitt trigger) [1]

วงจรชมิตต์ทริกเกอร์เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันรูปแบบหนึ่งที่เกิดจากวงจรขยายที่มีลูปป้อนกลับแบบบวกซึ่งกำหนดให้อัตราขยายแรงดันลูปปิด (closed-loop voltage gain) มีค่ามากกว่าหนึ่ง มีวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์ A_1 และวงจรแบ่งแรงดัน



รูปที่ 3.12 วงจรขยายที่มีการป้อนกลับแบบบวก

โดยใช้ตัวต้านทานในเส้นทางการป้อนกลับแบบบวก ในการทำงานของวงจรสมมุติว่ามีสัญญาณรบกวนมาทำให้แรงดันที่โนด a คือ v_a เป็นค่าบวกเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อถูกขยายด้วยอัตราขยายแรงดันลูปเปิดของออปแอมป์แล้วทำให้แรงดันเอาต์พุต v_o มีค่ามากกว่า v_a ขณะเดียวกัน บางส่วนของ v_o จะถูกป้อนกลับมาที่โนด a ด้วยองค์ประกอบการป้อนกลับ (feedback factor) $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ ถ้าหากอัตราขยายลูปปิดของวงจรมีค่ามากกว่าหนึ่งแล้ว ผลของการป้อนกลับแบบบวกนี้จะทำให้ v_a และ v_o เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนทำให้ออปแอมป์มีสภาวะอิ่มตัวด้านบวก ในสภาวะนี้จะได้

$$\begin{aligned} v_o &= V_{sat}^{+} \\ v_a &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}^{+} \end{aligned} \tag{3.28}$$

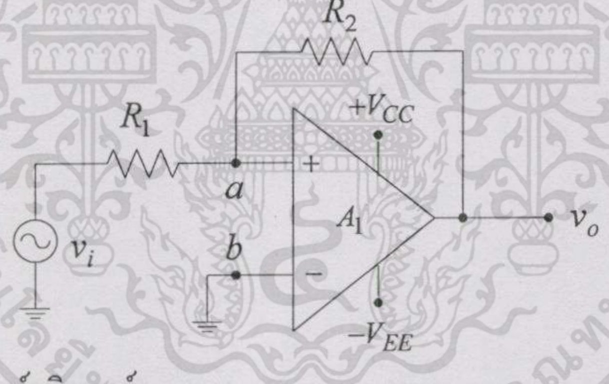
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอีกกรณีหนึ่ง ถ้าหาก v_a มีค่าลบ ผลของการป้อนกลับแบบบวกนี้จะมีผลทำให้ออปแอมป์มีสภาวะอิ่มตัวด้านลบ จึงก่อให้เกิดผลลัพธ์ต่อไปนี้ คือ

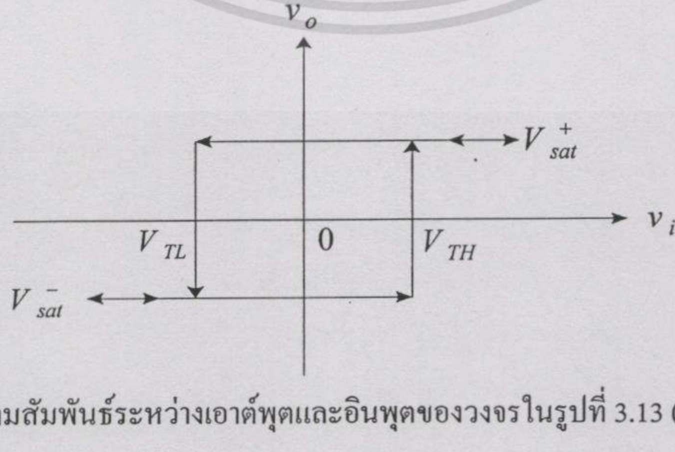
$$v_o = V_{sat}^{-}$$
$$v_a = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}^{-} \tag{3.29}$$

จากสมการ (3.28) และสมการ (3.29) จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 3.12 มีสองสถานะ คือ V_{sat}^{+} และ V_{sat}^{-} ซึ่งในการเปลี่ยนสถานะของแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้โดยการป้อนแรงดันอินพุตให้กับวงจรในรูปที่ 3.12 ทำให้ได้วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ก) เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ดังนั้นที่โนด a เมื่ออาศัยทฤษฎีการทับซ้อน (superposition theorem) จะได้ว่า

$$v_a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o \tag{3.30}$$



รูปที่ 3.13 (ก) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์



รูปที่ 3.13 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและอินพุตของวงจรในรูปที่ 3.13 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.30) จะเห็นว่า ถ้าวงจรมีแรงดันเอาต์พุต $v_o = V_{sat}^+$ แรงดันอินพุตค่าบวกจะไม่ทำให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนสถานะ ฉะนั้น ถ้าต้องการให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนสถานะเป็น $v_o = V_{sat}^-$ แรงดันอินพุตต้องมีค่าลบเพื่อทำให้ v_a มีค่าต่ำกว่าศูนย์โวลต์ ดังนั้น แรงดันขีดเริ่มด้านต่ำ V_{TL} (low threshold voltage) ซึ่งทำให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนสถานะจาก V_{sat}^+ เป็น V_{sat}^- สามารถหาได้โดยจากสมการ (3.30) กำหนดให้ $v_o = V_{sat}^+$, $v_a = 0$ และ $v_i = V_{TL}$ จะได้

$$V_{TL} = -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}^+ \tag{3.31}$$

สำหรับกรณีที่ต้องการเปลี่ยนสถานะของแรงดันเอาต์พุตจาก V_{sat}^- เป็น V_{sat}^+ อีกก็สามารถทำได้โดยการปรับแรงดันอินพุตให้เพิ่มขึ้นจนทำให้ v_a มีค่ามากกว่าศูนย์โวลต์ ดังนั้นจะได้แรงดันขีดเริ่มด้านสูง V_{TH} (high threshold voltage) เป็น

$$V_{TH} = -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}^- \tag{3.32}$$

นั่นคือ จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 3.13 (ก) ได้ดังในรูปที่ 3.13 (ข)

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะนำวงจรเปรียบเทียบแรงดันทั้ง 2 รูปแบบนี้มาทำหน้าที่เป็นวงจรสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากสัญญาณรูปไซน์และสัญญาณรูปสามเหลี่ยม โดยรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

3.8 วงจรอินทิเกรเตอร์ (integrator)

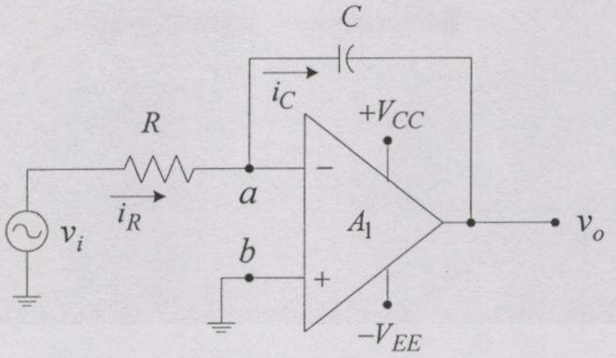
วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นสัดส่วนกับการอินทิเกรตของอินพุต ซึ่งรูปแบบของวงจรที่นิยมนำมาใช้งานแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

3.8.1 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์ (Miller's integrator) [16]

วงจรอินทิเกรเตอร์แบบนี้มีวงจรพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 3.14 เมื่อกำหนดให้ออปแอมป์มีคุณสมบัติตามอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต v_i และแรงดันเอาต์พุต v_o สามารถหาได้โดยอาศัยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โนด a จะได้

$$i_R = i_C$$
$$\frac{v_i}{R} = C\frac{d}{dt}(v_a - v_o)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

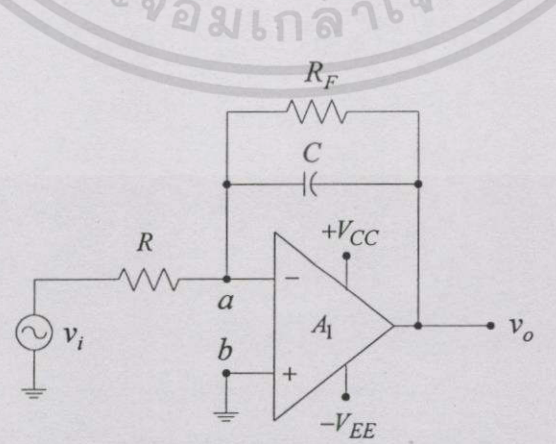


รูปที่ 3.14 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์พื้นฐาน

เนื่องจาก $v_a = v_b = 0$ ซึ่งจะได้

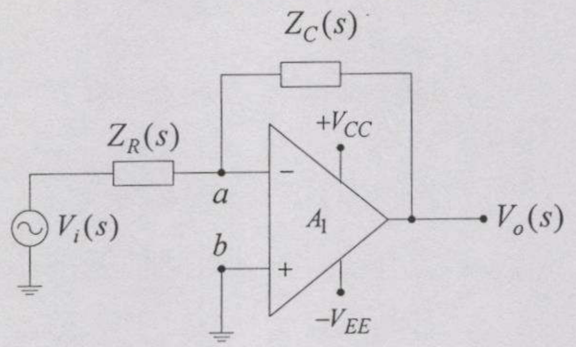
$$v_o = -\frac{1}{RC}\int_0^t v_i dt + V(0) \tag{3.33}$$

โดยที่ $V(0)$ เป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นสัดส่วนกับแรงดันเอาต์พุตที่เวลา $t = 0$ วินาที จากสมการ (3.33) แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการอินทิเกรตแรงดันอินพุตและเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าเวลาคงตัว $\tau = RC$ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ เมื่อ $v_i = 0$ โวลต์จะทำให้วงจรอินทิเกรเตอร์ในรูปที่ 3.14 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแบบลูปเปิด ทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุจะมีสภาวะเสมือนกับเปิดวงจรกับแรงดันอินพุตออฟเซต (offset input voltage) ของออปแอมป์ จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตเกิดมีค่าผิดพลาดขึ้น เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าวนี้ วงจรอินทิเกรเตอร์แบบนี้จึงมักต่อตัวต้านทาน R_F ขนานกับตัวเก็บประจุ C ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งจะเห็นว่า R_F จะทำให้เกิดการจำกัดค่าอัตราขยายแรงดันที่ความถี่ต่ำ สำหรับค่า R_F ที่เหมาะสมนั้น พิจารณาจากผลตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 3.15 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์ในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์พื้นฐานในโดเมน S

ของวงจรอินทิเกรเตอร์ โดยวงจรในรูปที่ 3.14 เมื่อแสดงในโดเมน S (S domain) จะได้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งเมื่ออาศัยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โนด a จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) เป็น

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{Z_C(s)}{Z_R(s)}$$

โดยที่ $Z_C(s) = \frac{1}{sC}$ และ $Z_R(s) = R$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$H(s) = -\frac{1}{sCR} \tag{3.34}$$

จากสมการ (3.34) เมื่อแทน $s = j2\pi f$ โดยที่ f เป็นความถี่ในหน่วย Hz แล้วจะได้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$|H(f)| = \frac{1}{2\pi fCR} \tag{3.35}$$

เมื่อกำหนดให้ f_b เป็นความถี่ที่ทำให้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าเป็น 1 หรือ $0\,dB$ ดังนั้นจากสมการ (3.35) จะได้ว่า

$$f_b = \frac{1}{2\pi CR} \tag{3.36}$$

ในทำนองเดียวกัน วงจรอินทิเกรเตอร์ในรูปที่ 3.15 เมื่อแสดงในโดเมน S แล้วก็สามารถคำนวณหาได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(s) = -\frac{R_F/R}{sCR_F + 1} \tag{3.37}$$

เมื่อกำหนดให้ $s = j2\pi f$ จากสมการ (3.37) จะได้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$|H(f)| = \frac{R_F/R}{[1 + (2\pi fCR_F)^2]^{1/2}} \tag{3.38}$$

ถ้ากำหนดให้ f_a เป็นความถี่ซึ่งทำให้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการ (3.38) มีค่า $\frac{R_F}{\sqrt{2}R}$ แล้วจะได้ว่า

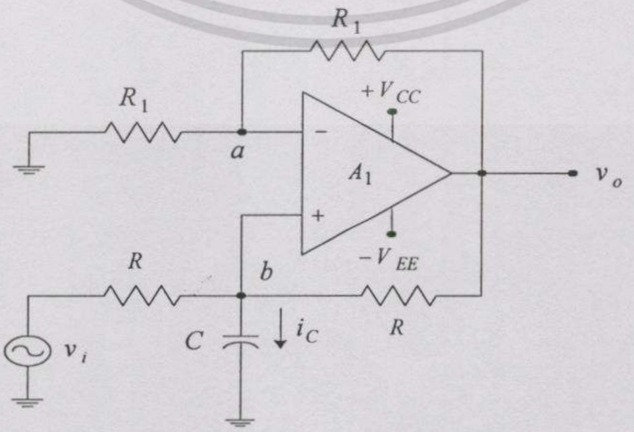
$$f_a = \frac{1}{2\pi CR_F} \tag{3.39}$$

จากสมการ (3.38) จะเห็นว่า ในช่วงความถี่ต่ำกว่า f_a วงจรในรูปที่ 3.15 จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟสโดยมีอัตราขยายเป็น $\frac{R_F}{R}$ และทำหน้าที่เป็นวงจรอินทิเกรเตอร์ในช่วงความถี่สูงกว่า f_a

จากผลของสมการ (3.35) ถึงสมการ (3.39) โดยทั่วไปจะเลือกค่า R, R_F และ C ที่ทำให้ $f_a < f_b$ เสมอ

3.8.2 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบดีโบ (Deboo's integrator) [15]

วงจรอินทิเกรเตอร์แบบนี้มีวงจรดังในรูปที่ 3.17 ซึ่งเมื่อกำหนดให้ออปแอมป์มีมีคุณสมบัติตามอุดมคติและอาศัยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ โดยที่โนด a จะได้ว่า



รูปที่ 3.17 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบดีโบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_1})v_a-\frac{1}{R_1}v_o=0$$

$$v_a=\frac{v_o}{2}$$

และที่โนด b จะได้ว่า

$$(\frac{1}{R}+\frac{1}{R})v_b-\frac{1}{R}v_i-\frac{1}{R}v_o+i_C=0$$

เนื่องจาก $v_a=v_b$ จะได้ว่า

$$v_o=\frac{2}{CR}\int_0^t v_i dt+V(0) \qquad (3.40)$$

โดยที่ $V(0)$ เป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นสัดส่วนกับแรงดันเอาต์พุตที่เวลา $t=0$ วินาที จากสมการ (3.40) จะเห็นว่า แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการอินทิเกรตแรงดันอินพุตและเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าเวลาคงตัว $\tau=CR$

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะนำวงจรอินทิเกรเตอร์ทั้งสองรูปแบบดังกล่าวนี้มาทำหน้าที่เป็นวงจรสร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมจากสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม โดยรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

หลักการและการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณ

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะนำเสนอหลักการและการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณอย่างง่ายที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกัน คือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณรูปไซน์ โดยอาศัยความคิดในการประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมดังที่ได้เสนอไปแล้วในหัวข้อ 2.3 มาเป็นแนวทางในการออกแบบวงจร ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2 หลักการและการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1

4.2.1 หลักการ [17]

จากแนวความคิดเรื่องการประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมดังที่นำเสนอไปแล้วในหัวข้อที่ 2.3 อาจจะประมาณสัญญาณรูปไซน์ได้ดังนี้ คือ

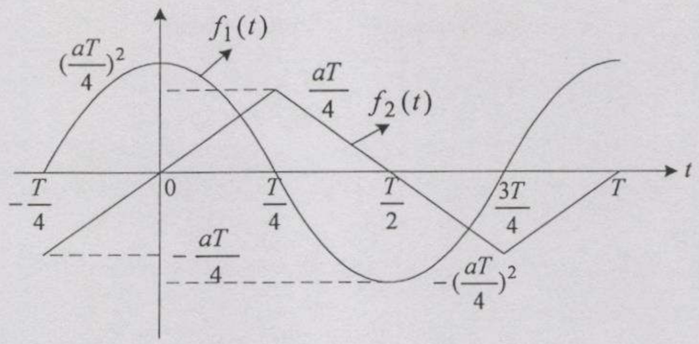
$$f_1(t) = \begin{cases} (\frac{aT}{4})^2[1-(\frac{4}{T})^2 t^2] & -\frac{T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ (\frac{aT}{4})^2[-1+(\frac{4}{T})^2 (t-\frac{T}{2})^2] & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \approx (\frac{aT}{4})\cos(\frac{2\pi}{T}t) \qquad (4.1)$$

ในที่นี้ a เป็นค่าคงที่และ T เป็นคาบเวลาของสัญญาณ $f_1(t)$ เนื่องจาก $f_1(t)$ เป็นฟังก์ชันของเวลา ดังนั้นอาจจะคิดได้ว่าสัญญาณ $f_1(t)$ นี้สามารถผลิตได้จากการประมวลผลของสมการที่เป็นฟังก์ชันของเวลาดังเช่น $f_2(t)$ ตามสมการ (4.2) คือ

$$f_2(t) = \begin{cases} at & -\frac{T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ -a(t-\frac{T}{2}) & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \qquad (4.2)$$

ซึ่งรูปร่างของ $f_1(t)$ และ $f_2(t)$ มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 4.1 และเป็นที่น่าสังเกตว่า ถ้าฟังก์ชันที่แสดงเครื่องหมายของ $f_1(t)$ ตามสมการ (4.1) ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ $f_1(t)$ และสัญญาณ $f_2(t)$

$$Sgn[f_1(t)] = \begin{cases} 1 & -\frac{T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ -1 & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \tag{4.3}$$

ในขณะเดียวกัน เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของ $f_2(t)$ เทียบกับเวลาจะได้

$$\frac{d}{dt} f_2(t) = \begin{cases} a & -\frac{T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ -a & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \tag{4.4}$$

ดังนั้นเมื่ออาศัยความสัมพันธ์ของสมการ (4.3) และสมการ (4.4) จะได้เป็น

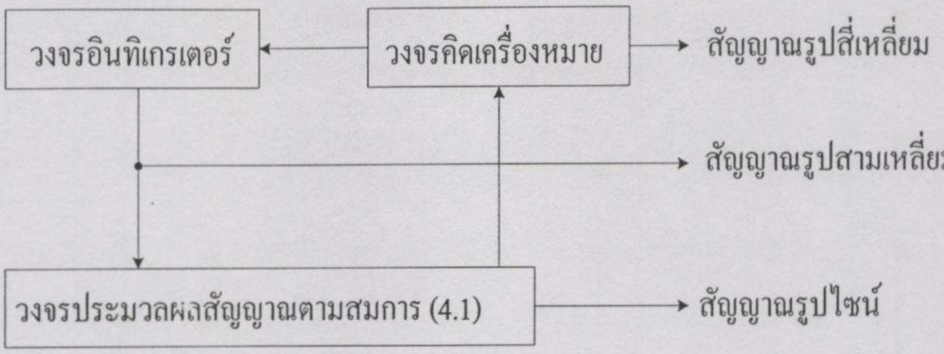
$$f_3(t) = aSgn[f_1(t)] \tag{4.5}$$

หรือ

$$f_2(t) = a\int_0^t Sgn[f_1(t)]dt + V(0) \tag{4.6}$$

โดยที่ $V(0)$ เป็นค่าเริ่มต้นของการอินทิเกรต จากสมการ (4.6) บอกให้รู้ว่า $f_2(t)$ นั้นสามารถสร้างขึ้นได้จากการอินทิเกรตค่าฟังก์ชันที่แสดงเครื่องหมายของ $f_1(t)$ ได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการ (4.1) สมการ (4.2) และสมการ (4.6) จะเห็นว่า ฟังก์ชันหรือสัญญาณ $f_1(t)$, $f_2(t)$ และ $f_3(t)$ เกิดเกี่ยวเนื่องกันอยู่ในลักษณะวงปิดของวงจรออสซิลเลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1

ดังนั้นบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 4.2 จึงสมารถใช้เป็นต้นแบบในการสร้างวงจรผลิตสัญญาณที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกัน คือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณรูปไซน์ตามต้องการ ดังรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไปนี้

4.2.2 การออกแบบวงจร

จากบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.2 สามารถนำมาเป็นแนวทางในการสร้างวงจรผลิตสัญญาณได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยมีออปแอมป์ A_1 ทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์ซึ่งรับอินพุตเป็นสัญญาณรูปไซน์จากวงจรขยายแบบสลับค่าอัตราขยายได้มาทำการคิดเครื่องหมาย จึงทำให้ได้เอาต์พุต v_{o2} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดสัมพันธ์กับแรงดันในสภาวะอิ่มตัวของออปแอมป์ V_{sat}^{+} คือ

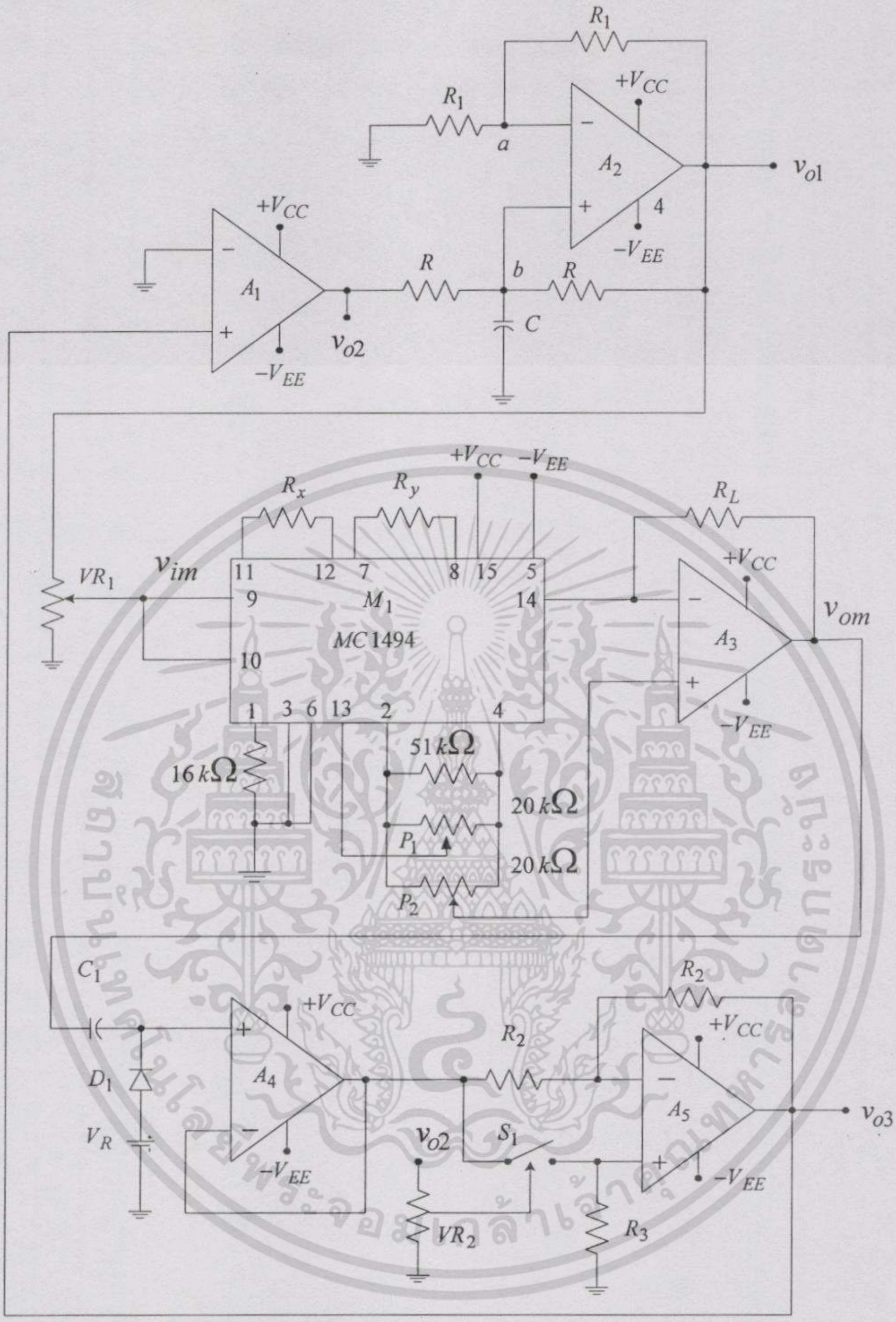
$$V_{o2} = 2V_{sat}^{+}\, V_{p-p} \tag{4.7}$$

ส่วนออปแอมป์ A_2 กับ R_1 , R และ C ทำงานร่วมกันเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์แบบดีโบรับสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากวงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์นำมาทำการอินทิเกรตให้ได้เอาต์พุต v_{o1} เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม โดยเมื่ออาศัยคุณสมบัติของวงจรอินทิเกรเตอร์ในหัวข้อ 3.8.2 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง v_{o1} และ v_{o2} ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งสามารถคำนวณหาคาบเวลาของสัญญาณทั้งสองได้ดังนี้ คือ

$$\frac{V_{sat}^{+} - V_{sat}^{-}}{T_1} = \frac{2}{RC} V_{sat}^{+}$$

$$T_1 = \frac{RC}{2} \frac{V_{sat}^{+} - V_{sat}^{-}}{V_{sat}^{+}} \tag{4.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



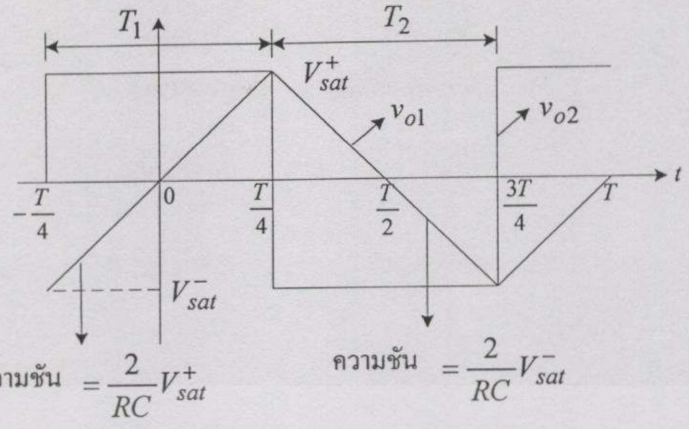
รูปที่ 4.3 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ก)

และ

$$\frac{V_{sat}^{-} - V_{sat}^{+}}{T_2} = \frac{2}{RC} V_{sat}^{-}$$

$$T_2 = \frac{RC}{2} \frac{V_{sat}^{-} - V_{sat}^{+}}{V_{sat}^{-}} \tag{4.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ v_{o1} และ v_{o2}

จากรูปที่ 4.4 พบว่าคาบเวลา $T = T_1 + T_2$ ดังนั้น จากสมการ (4.8) และสมการ (4.9) จะได้ว่า

$$T = \frac{RC}{2}\frac{V_{sat}^+ - V_{sat}^-}{V_{sat}^+} + \frac{RC}{2}\frac{V_{sat}^- - V_{sat}^+}{V_{sat}^-} \tag{4.10}$$

ถ้ากำหนดให้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่เอาต์พุตของวงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์มี $V_{sat}^+ = -V_{sat}^-$ ดังนั้น จากสมการ (4.10) จะได้

$$T = 2RC \tag{4.11}$$

ดังนั้นจะได้ความถี่ของสัญญาณทั้งหมดนี้เป็น

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2RC}\ Hz \tag{4.12}$$

ส่วนของวงจรประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมประกอบด้วย VR_1 ทำหน้าที่ปรับลดขนาดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม v_{o1} ให้เหมาะสมที่จะป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรคูณสัญญาณ M_1 ซึ่งจะให้เอาต์พุตมีขนาดเป็น

$$V_{om} = -KV_{im}^2\, V_{p-p} \tag{4.13}$$

โดยที่ K เป็นค่าความไวของวงจรคูณสัญญาณและ V_{im} เป็นขนาดของแรงดันอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรคูณสัญญาณ ซึ่งเอาต์พุตของวงจรคูณสัญญาณจะมีรูปร่างเป็นสัญญาณรูปพาราโบลาที่พลิกคว่ำลงเหมือนกับสัญญาณรูปไซน์ที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น แต่มีค่ายอดอยู่ที่ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์โวลต์ หลังจากนั้นเอาต์พุตของวงจรคูณสัญญาณจะถูกป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรแคลมป์สัญญาณที่ประกอบด้วย C_1, D_1 และ V_R เป็นแรงดันอ้างอิง ซึ่งทำหน้าที่ยกระดับสัญญาณที่ได้จากวงจรคูณสัญญาณให้มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ระดับศูนย์โวลต์โดยมีออปแอมป์ A_4 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์เพื่อลดผลกระทบของภาระ ส่วนออปแอมป์ A_5 ประกอบกับกลุ่ม R_2, R_3 และอนาลอกสวิตช์ S_1 ที่รับสัญญาณ v_{o2} มาปรับลดขนาดให้เหมาะสมด้วย VR_2 แล้วมาควบคุมการเปิดปิด จะทำหน้าที่ร่วมกันเป็นวงจรขยายที่สลับค่าอัตราขยายระหว่าง +1 และ -1 ได้ ทำให้ได้เอาต์พุต v_{o3} ประมาณเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาดเป็น

$$V_{o3} = 2V_{om}\, V_{p-p} \tag{4.14}$$

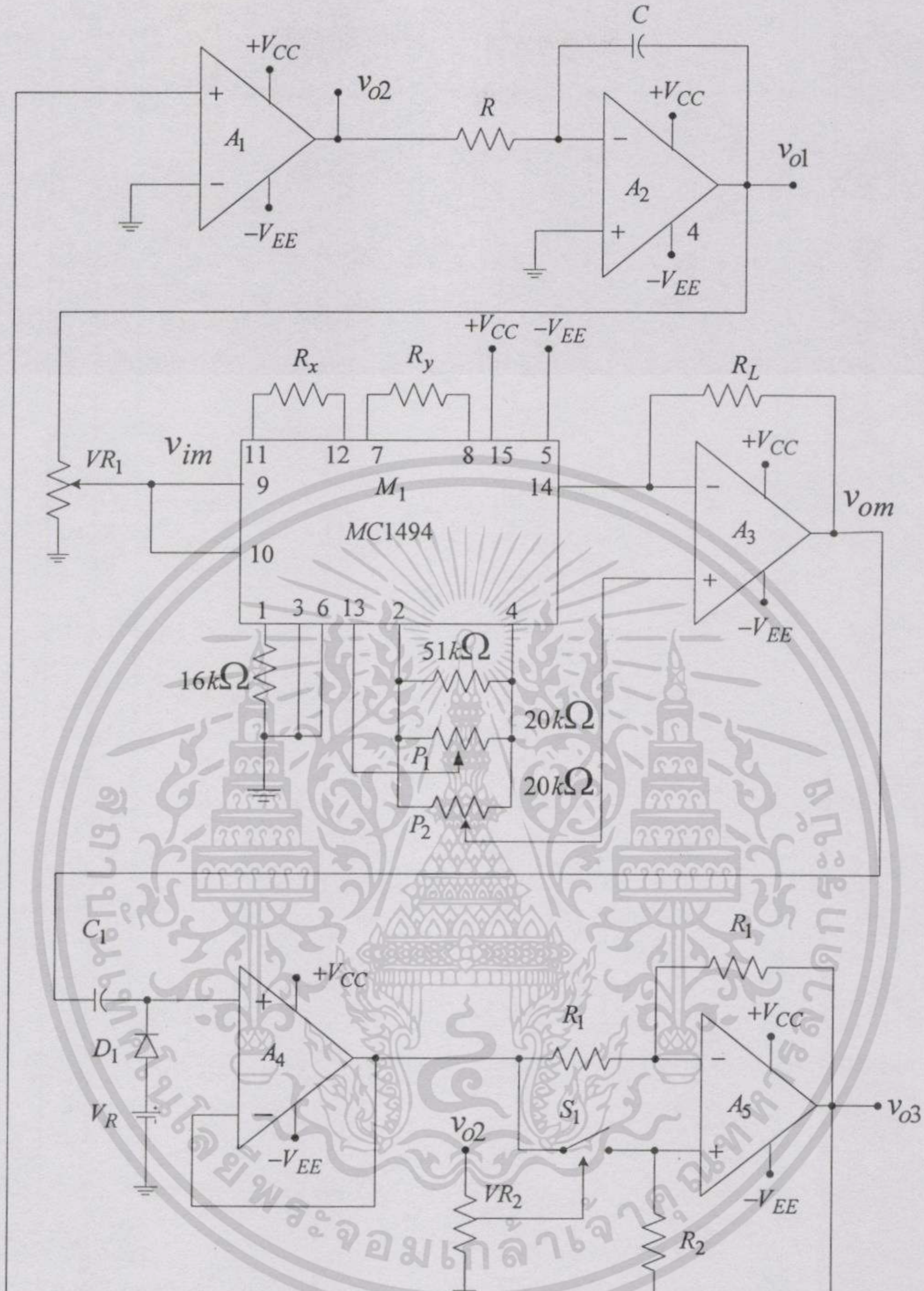
สัญญาณรูปไซน์ที่ได้ตามสมการ (4.14) จะป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรตรวจจับแบบข้ามศูนย์ จึงทำให้เกิดการทำงานเป็นวงรอบปิดของวงจรออสซิลเลเตอร์ได้

จากวงจรผลิตสัญญาณในรูปที่ 4.3 เพื่อลดจำนวนอุปกรณ์ในวงจรและหลีกเลี่ยงการปรับตัวต้านทานสองตัวพร้อมกันในวงจรอินทิเกรเตอร์แบบดีโบจึงเลือกใช้วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์ ทำให้ได้วงจรผลิตสัญญาณอีกรูปแบบหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.5 ที่มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกัน แต่อย่างไรก็ตาม จะได้ความถี่ของสัญญาณทั้งสามเป็น

$$f = \frac{1}{4RC}\, Hz \tag{4.15}$$

ถึงแม้ว่าวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1(ก) และ (ข) จะให้เอาต์พุตได้ 3 รูปแบบพร้อมกันในวงลูปปิดที่มีลักษณะเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ได้ แต่กระนั้นสัญญาณรูปไซน์ที่ได้มีค่า THD ต่ำสุดเพียง 0.145% เท่านั้น ดังนั้นในหัวข้อถัดไป จึงนำเสนอวงจรผลิตสัญญาณอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งสามารถปรับลดค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ได้ด้วยการเพิ่มวงจรคูณสัญญาณและผลวงจรขยายผลต่างเท่านั้นเอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ข)

4.3 หลักการและการออกแบบวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2

ถึงแม้ว่าสัญญาณรูปไซน์ที่ประมาณขึ้นด้วยวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 ดังที่นำเสนอในหัวข้อ 4.2 นั้นมีค่า THD ต่ำสุดเพียง 0.145% เท่านั้น อย่างไรก็ดี วงจรนี้ยังคงมีข้อควรได้รับการพัฒนาปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนออีกวิธีการหนึ่งในการสร้างวงจรผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกัน โดยใช้วิธีการที่เหมาะสมที่สุด (optimization) เพื่อทำให้ค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ที่จะสร้างนั้นมีค่าต่ำที่สุด กล่าวคือ มีค่าเป็นศูนย์ในทางทฤษฎี วงจรผลิตสัญญาณที่นำเสนอในหัวข้อนี้สามารถจ่ายได้ทั้งสัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากส่วนของวงจรสร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่ดีนั้นสามารถสร้างขึ้นได้ง่ายด้วยวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ประกอบด้วยวงจรชมิตต์ทริกเกอร์และวงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์ทำงานร่วมกัน [16] ดังนั้น สาระสำคัญที่จะเน้นในหัวข้อนี้ คือ การประมาณและสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมด้วยวิธีการที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีแนวความคิดและหลักการดังจะได้กล่าวถึงต่อไป

4.3.1 แนวคิดและหลักการประมาณสัญญาณ [18]

จากหลักการที่นำเสนอในหัวข้อ 2.3 สามารถใช้ประมาณฟังก์ชันรูปไซน์ได้ กล่าวคือ

$$f_4(t) = \begin{cases} (\frac{aT}{4})^2[1-\alpha(\frac{4}{T})^2 t^2 + (\alpha-1)(\frac{4}{T})^4 t^4] & -\frac{T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ (\frac{aT}{4})^2[-1+\alpha(\frac{4}{T})^2(t-\frac{T}{2})^2 - (\alpha-1)(\frac{4}{T})^4(t-\frac{T}{2})^4] & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{T} \end{cases} \tag{4.16}$$

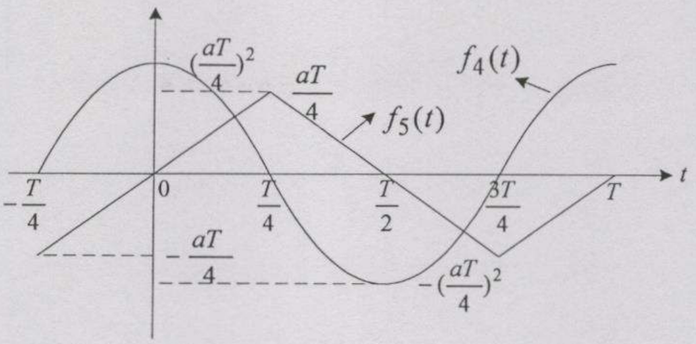
$$\approx (\frac{aT}{4})^2 \cos(\frac{2\pi}{T}t)$$

ในที่นี้ a และ α เป็นค่าคงที่และ T คือค่าคาบเวลาของสัญญาณ $f_4(t)$ ดังนั้นอาจจะคิดได้ว่าสัญญาณ $f_4(t)$ นี้สามารถผลิตได้จากการประมวลผลของสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเช่นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมตามสมการ (4.17) ได้ คือ

$$f_5(t) = \begin{cases} at & -\frac{T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ -a(t-\frac{T}{2}) & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \tag{4.17}$$

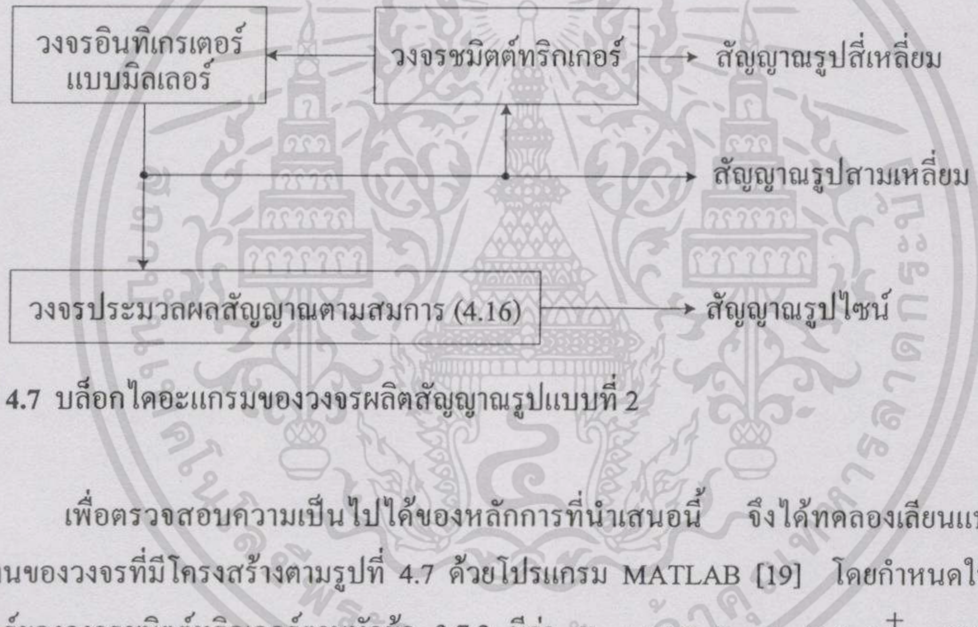
ซึ่ง $f_4(t)$ และ $f_5(t)$ มีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 4.6 นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์หาความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปไซน์ตามสมการ (4.16) ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก พบว่ามีค่า THD ต่ำสุดเท่ากับ $5.02\times10^{-5}\%$ ที่ $\alpha = 1.2232$ ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่า THD ที่ต่ำมาก แสดงว่าสัญญาณที่ประมาณได้เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f_4(t)$ และ $f_5(t)$

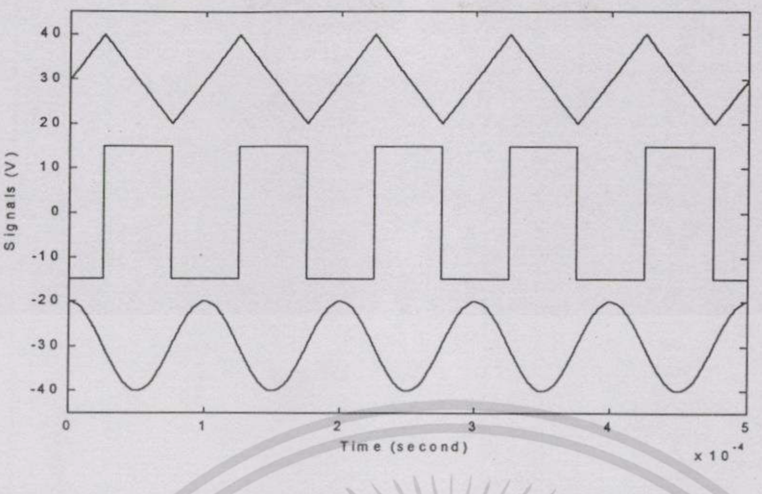
จากแนวความคิดดังกล่าวนี้สามารถนำมาสร้างเป็นบล็อกไดอะแกรมของวงจรผลิตสัญญาณได้ดังในรูปที่ 4.7



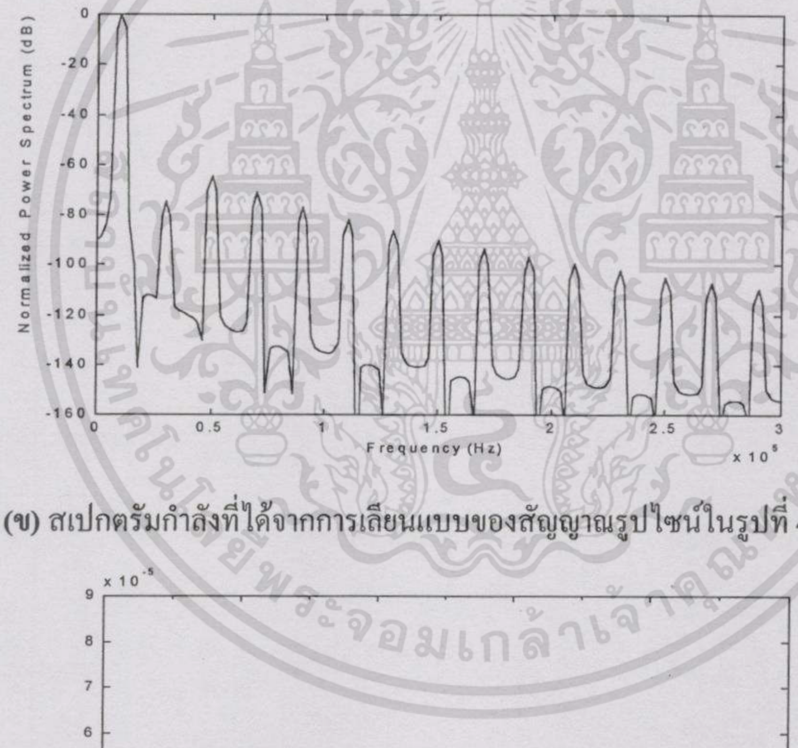
รูปที่ 4.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2

เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของหลักการที่นำเสนอนี้ จึงได้ทดลองเลียนแบบการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 4.7 ด้วยโปรแกรม MATLAB [19] โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ตามหัวข้อ 3.7.2 มีค่า $V_{TH} = 10V$, $V_{TL} = -10V$, $V_{sat}^{+} = 15V$ และ $V_{sat}^{-} = -15V$ และพารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรเตอร์ตามหัวข้อ 3.8.1 มีค่า $\frac{1}{RC} = 26666$ และ $V(0) = 0V$ จะได้รูปคลื่นสัญญาณต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) ประกอบด้วยสัญญาณรูปสามเหลี่ยมขนาด $20V_{p-p}$ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมขนาด $30V_{p-p}$ และสัญญาณรูปไซน์ขนาด $20V_{p-p}$ ตามลำดับ โดยพิจารณาเฉพาะสัญญาณที่เป็นไฟกระแสสลับและสัญญาณทั้งสามรูปแบบมีความถี่ $10kHz$ และส่วนรูปที่ 4.8 (ข) เป็นสเปกตรัมกำลัง (power spectrum) ของสัญญาณรูปไซน์โดยนำสัญญาณรูปไซน์จากรูปที่ 4.8 (ก) มาทำการสุ่มตัวอย่างเก็บข้อมูลในรูปของไฟล์ (file) ด้วยความถี่ในการสุ่ม $10MHz$ แล้วนำข้อมูลดังกล่าวนี้มาทำการพล็อต (plot) รูปสเปกตรัมกำลังด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจากรูปที่ 4.8 (ข) สามารถคำนวณค่า THD ได้ประมาณ $4.55 \times 10^{-5}\%$ นอกจากนี้ยังได้แสดงค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในช่วง $0.1\ Hz$

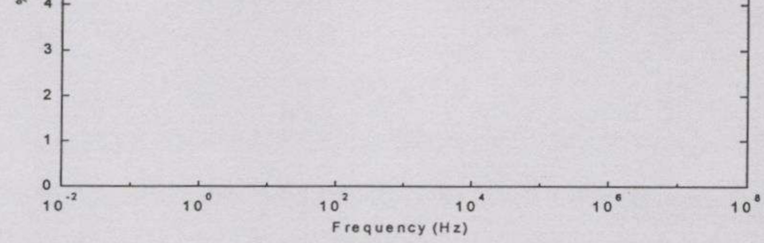
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (ก) ผลการเลียนแบบเอาต์พุตจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 (ข) สเปกตรัมกำลังที่ได้จากการเลียนแบบของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 4.8 (ก)



รูปที่ 4.8 (ค) ค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานของบล็อกไดอะแกรม ในรูปที่ 4.7 ในช่วงความถี่ 0.1 *Hz* ถึง 10 *MHz*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 10 *MHz* ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ค) โดยใช้องค์ประกอบของสเปกตรัมทั้งหมด 19 ฮาร์มอนิก (harmonic)

ดังนั้นจากผลลัพธ์ที่ได้นี้ช่วยแสดงว่า โครงสร้างของวงจรตามรูปที่ 4.7 นี้สามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบในการสร้างวงจรผลิตสัญญาณที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกัน คือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณรูปไซน์ได้

4.3.2 การออกแบบวงจร

จากหลักการที่นำเสนอตามหัวข้อที่ 4.3.1 สามารถนำมาเป็นแนวทางในการสร้างวงจรผลิตสัญญาณได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยในส่วนของการสร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมนั้นอาศัยวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_2, R_1 และ R_2 ซึ่งรับอินพุตมาจากวงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์ที่ประกอบด้วยออปแอมป์ A_1, R และ C โดยเอาต์พุตของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์จะถูกป้อนกลับมาเป็นอินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์นี้อีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้วงจรทั้งสองนี้ทำงานร่วมกันเป็นวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ซึ่งอธิบายการทำงานได้ว่า ขณะที่เอาต์พุตของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์มีค่าเป็น V_{sat}^{+} นั้นจะทำให้เอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์มีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นด้วยค่าความชันเป็น $-\frac{V_{sat}^{+}}{RC}$ เมื่อเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ลดลงมาจนถึงระดับ V_{TL} ของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ก็จะทำให้เอาต์พุตของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์เปลี่ยนสภาวะเป็น V_{sat}^{-} ซึ่งส่งผลให้เอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นด้วยค่าความชันเป็น $-\frac{V_{sat}^{-}}{RC}$ เมื่อเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงระดับ V_{TH} ของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ ก็จะทำให้เอาต์พุตของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์เปลี่ยนสภาวะเป็น V_{sat}^{+} อีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้เกิดการทำงานวนรอบซ้ำไปเรื่อยๆ ดังนั้น จึงได้เอาต์พุตของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ คือ v_{o2} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ คือ v_{o1} เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) และรูปที่ 4.10 (ข) ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมในรูปที่ 4.10 (ก) และสัญญาณรูปสามเหลี่ยมในรูปที่ 4.10 (ข) สามารถคำนวณหาความถี่ของสัญญาณทั้งสองได้ดังนี้ คือ

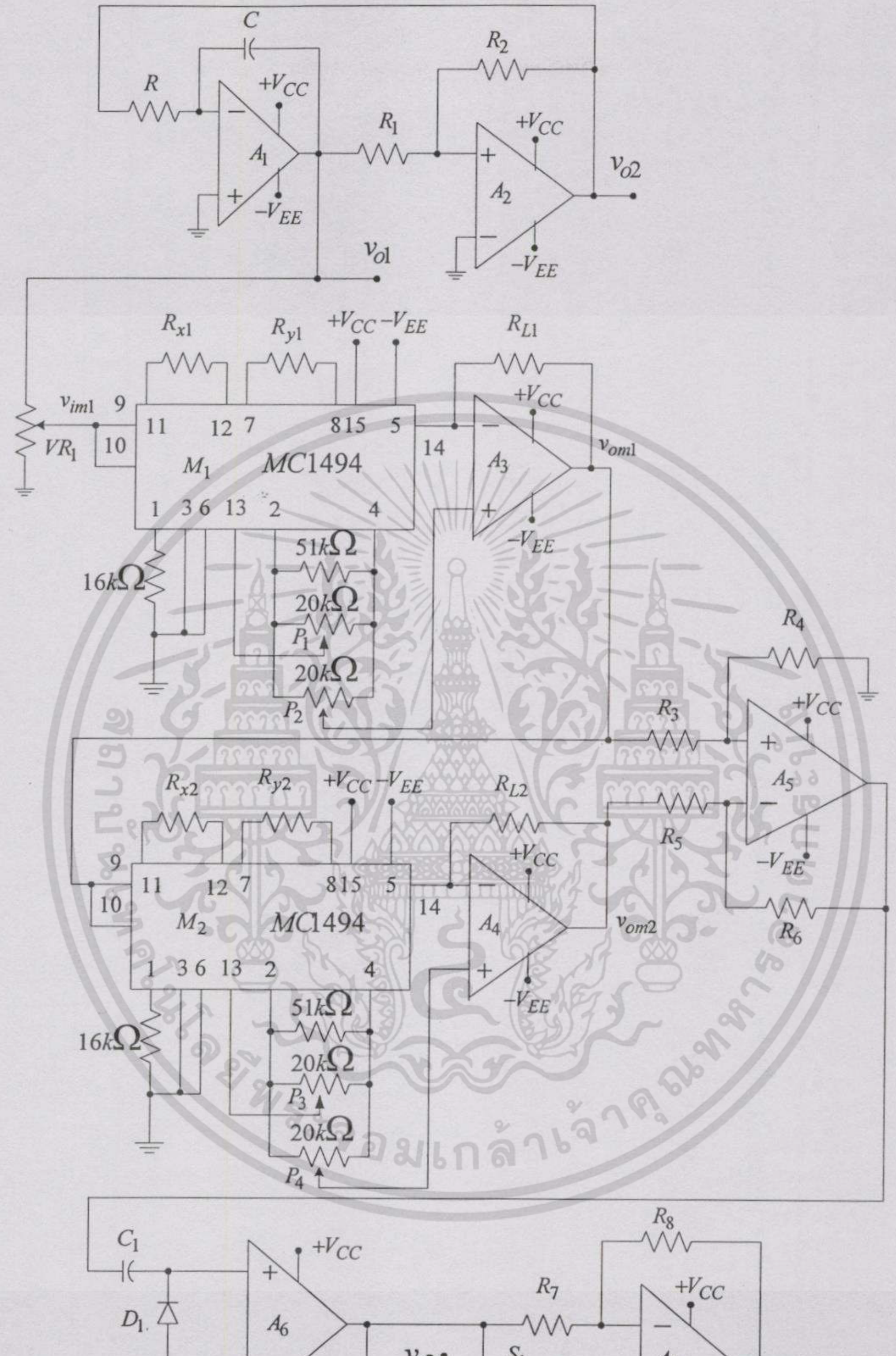
$$\frac{V_{TL}-V_{TH}}{T_1} = -\frac{V_{sat}^{+}}{RC}$$

$$T_1 = RC\frac{V_{TH}-V_{TL}}{V_{sat}^{+}} \tag{4.18}$$

และ

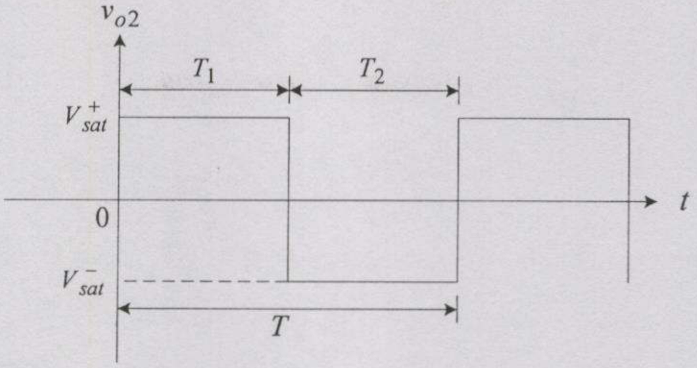
$$\frac{V_{TH}-V_{TL}}{T_2} = -\frac{V_{sat}^{-}}{RC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

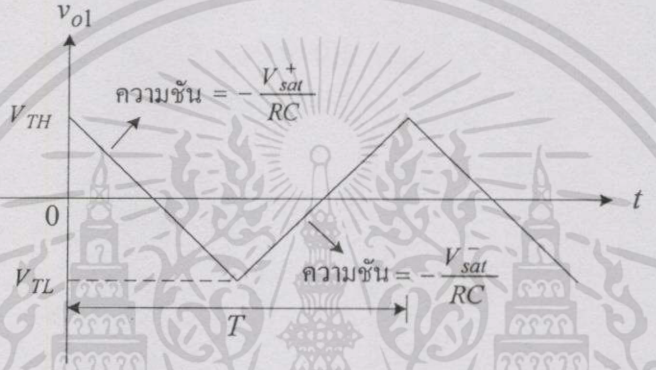


รูปที่ 4.9 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 (ก) สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.10 (ข) สัญญาณรูปสามเหลี่ยม

$$T_2 = -RC\frac{V_{TH} - V_{TL}}{V_{sat}^-} \tag{4.19}$$

ถ้ากำหนดให้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่ได้จากวงจรชมิตต์ทริกเกอร์มี $V_{sat}^+ = -V_{sat}^-$ ดังนั้นเมื่อนำไปแทนในสมการ (4.19) จะได้

$$T_2 = RC\frac{V_{TH} - V_{TL}}{V_{sat}^+} \tag{4.20}$$

แต่จากรูปที่ 4.10 (ก) พบว่า $T = T_1 + T_2$ ดังนั้นจากสมการ (4.18) และสมการ (4.20) จะได้

$$T = 2RC\frac{V_{TH} - V_{TL}}{V_{sat}^+} \tag{4.21}$$

เนื่องจากในหัวข้อ 3.7.2 ได้ $V_{TL} = -\frac{R_1}{R_2}V_{sat}^+$ และ $V_{TH} = -\frac{R_1}{R_2}V_{sat}^-$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (4.21) จะได้ความถี่ของสัญญาณทั้งสองนี้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_2}{4R_1RC}\,Hz \tag{4.22}$$

เอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ v_{o1} เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม จากรูปที่ 4.10 (ข) จะมีขนาดเป็น

$$V_{o1} = V_{TH} - V_{TL} = 2\frac{R_1}{R_2}V_{sat}^{+}\,V_{p-p} \tag{4.23}$$

และเอาต์พุตของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ v_{o2} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม จากรูปที่ 4.10 (ข) จะมีขนาดเป็น

$$V_{o2} = 2V_{sat}^{+}\,V_{p-p} \tag{4.24}$$

ส่วนของวงจรประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมประกอบด้วย VR_1 ทำหน้าปรับลดขนาดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม v_{o1} ให้เหมาะสมที่จะป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรคูณสัญญาณ M_1 ซึ่งจะให้เอาต์พุต v_{om1} ที่มีขนาดเป็น

$$V_{om1} = -K_1V_{im1}^2\,V_{p-p} \tag{4.25}$$

ส่วนตัวคูณสัญญาณ M_2 รับอินพุตจากตัวคูณสัญญาณ M_1 มาทำการยกกำลังสองทำให้ได้เอาต์พุตที่มีขนาดเป็น

$$V_{om2} = -K_2K_1^2V_{im1}^4\,V_{p-p} \tag{4.26}$$

สำหรับออปแอมป์ A_5 ทำงานร่วมกับ R_3, R_4, R_5 และ R_6 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายผลต่างรับอินพุตมาจากตัวคูณสัญญาณ M_1 และ M_2 ส่วน C_1, D_1 และ V_R ทำหน้าที่เป็นวงจรแคลมป์สัญญาณเพื่อแคลมป์ค่าต่ำสุดของสัญญาณจากวงจรขยายผลต่างให้มีค่าอยู่ที่ระดับศูนย์โวลต์โดยมีออปแอมป์ A_6 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์เพื่อลดผลกระทบของภาระ

ส่วนออปแอมป์ A_7 ประกอบกับ R_7, R_8, R_9 และอนาลอกสวิตช์ S_1 ซึ่งรับสัญญาณ v_{o2} ที่ปรับลดค่าให้เหมาะสมด้วย VR_2 มาควบคุมการเปิดปิด ทำหน้าที่ร่วมกันเป็นวงจรขยายที่สลับค่าอัตราขยายระหว่าง +1 และ –1 ได้ ทำให้ได้เอาต์พุต v_{o3} ประมาณเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{o3} = 2(K_2K_1^2V_{im1}^4 - K_1V_{im1}^2)V_{p-p} \tag{4.27}$$

เมื่อกำหนดให้ R_3, R_4, R_5 และ R_6 มีค่าเท่ากัน โดยในที่นี้ K_1 และ K_2 คือค่าความไว (อัตราขยาย) ของตัวคูณสัญญาณ M_1 และ M_2 มีขนาด 1.2232 และ 0.1492 ตามลำดับ

เนื่องจากวงจรผลิตสัญญาณในรูปที่ 4.9 นี้ สัญญาณทั้ง 3 รูปแบบ คือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณรูปไซน์มีความถี่เท่ากันตามสมการ (4.22) ดังนั้นการปรับความถี่ของสัญญาณสามารถทำได้โดยการปรับค่าตัวต้านทาน R ซึ่งจะไม่มีผลกระทบต่อขนาดของสัญญาณแต่ประการใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผล

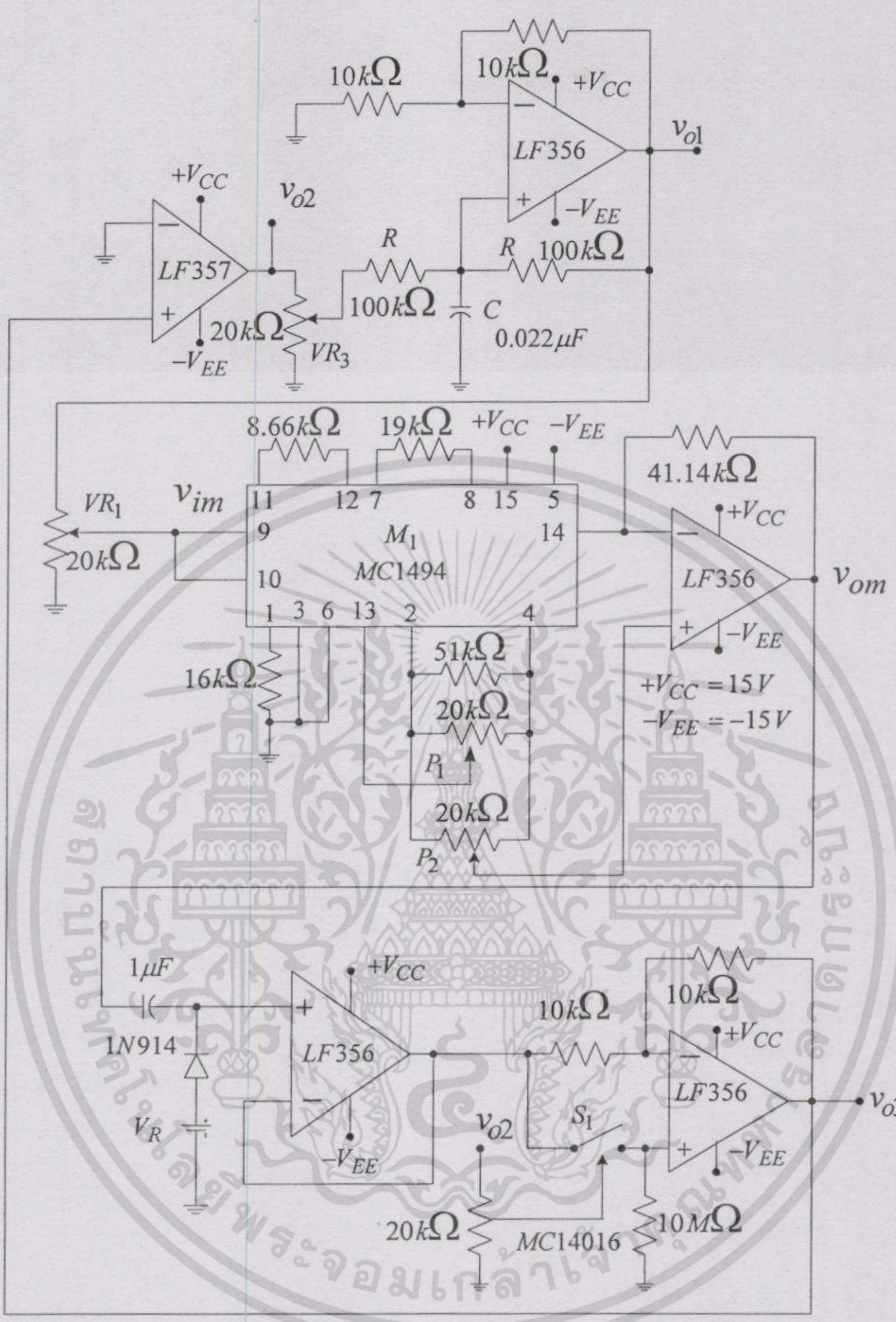
5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะนำเสนอการทดลอง เพื่อทดสอบสมรรถณะการทำงานของวงจรผลิตสัญญาณตามทฤษฎีที่ได้นำเสนอมาแล้ว โดยในการบันทึกผลการทดลองได้ใช้ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) แบบดิจิตอล (digital) ของบริษัท Tektronix รุ่น TDS-220 ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลจากหน้าจอไว้ในคอมพิวเตอร์ (computer) ได้ทั้งในลักษณะรูปสัญญาณและชุดตัวเลขด้วยความถี่ในการสุ่มข้อมูล $1GHz$ รายละเอียดในการทดลองมีดังต่อไปนี้

5.2 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ก)

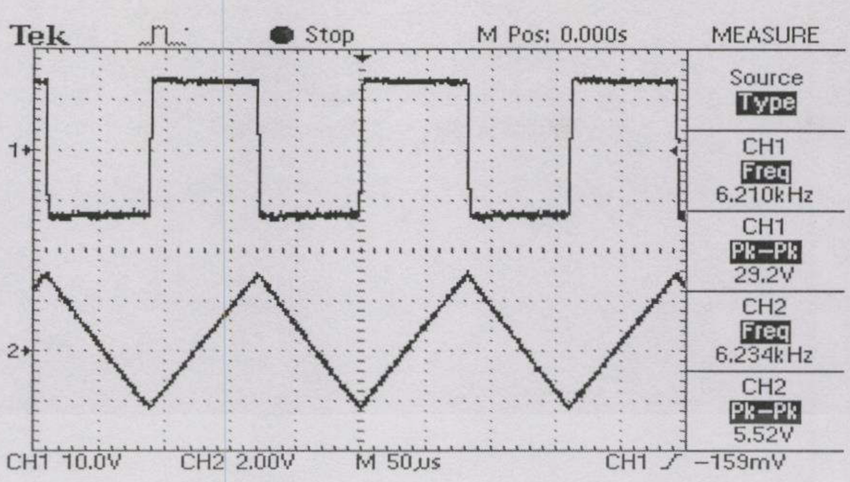
จากวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ก) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ได้ทำการต่อวงจรซึ่งใช้ไอซีและอุปกรณ์ค่าต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยก่อนที่จะทำการทดลองต้องปรับค่าออฟเซตของวงจรคูณสัญญาณให้เรียบร้อยก่อนแล้วจึงทำการปรับค่า V_R จนกว่าวงจรจะออสซิลเลต หลังจากนั้นจึงทำการปรับค่าตัวต้านทาน R ทั้งสองตัวพร้อมกันจนกว่าจะได้ความถี่ของสัญญาณตามต้องการ ในการทดลองได้บันทึกรูปคลื่นสัญญาณต่างๆที่น่าสนใจ โดยในรูปที่ 5.2 (ก) ประกอบด้วย v_{o2} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมขนาด $29.2\,V_{p-p}$ และ v_{o1} เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมขนาด $5.52\,V_{p-p}$ ตามลำดับ โดยสัญญาณทั้งสองนี้มีความถี่ประมาณ $6.2kHz$ ส่วนสัญญาณในรูปที่ 5.2 (ข) ประกอบด้วยสัญญาณรูปพาราโบลาที่ได้จากวงจรแคลมป์สัญญาณขนาด $1.02\,V_{p-p}$ มีความถี่ $12.13kHz$ และ v_{o3} ซึ่งเป็นสัญญาณรูปไซน์ขนาด $2\,V_{p-p}$ มีความถี่ประมาณ $6.2kHz$ ตามลำดับ สำหรับในรูปที่ 5.2 (ค) แสดงสเปกตรัมกำลังของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 5.2 (ข) ที่เกิดขึ้นโดยการนำข้อมูลที่เป็นกลุ่มตัวเลขในรูปของไฟล์ที่ได้จากออสซิลโลสโคปมาพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB และทำการคำนวณค่า THD ได้ประมาณ 0.18% โดยใช้องค์ประกอบสเปกตรัมทั้งหมด 50 ฮาร์มอนิก ซึ่งค่า THD ที่ได้มีค่าแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจรขยายแบบสลับค่าอัตราขยายได้ซึ่งทำให้สัญญาณรูปไซน์ในซีกบวกและซีกลบมีขนาดไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดฮาร์มอนิกที่ 2 ขึ้นในสเปกตรัมของสัญญาณรูปไซน์ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ค) และยังทำให้เกิดมีรอยต่อที่เหลื่อมล้ำกันขึ้นซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 5.2 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

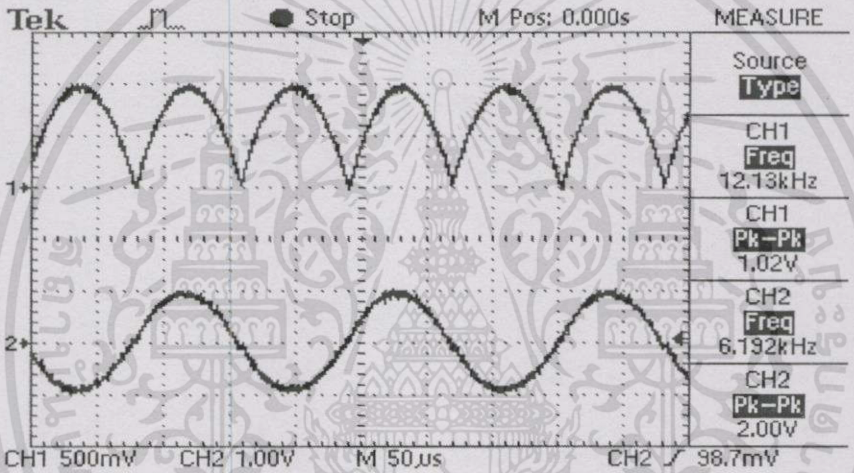


รูปที่ 5.1 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1(ก) ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 (ก) สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณรูปสามเหลี่ยม



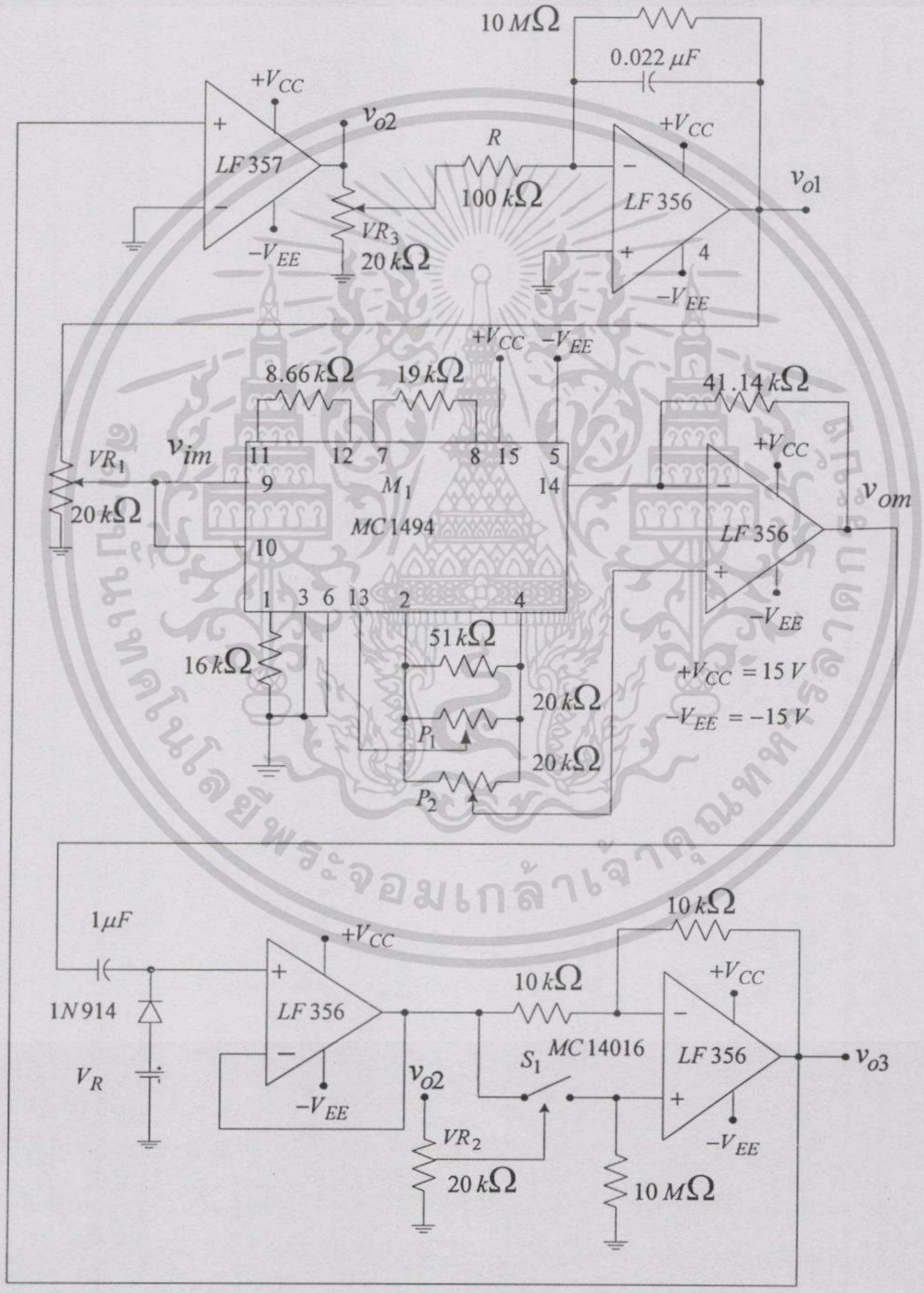
รูปที่ 5.2 (ข) สัญญาณรูปพาราโบลาและสัญญาณรูปไซน์

รูปที่ 5.2 (ค) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 5.2 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

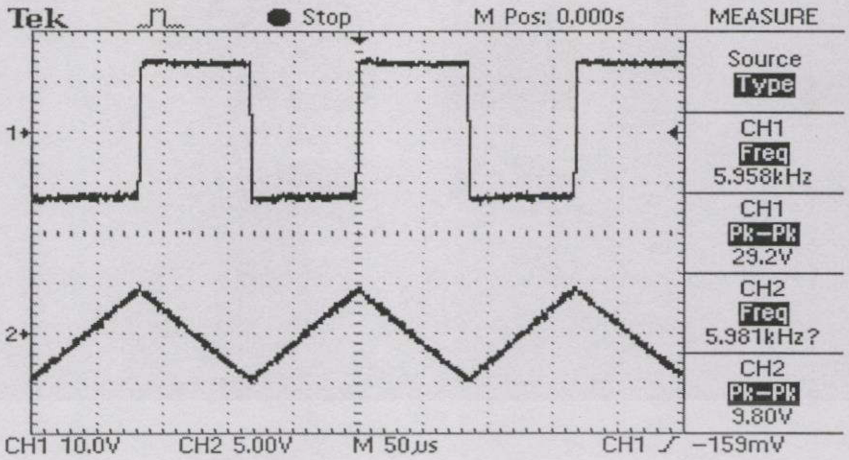
5.3 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ข)

จากวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1(ข) ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อได้ทำการต่อวงจรด้วยไอซีและอุปกรณ์ค่าต่างๆ จะได้วงจรดังแสดงในรูปที่ 5.3 สำหรับการทดลองก็ทำเช่นเดียวกันกับวงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ก) โดยได้ทำการบันทึกรูปสัญญาณเอาต์พุตต่างๆ ซึ่งในรูปที่ 5.4 (ก) ประกอบด้วย v_{o2} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมขนาด 29.2 V_{p-p} และ v_{o1} เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

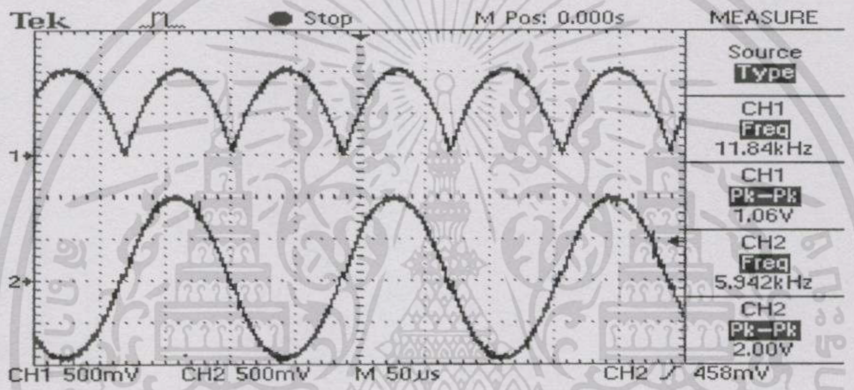


รูปที่ 5.3 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 1 (ข) ที่ใช้ในการทดลอง

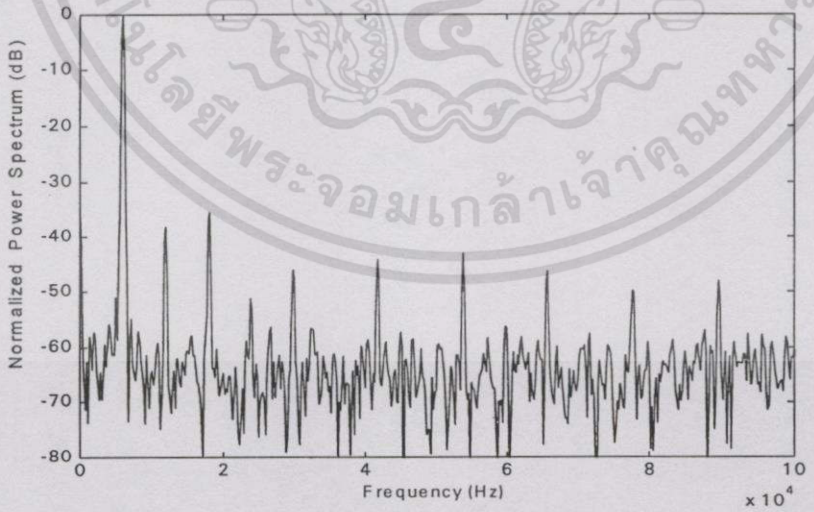
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 (ก) สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 5.4 (ข) สัญญาณรูปพาราโบลาและสัญญาณรูปไซน์



รูปที่ 5.4 (ค) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 5.4 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

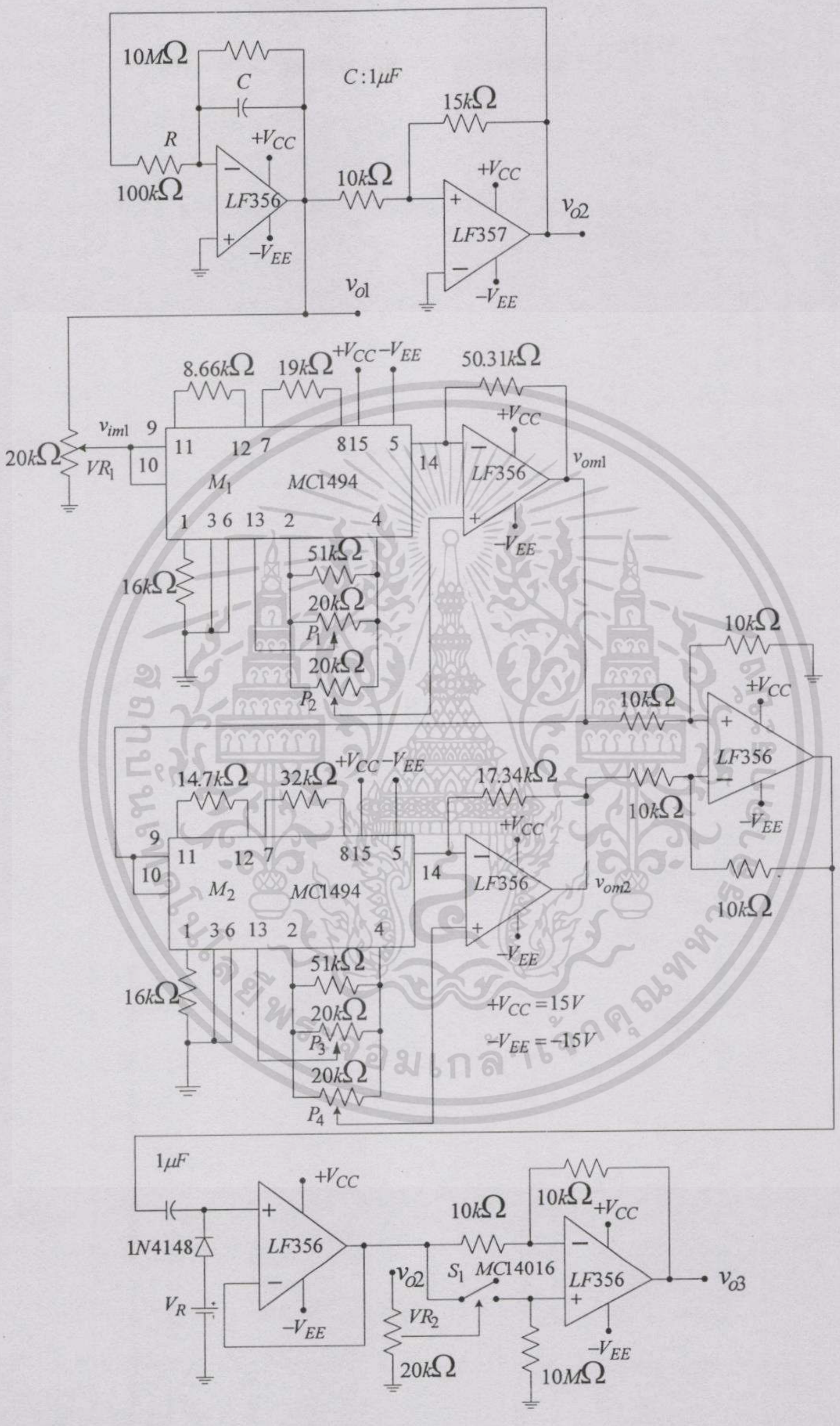
ขนาด $9.8\,V_{p-p}$ ตามลำดับ โดยสัญญาณทั้งสองมีความถี่ประมาณ $6kHz$ ส่วนในรูปที่ 5.4 (ข) ประกอบด้วยสัญญาณรูปพาราโบลาที่ได้จากวงจรแคลมป์สัญญาณมีขนาด $1.06\,V_{p-p}$ ที่ความถี่ประมาณ $12kHz$ และ v_{o3} เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาด $2\,V_{p-p}$ ที่ความถี่ประมาณ $6kHz$ ตามลำดับ และในรูปที่ 5.4 (ค) ได้แสดงรูปสเปกตรัมกำลังของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 5.4 (ข) ซึ่งเมื่ออาศัยวิธีการเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.2 สามารถคำนวณค่า THD ได้ประมาณ 0.17% ซึ่งเป็นค่าที่แตกต่างจากค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีโดยมีสาเหตุเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.2

5.4 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2

ในการทดลองได้ต่อวงจรผลิตสัญญาณตามแผนผังวงจรในรูปที่ 4.9 ขึ้นมาโดยใช้ไอซีและอุปกรณ์ค่าต่างๆดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5.5 โดยได้บันทึกสัญญาณเอาต์พุตรูปแบบต่างๆ ด้วยวิธีการทดลองเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 5.2 ซึ่งสัญญาณในรูปที่ 5.6 (ก) ประกอบด้วย v_{o1} เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีขนาด $20\,V_{p-p}$ และ v_{o2} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาด $29.6\,V_{p-p}$ ตามลำดับ โดยสัญญาณทั้งสองมีความถี่ประมาณ $10kHz$ ส่วนสัญญาณในรูปที่ 5.6 (ข) นั้นประกอบด้วยสัญญาณรูปพาราโบลาที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรแคลมป์สัญญาณที่มีขนาด $1.05\,V_{p-p}$ ที่ความถี่ประมาณ $20kHz$ และ v_{o3} เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาด $2\,V_{p-p}$ และความถี่ประมาณ $10kHz$ ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 5.6 (ค) เป็นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 5.6 (ข) นอกจากนี้สัญญาณรูปไซน์สามารถคำนวณค่า THD ได้ประมาณ 0.02% ซึ่งมีค่าที่แตกต่างจากค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎีพอสมควร ทั้งนี้สาเหตุส่วนหนึ่งก็เหมือนกับในหัวข้อที่ 5.2 และยังมีผลมาจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจรคูณสัญญาณทั้งสองด้วย

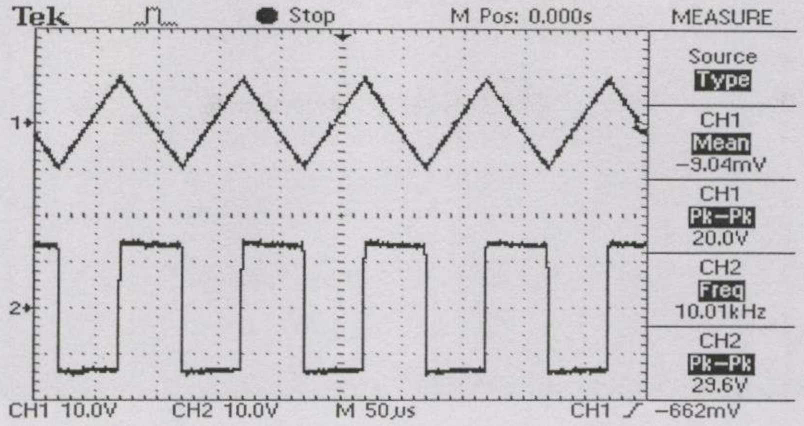
สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเอาต์พุตทั้งสามกับความถี่แสดงด้วยกราฟดังในรูปที่ 5.7 (ก) ซึ่งได้ทำการวัดขนาดของ v_{o1} ซึ่งเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและ v_{o2} ซึ่งเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมในช่วงความถี่ $10\,Hz$ ถึง $70\,kHz$ พบว่า สัญญาณทั้งสองมีขนาดคงที่ดีในย่านความถี่ $10\,Hz$ ถึงประมาณ $25\,kHz$ อย่างไรก็ตาม ขนาดของสัญญาณทั้งสองจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความถี่สูงขึ้นกว่านี้และจะมีรูปร่างและขนาดผิดเพี้ยนไปเมื่อความถี่สูงกว่า $70\,kHz$ ขึ้นไป ทั้งนี้เนื่องจากขีดจำกัดของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ ส่วนในรูปที่ 5.7 (ข) ได้ทำการวัดขนาดของสัญญาณรูปไซน์ที่ระดับ $0.5V_{p-p}$, $2V_{p-p}$, $8V_{p-p}$ และ $18\,V_{p-p}$ ในขณะที่เปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในช่วง $10\,Hz$ ถึง $30\,kHz$ ด้วยการปรับค่าตัวต้านทาน R พบว่า สัญญาณรูปไซน์มีขนาดคงที่ดีในย่านความถี่ $10\,Hz$ ถึงประมาณ $25\,kHz$ ส่วนในย่านความถี่สูงกว่านี้ สัญญาณรูปไซน์จะเริ่มมีขนาดเพิ่มขึ้นตามสัญญาณรูปสามเหลี่ยมจนกระทั่งที่ความถี่สูงกว่า $30\,kHz$ จะมีรูปร่างและขนาดผิดเพี้ยนไป ทั้งนี้เนื่องจากขีดจำกัดของวงจรคูณสัญญาณที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

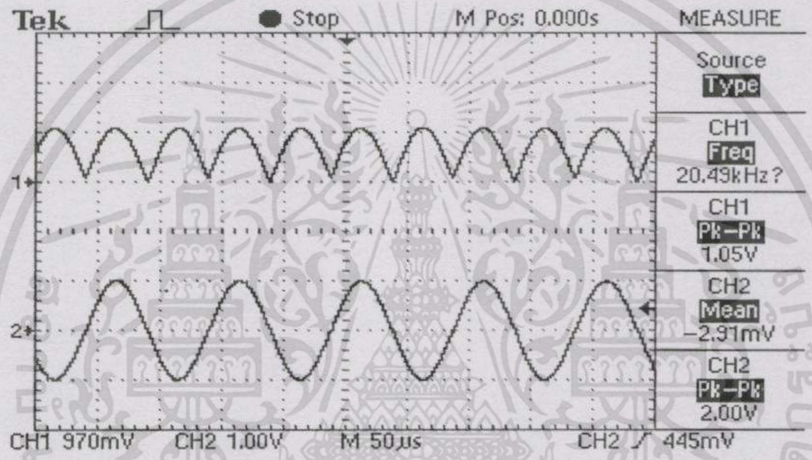


รูปที่ 5.5 วงจรผลิตสัญญาณรูปแบบที่ 2 ที่ใช้ในการทดลอง

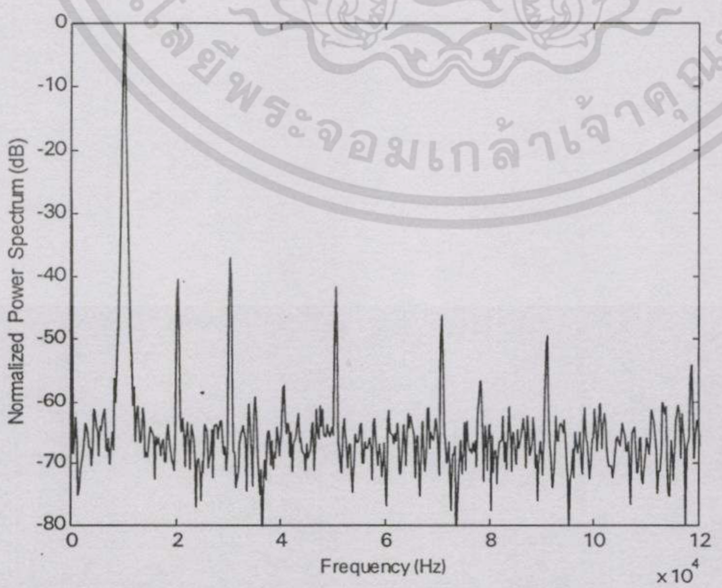
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 (ก) สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

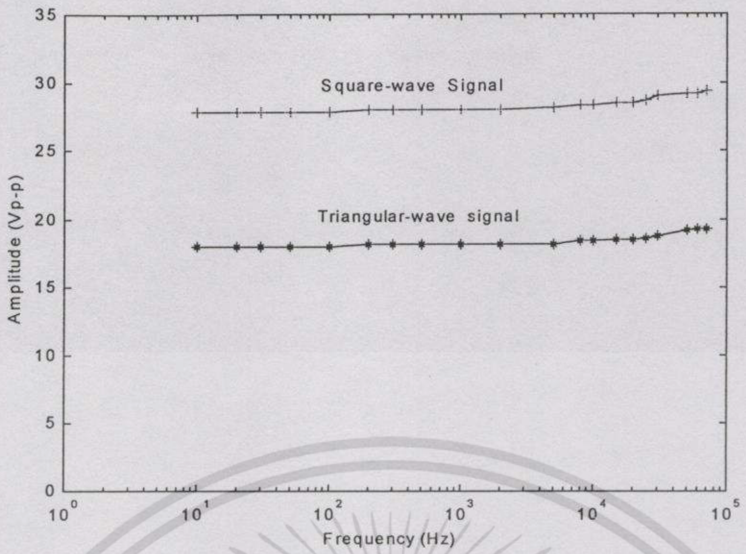


รูปที่ 5.6 (ข) สัญญาณรูปพาราโบลาและสัญญาณรูปไซน์

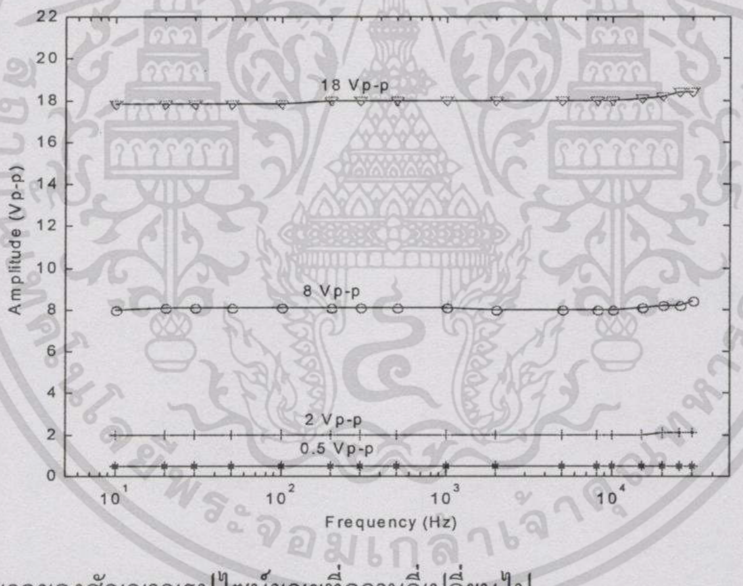


รูปที่ 5.6 (ค) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณรูปไซน์ในรูปที่ 5.6 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 (ก) ขนาดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป



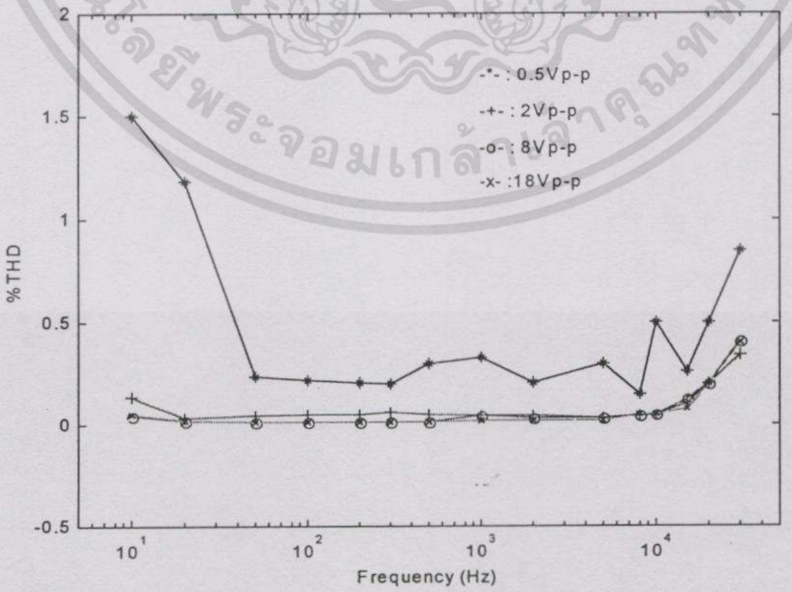
รูปที่ 5.7 (ข) ขนาดของสัญญาณรูปไซน์ขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป

นอกจากนี้เมื่อนำสัญญาณรูปไซน์ที่ระดับ $0.5V_{p-p}$, $2V_{p-p}$, $8V_{p-p}$ และ $18V_{p-p}$ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5.7 (ข) มาทำการคำนวณหาค่า THD ด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.2จะได้ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตกราฟจะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.8 จะเห็นว่า ที่ระดับ $0.5V_{p-p}$ จะมีค่า THD ค่อนข้างสูงตลอดย่านความถี่ดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากรอยต่อระหว่างซีกบวกและซีกลบของสัญญาณรูปไซน์ปรากฏเหลื่อมกันเด่นชัดขึ้นและมีสัดส่วนที่สูงเมื่อเทียบกับขนาดของสัญญาณรูปไซน์นี้ ส่วนสัญญาณรูปไซน์ที่ระดับ $2V_{p-p}$, $8V_{p-p}$ และ $18V_{p-p}$ ค่า THD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ขณะที่ความถี่เปลี่ยนไป

ความถี่ (Hz)	%THD			
	ระดับ 0.5 Vp-p	ระดับ 2 Vp-p	ระดับ 8 Vp-p	ระดับ 18 Vp-p
10	1.5	0.14	0.04	0.05
20	1.18	0.03	0.02	0.02
50	0.24	0.04	0.01	0.01
100	0.22	0.05	0.01	0.01
200	0.21	0.05	0.01	0.01
300	0.2	0.06	0.01	0.01
500	0.3	0.05	0.01	0.01
1k	0.33	0.04	0.04	0.02
2k	0.21	0.04	0.03	0.02
5k	0.3	0.03	0.03	0.02
8k	0.15	0.04	0.04	0.05
10k	0.5	0.04	0.05	0.05
15k	0.26	0.11	0.13	0.08
20k	0.5	0.2	0.2	0.2
30k	0.85	0.34	0.41	0.4



รูปที่ 5.8 ค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ขณะความถี่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามค่าความถี่อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากขีดจำกัดของวงจรคูณสัญญาณและวงจรขยายแบบสลับค่าอัตราขยายได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการวิจัยเกี่ยวกับการสร้างวงจรผลิตสัญญาณที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกัน คือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณรูปไซน์ โดยอาศัยการประมาณสัญญารูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นโดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท เริ่มด้วยบทที่ 1 ได้กล่าวถึงปัญหาของการสร้างสัญญาณรูปไซน์ด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์แบบเชิงเส้นและข้อดีของการประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นเหตุจูงใจทำให้เกิดการค้นคว้าและวิจัยการสร้างวงจรผลิตสัญญาณที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ หลังจากนั้นในบทที่ 2 จึงได้กล่าวถึงหลักการและวงจรที่เคยนำเสนอซึ่งเกี่ยวข้องกับการประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม นอกจากนี้ยังได้แจกแจงถึงข้อด้อยของวิธีการเหล่านี้ ซึ่งเป็นเหตุให้นำเสนอแนวความคิดใหม่ที่ว่า สัญญาณรูปไซน์มีลักษณะเหมือนกับการนำส่วนโค้งพาราโบลาสองส่วนมาต่อกัน ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมได้ ส่วนในบทที่ 3 นั้นกล่าวถึงกลุ่มวงจรพื้นฐานที่จะนำไปสร้างวงจรผลิตสัญญาณตามหลักการที่นำเสนอต่อไป

สำหรับบทที่ 4 เป็นตัวเนื้อหาที่สำคัญของวิทยานิพนธ์นี้ เพราะได้กล่าวถึงการวิจัยสร้างวงจรผลิตสัญญาณที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกันดังกล่าวมาแล้ว โดยได้แบ่งวงจรออกเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน คือ รูปแบบแรกอาศัยวงจรตรวจจับข้ามศูนย์ วงจรอินทิเกรเตอร์และวงจรประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมทำงานร่วมกันในลักษณะลูปปิดของวงจรออสซิลเลเตอร์ ส่วนรูปแบบที่สองอาศัยวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (astable multivibrator) ที่ประกอบขึ้นจากวงจรอินทิเกรเตอร์แบบมิลเลอร์ (Miller's integrator) และวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ (schmitt trigger) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมขึ้นมาก่อนแล้วจึงนำสัญญาณรูปสามเหลี่ยมป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรประมาณสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า วิธีการที่นำเสนอนี้มีข้อดีกว่าวิธีการที่เคยนำเสนอมาแล้ว คือ นอกจากจะให้สัญญาณรูปไซน์ที่มีค่า THD ต่ำมากเพียง $5.02\times10^{-5}\%$ เท่านั้นแล้วยังสามารถสร้างวงจรขึ้นได้ง่ายด้วยเทคนิคที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อนอีกด้วย

ส่วนในบทที่ 5 ได้ทำการทดสอบสมรรถณะการทำงานของวงจรผลิตสัญญาณตามหลักการที่นำเสนอในบทที่ 4 ซึ่งผลการทดลองแสดงว่า โดยขีดจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ วงจรสามารถทำงานได้ตามหลักการที่นำเสนอได้ดีในย่านความถี่เสียง วงจรเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในห้องทดลองหรือประกอบการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการประมวลสัญญาณอนาลอกและในการใช้งานวงจรแคลมป์สัญญาณต้องป้อนสัญญาณอินพุตที่มีขนาดมากพอที่จะทำให้ไดโอดได้รับไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรง ตามทฤษฎีแล้ว ถ้าอุปกรณ์ที่ใช้มีผลตอบสนองที่ไวก็จะทำให้วงจรทำงานได้ดีในย่านความถี่ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ถ้าพิจารณาให้ดีจะเห็นว่า หลักการที่นำเสนอน่าจะมีความดึงดูดใจ โดยเฉพาะเรื่องการพัฒนาสร้างเป็นวงจรรวมเนื่องจากวงจรที่นำเสนอถ้าสร้างเป็นวงจรรวมแล้วจะถือได้ว่ามีความซับซ้อนน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Sedra A. S. and Smith K. C. **Microelectronic Circuits**. 4th Ed. New York : Oxford University Press. 1998.

[2] Paull C. J. and Evans W. A. "Waveform shaping for the design of signal sources." The Radio and Electronic Engineer. vol. 44, no. 10, Oct. 1974. pp. 523-532.

[3] Franco S. **Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits**. Singapore : McGraw-Hill. 1988.

[4] Williams A. B. **Designer's Handbook of Integrated Circuits.** New York : McGraw-Hill. 1984.

[5] Graeme J. G. et. al. **Operational Amplifiers Design and Applications.** Singapore : McGraw-Hill. 1981.

[6] Jacob J. M. **Applications and Design with Analog Integrated Circuits**. 2nd Ed. Englewood Cliffs : Prentice-Hall. 1993.

[7] Evans W. A. and Schiffer V. "Approximations in sinewave generation and synthesis." The Radio and Electronic Engineer. vol. 48, no. 3, Mar. 1978. pp. 113-121.

[8] Grebene A. B. "Monolithic waveform generation." IEEE. Spectrum. vol. 9, Apr. 1972. pp. 34-40.

[9] Meyer R. G. et. al. "The differential pair as a triangle-sine wave converter." IEEE. Solid-State Circuits. vol. SC-11, no. 3, Jun. 1976. pp. 418-420.

[10] Fattaruso J. W. and Meyer R. G. "Triangle-to-Sine Wave Conversion with MOS Technology." IEEE. Solid-State Circuits. vol. SC-20, no. 2, Apr. 1985. pp. 623-631.

[11] Tang Z. et. al. "MOS triangle-to-sine wave converter based on subthreshold operation." Electron. Lett. vol. 26, no. 23, Nov. 1990. pp. 1983-1985.

[12] Allen P. E. and Holberg D. R. **CMOS Analog Circuit Design.** New York : Oxford University Press. 1987.

[13] Stremler F. G. **Introduction to communication systems.** Reading Mass. : Addison-Wesley. 1977.

[14] Mauro R. **Engineering Electronics A Practical Approach.** Englewood Cliffs : Prentice-Hall. 1989.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] Savant C. J. et. al. **Electronic Design Circuits and Systems.** 2nd. Ed. California : The Benjamin / Cummings Publishing Company. 1991.

[16] Gayakwad R. A. **Op-amps and linear integrated circuits.** 2nd. Ed. Englewood Cliffs : Prentice-Hall. 1989.

[17] วินัย ศิลารวม, วิวัฒน์ กิรานนท์, ปราโมทย์ วาดเขียนและจริยา เลิศจรัสอร่ามดี. "วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ผลิตสัญญาณ 3 รูปแบบ." เอกสารรวมเล่มการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 20, 2540. หน้า 801-805.

[18] วินัย ศิลารวม, จริยา เลิศจรัสอร่ามดีและวิภา แสงพิสิทธิ์. "วงจรผลิตสัญญาณอย่างง่ายโดยการประมาณสัญญาณไซน์จากสัญญาณสามเหลี่ยม." วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2541. หน้า 66-71.

[19] Biran A. and Breiner M. **MATLAB for Engineers.** Workingham : Addison-Wesley. 1995.

[20] วิวัฒน์ กิรานนท์. **วิศวกรรมการสื่อสาร.** กรุงเทพฯ : อักษรสยามการพิมพ์. 2540.

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปไซน์

การบอกความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปไซน์นิยมกำหนดด้วยค่า THD (total harmonic distortion) [13] ซึ่งทำได้โดยการหาค่าอัตราส่วนของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่เป็นฮาร์มอนิกทั้งหมดยกเว้นฮาร์มอนิกที่ 1 ต่อกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่เป็นฮาร์มอนิกที่ 1 ซึ่งค่า THD นี้แทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เป็น

$$THD = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} c_n^2}{c_1^2} \qquad (ก.1)$$

โดยที่ c_1 และ c_n เป็นขนาดของสัญญาณที่เป็นฮาร์มอนิกที่ 1 และฮาร์มอนิกที่ n ตามลำดับ อย่างไรก็ดี การคำนวณหาค่าของเทอม $\sum_{n=2}^{\infty} c_n^2$ เป็นเรื่องที่ยุ่งยาก ดังนั้น เมื่ออาศัยทฤษฎีของพาร์เซวาล (Parseval's theorem) [20] มาช่วยจะได้ว่า

$$THD = \frac{2P}{c_1^2} - 1 \qquad (ก.2)$$

โดยที่ P คือกำลังเฉลี่ยของสัญญาณ $f(t)$ ที่มีคาบเวลา T วินาทีที่จะนำมาคำนวณหาค่า THD ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (ก.3) คือ

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T |f(t)|^2 dt \qquad (ก.3)$$

ดังนั้น เมื่ออาศัยความสัมพันธ์ของสมการ (ก.2) และสมการ (ก.3) จึงทำให้สามารถคำนวณหาค่า THD ได้สะดวกขึ้น สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ การคำนวณหาค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ที่ประมาณได้จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 เมื่อสัญญาณรูปไซน์ที่จะนำมาคำนวณหาค่า THD เป็นไปตามสมการ (ก.4) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(t)=\begin{cases}\left(\frac{aT}{4}\right)^2\left[1-\left(\frac{4}{T}\right)^2t^2\right] & -\frac{T}{4}<t<\frac{T}{4}\\ \left(\frac{aT}{4}\right)^2\left[-1+\left(\frac{4}{T}\right)^2\left(t-\frac{T}{2}\right)^2\right] & \frac{T}{4}<t<\frac{3T}{4}\end{cases} \qquad (ก.4)$$

โดยที่ a เป็นค่าคงที่ จากสมการ (ก.4) เมื่อทำการกระจายอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) จะได้ว่า

$$f(t)=2\frac{a^2T^2}{\pi^3}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(n\pi/2)}{n^3}\cos(\frac{2\pi n}{T}t) \qquad (ก.5)$$

ดังนั้นจะได้ขนาดของสัญญาณที่เป็นฮาร์มอนิกที่ 1 เป็น

$$c_1=2\frac{a^2T^2}{\pi^3} \qquad (ก.6)$$

และเมื่อนำสมการ (ก.4) แทนในสมการ (ก.3) ก็จะได้กำลังเฉลี่ยเป็น

$$P=\frac{a^4T^4}{480} \qquad (ก.7)$$

เพราะฉะนั้นเมื่อนำสมการ (ก.6)และสมการ (ก.7) แทนลงในสมการ (ก.2) จึงได้ค่า THD เป็น

$$THD=\frac{2\frac{a^4T^4}{480}}{(2\frac{a^2T^2}{\pi^3})^2}-1$$
$$=0.145\% \qquad (ก.8)$$

กรณีที่ 2 เมื่อสัญญาณรูปไซน์ที่จะนำมาคำนวณหาค่า THD เป็นไปตามสมการ (ก.9) คือ

$$f(t)=\begin{cases}\left(\frac{aT}{4}\right)^2\left[1-\alpha\left(\frac{4}{T}\right)^2t^2+(\alpha-1)\left(\frac{4}{T}\right)^4t^4\right] & -\frac{T}{4}<t<\frac{T}{4}\\ \left(\frac{aT}{4}\right)^2\left[-1+\alpha\left(\frac{4}{T}\right)^2\left(t-\frac{T}{2}\right)^2-(\alpha-1)\left(\frac{4}{T}\right)^4\left(t-\frac{T}{2}\right)^4\right] & \frac{T}{4}<t<\frac{3T}{4}\end{cases} \qquad (ก.9)$$

โดยที่ a และ α เป็นค่าคงที่ จากสมการ (ก.9) เมื่อทำการกระจายอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(t) = 2\frac{a^2T^2}{\pi^5}\sum_{n=1}^{\infty}[(6-5\alpha)(n\pi)^2 + 48(\alpha-1)]\frac{\sin(n\pi/2)}{n^5}\cos(\frac{2\pi n}{T}t) \qquad (ก.10)$$

ดังนั้นจะได้ขนาดของสัญญาณที่เป็นฮาร์มอนิกที่ 1 เป็น

$$c_1 = 2\frac{a^2T^2}{\pi^5}[(6-5\alpha)\pi^2 + 48(\alpha-1)] \qquad (ก.11)$$

และเมื่อนำสมการ (ก.9) แทนในสมการ (ก.3) ก็จะได้กำลังเฉลี่ยเป็น

$$P = 2\frac{a^4T^4}{20160}(\alpha^2 - 8\alpha + 28) \qquad (ก.12)$$

ในทำนองเดียวกันกับกรณีที่ 1 เมื่อนำสมการ (ก.11)และสมการ (ก.12) แทนลงในสมการ (ก.2) ก็จะได้ค่า THD เป็น

$$\begin{aligned} THD &= \frac{4\frac{a^4T^4}{20160}(\alpha^2 - 8\alpha + 28)}{4\frac{a^4T^4}{\pi^{10}}[(6-5\alpha)\pi^2 + 48(\alpha-1)]^2} - 1 \\ &= \frac{\pi^{10}(\alpha^2 - 8\alpha + 28)}{20160[(6\pi^2 - 48) + (48 - 5\pi^2)\alpha]^2} - 1 \end{aligned} \qquad (ก.13)$$

จากสมการ (ก.13) เห็นได้ว่า ค่า THD ขึ้นอยู่กับ α เนื่องจากต้องการค่า THD ต่ำสุดที่สัมพันธ์กับ α ซึ่งทำได้โดยการแก้สมการต่อไปนี้ คือ

$$\frac{d}{d\alpha}THD = 0 \qquad (ก.14)$$

ซึ่งจะได้ค่า $\alpha = 1.2232$ เมื่อแทนค่าในสมการ (ก.13) จะได้ค่า THD เท่ากับ $5.02 \times 10^{-5}\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ผลิตสัญญาณ 3 รูปแบบ

A three-waveform oscillator

วินัย ศิลารวม วิวัฒน์ กิรานนท์ ปราโมทย์ วาดเขียน และ จริยา เลิศจรัสอร่ามดี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร. (02) 326-9967

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอการสร้างออสซิลเลเตอร์แบบง่ายที่ผลิตสัญญาณ 3 รูปแบบ คือ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยมและสัญญาณที่ประมาณรูปไซน์ได้ในเวลาเดียวกัน โดยค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์มีค่าตามทฤษฎีเท่ากับ 0.145% วงจรทำงานได้ดีในย่านความถี่เสียง

Abstract

A three-waveform oscillator is proposed. The oscillator is able to produce square wave, triangular wave and nearly sinusoidal wave, simultaneously. The THD of the sinusoidal wave is 0.145% (in principle). The circuit works well in the audio frequency range.

1.บทนำ

เครื่องกำเนิดสัญญาณนับว่าเป็นสิ่งสำคัญที่จะขาดเสียมิได้ในห้องทดลองทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการประมาณว่าสัญญาณรูปไซน์นั้นมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณในรูปพาราโบลิก (parabolic waveform) จะทำให้สามารถสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ที่มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม และสัญญาณรูปไซน์ได้ในเวลาเดียวกัน ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีไอซี (IC : integrated circuit) ที่สามารถสร้างสัญญาณทั้ง 3 ได้ ขายอยู่หลายเบอร์ แต่เมื่อดูโครงสร้างภายในแล้วจะพบว่า วงจรมีความยุ่งยากซับซ้อน โดยเฉพาะส่วนที่แปลงสัญญาณจากสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งจะพบว่าวงจรส่วนนี้จะใช้กลุ่มของทรานซิสเตอร์หรือไดโอดจำนวนมาก วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ได้นำเสนอนี้ถ้าดูในลักษณะอุปกรณ์ที่เป็นส่วน ๆ แล้วอาจจะดูว่ามีส่วนประกอบมาก แต่ถ้าพิจารณาให้ดีจะเห็นว่า จำนวนอุปกรณ์ที่มีนั้น ถ้าสร้างเป็นวงจรรวมแล้วจะถือได้ว่ามีความซับซ้อนน้อยมาก หลักการที่นำเสนอน่าจะมีความคุ้มค่าใจทั้งในแง่ของทฤษฎีและปฏิบัติ โดยเฉพาะในเรื่องที่จะพัฒนาส่วนประกอบของวงจรรวม

บทความนี้ได้แสดงผลทั้งจากการเลียนแบบจากโปรแกรมโดยใช้ MATLAB และผลจากการต่อวงจรจริง

2.แนวความคิดและหลักการ

เป็นที่ทราบกันดีว่า ส่วนโค้งพาราโบลิก (parabolic section) สามารถใช้ประมาณฟังก์ชันรูปไซน์ได้ กล่าวคือ เราอาจประมาณสัญญาณรูปไซน์ได้ดังนี้ คือ

$$f_1(t) = \begin{cases} (\frac{aT}{4})^2\left\{(\frac{4}{T})^2 t^2 - 1\right\} & \frac{-T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ (\frac{aT}{4})^2\left\{1 - (\frac{4}{T})^2 (t - \frac{T}{2})^2\right\} & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \quad (1)$$

$$\approx -(\frac{aT}{4})^2 \cos(\frac{2\pi}{T} t)$$

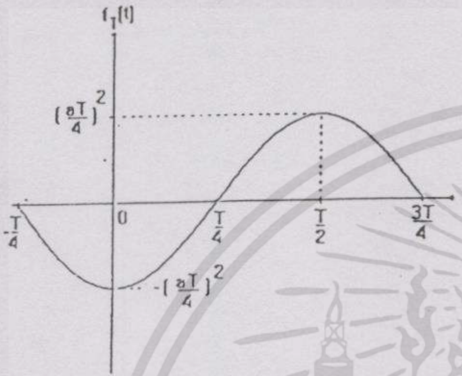
ในที่นี้ a เป็นค่าคงที่ และ T คือ ค่าคาบเวลาของสัญญาณ $f_1(t)$ ซึ่งค่าสัญญาณ $f_1(t)$ ตามสมการ (1) นี้จะให้ค่าผิดพลาดค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะกล่าวถึงการวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดนี้ในหัวข้อที่ 4 ต่อไป

เนื่องจาก $f_1(t)$ เป็นฟังก์ชันของเวลา ดังนั้นอาจจะคิดได้ว่าสัญญาณ $f_1(t)$ นี้สามารถผลิตได้จากการประมวลผลของสมการซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาดังเช่น $f_2(t)$ ตามสมการ (2) ได้

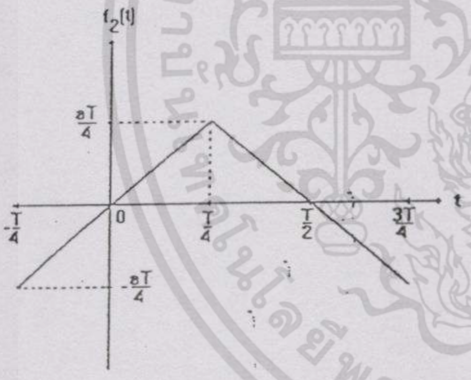
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_2(t) = \begin{cases} at & \frac{-T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ -a(t-\frac{T}{2}) & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \qquad (2)$$

รูปร่างของ $f_1(t)$ และ $f_2(t)$ จะมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 1ก และรูปที่ 1ข ตามลำดับ



รูปที่ 1ก สัญญาณ $f_1(t)$



รูปที่ 1ข สัญญาณ $f_2(t)$

เป็นที่น่าสังเกตว่า ถ้าเราหาค่าฟังก์ชันที่แสดงเครื่องหมายของ $f_1(t)$ ตามสมการ (1) จะได้

$$Sgn\{f_1(t)\} = \begin{cases} -1 & \frac{-T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ 1 & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \qquad (3)$$

ในขณะเดียวกัน เมื่อเราทำการหาค่าอนุพันธ์ของ $f_2(t)$ เมื่อเทียบกับเวลา เราจะได้

$$\dot{f_2}(t) = \begin{cases} a & \frac{-T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ -a & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \qquad (4)$$

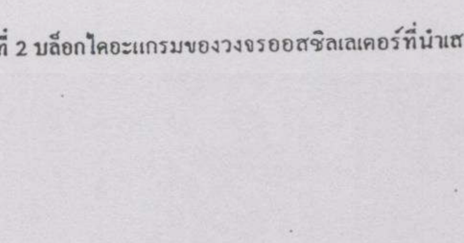
ดังนั้นเมื่อเทียบสมการ (3) กับสมการ (4) จะได้

$$f_3(t) = \dot{f_2}(t) = -a\,Sgn\{f_1(t)\} \qquad (5)$$

หรือ

$$f_2(t) = -a\int_0^t Sgn\{f_1(t)\}dt + v_0 \qquad (6)$$

โดยในที่นี้ v_0 คือค่าเริ่มต้นของการอินทิเกรตในสมการ (6) โดยสมการ (6) บอกให้เรารู้ว่า $f_2(t)$ นั้นสามารถสร้างขึ้นได้จากการอินทิเกรตค่าฟังก์ชันที่แสดงเครื่องหมายของ $f_1(t)$ ($Sgn\{f_1(t)\}$) ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการ (1), (2) และ (6) จะเห็นว่า ฟังก์ชันหรือสัญญาณ $f_1(t)$, $f_2(t)$ และ $f_3(t)$ เกิดเกี่ยวเนื่องกันอยู่ในลักษณะวงปิดที่ป้อนกลับในลักษณะของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่เรียกว่า conservative oscillator ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2



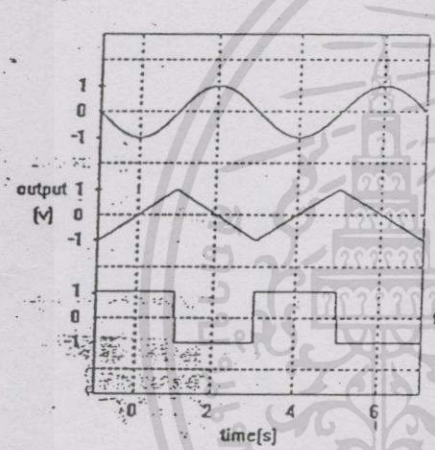
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นโครงสร้างตามรูปที่ 2 นี้จึงใช้เป็นต้นแบบในการสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ผลิตสัญญาณ $f_1(t)$, $f_2(t)$ และ $f_3(t)$ พร้อม ๆ กันในเวลาเดียวกันได้

3.ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วย MATLAB

จากหลักการที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่2 เราได้ทดลองเลียนแบบการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 2 ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่า $T=4$ s ค่าเริ่มต้นของการอินทิเกรตสัญญาณ คือ $V_0 = -1$ V และค่าอัตราขยาย a ของอินทิเกรเตอร์ คือ 1 จะได้รูปคลื่นตามจุดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการเลียนแบบคลื่นผลลัพธ์จากวงจรตามรูปที่ 2 ด้วย MATLAB

จากผลลัพธ์ที่ได้นี้ช่วยแสดงให้เห็นว่า วงจรออสซิลเลเตอร์ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็น 3 รูปแบบ คือ สัญญาณรูปไซน์ รูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมได้ตามต้องการ

4.การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปไซน์

การบอกความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปไซน์นิยมกำหนดด้วยค่า THD (Total Harmonic Distortion) [1] ทำได้โดยการหาค่าอัตราส่วนของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่เป็นฮาร์โมนิกทั้งหมด ยกเว้นคลื่นมูลฐาน (fundamental wave) ต่อกำลังเฉลี่ยของคลื่นมูลฐาน

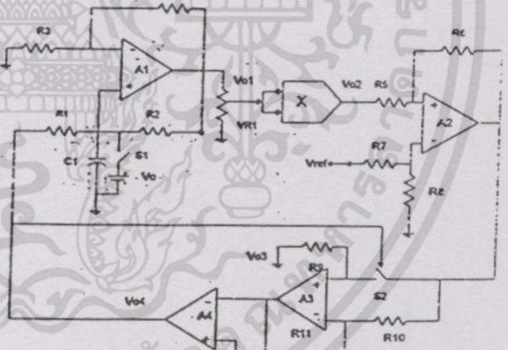
โดยการกระจายอนุกรมฟูริเยร์ของสัญญาณ ตามสมการ (1) จะได้

$$f_1(t) = 2(aT)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi/2)}{(n\pi)^3} \cos(\frac{2\pi n}{T} t) \qquad (7)$$

เมื่ออาศัย Parseval's relation มาช่วย [1] เราจะได้ค่า THD = 0.145% ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นค่าที่ต่ำ แสดงว่าสัญญาณที่ประมาณขึ้นเป็นสัญญาณรูปไซน์โดยวิธีการนี้มีความผิดเพี้ยนน้อยมาก อย่างไรก็ดีค่า THD ที่ได้นี้เป็นค่าทางทฤษฎี ทางปฏิบัตินั้นค่า THD อาจมีค่าเพิ่มขึ้นได้จากสาเหตุต่าง ๆ หลายประการขึ้นอยู่กับอุปกรณ์และวงจรที่ใช้

5.การออกแบบวงจร

จากหลักการที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2 สามารถนำมาเป็นแนวทางสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังวงจรออสซิลเลเตอร์

ในที่นี้ A_1 ประกอบร่วมกับ R_1 , R_2 , R_3 , R_4 และ C_1 ทำงานเป็นอินทิเกรเตอร์โดยมีสวิตช์ S_1 ทำหน้าที่ต่อแหล่งจ่าย V_0 ซึ่งกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับ C_1 โดยอินทิเกรเตอร์รับอินพุตมาจากเอาต์พุตของตัวเปรียบเทียบแรงดันแบบผ่านศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(zero crossing comparator) A_4 ซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับไฟเลี้ยงของวงจร เอาต์พุตของอินทิเกรเตอร์เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมจะถูกปรับขนาดโดย VR_1 เพื่อเป็นอินพุตที่เหมาะสมให้กับวงจรคูณสัญญาณซึ่งจะได้เอาต์พุตที่มีขนาด

$$V_{o2} = KV_{o1}^2 \qquad V_{p-p} \qquad (8)$$

ในที่นี้ K คือ อัตราขยายของวงจรคูณสัญญาณ V_{o1} คือ เอาต์พุตที่ได้จากการปรับ VR_1

A_2 ประกอบร่วมกับ R_5 , R_6 , R_7 และ R_8 ทำงานเป็นตัวเลื่อนระดับสัญญาณที่ได้จากวงจรคูณสัญญาณให้ค่าต่ำสุดของสัญญาณอยู่ที่ระดับศูนย์โวลต์โดยใช้ V_{ref} ส่วน A_3 ประกอบร่วมกับ R_9 , R_{10} , R_{11} และอนาลอกสวิตช์ S_2 ซึ่งรับสัญญาณมาจากตัวเปรียบเทียบแรงดัน A_4 มาควบคุมการเปิดปิด A_3 จะทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีอัตราขยาย +1 และ -1 สลับกันไปทำให้เกิดการจัดรูปสัญญาณจากวงจรเลื่อนระดับสัญญาณให้ประมาณเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาดตามสมการ (8) แล้วนำสัญญาณนี้ไปป้อนเป็นอินพุตให้ตัวเปรียบเทียบแรงดัน A_4 ซึ่งมีเอาต์พุตเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมมีขนาดเป็น

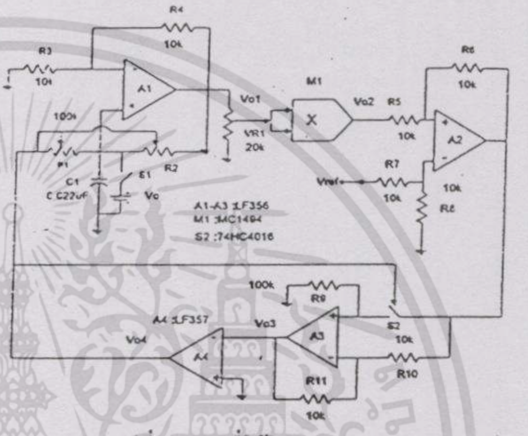
$$V_{o4} = 2V_{CC} \qquad V_{p-p} \qquad (9)$$

สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมตามสมการ (9) จะป้อนเป็นอินพุตให้กับอินทิเกรเตอร์ทำให้เกิดการทำงานเป็นวงรอบปิดของวงจรออสซิลเลเตอร์

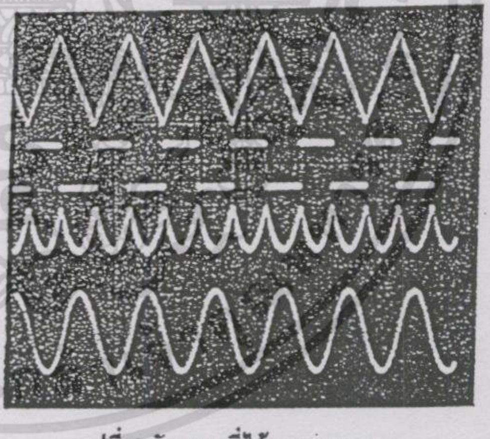
6.การทดลองและผล

การทดลองได้ต่อวงจรตามแผนผังรูปที่ 4 ขึ้นมาโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆดังรายละเอียดในรูปที่ 5 โดยใช้ออปแอมป์ (opamp)เบอร์ LF356 ไอซีอนาลอกสวิตช์เบอร์ 74HC4016 และไอซีตัวคูณสัญญาณเบอร์ MC1494 R_1และ R_2 เป็นตัวต้านทานแบบปรับค่าได้แบบแกนร่วมกันมีขนาด 100 กิโลโอห์ม และใช้ไฟเลี้ยงวงจร $\pm 12\,V$

เอาต์พุตต่างๆมีดังในรูปที่ 6 ประกอบด้วยสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{o1}) ขนาด 1 V_{P-P} สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (V_{o4}) ขนาด 10 V_{P-P} สัญญาณที่เกิดจากการคูณสัญญาณ (V_{o2}) ขนาด 1 V_{P-P} และสัญญาณรูปไซน์ (V_{o3}) ขนาด 2 V_{P-P} ที่ความถี่ประมาณ 1.3KHz โดยเรียงลำดับจากบนลงล่าง ขนาดของเอาต์พุตรูปไซน์ดังในรูปที่ 7 ได้ทำการวัดที่ระดับ 1 V_{P-P} , 3 V_{P-P} และ 5 V_{P-P} จะเห็นได้ว่า เมื่อปรับค่า R_1 และ R_2 พร้อมกันเพื่อเปลี่ยนความถี่ เอาต์พุตรูปไซน์มีขนาดคงที่ดีในย่านความถี่เสียง



รูปที่ 5 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

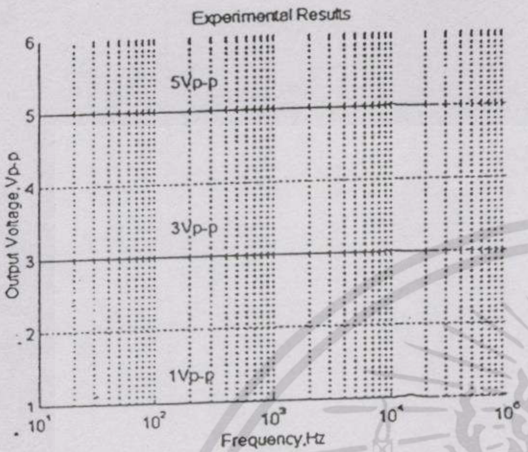


รูปที่ 6 สัญญาณที่ได้จากการทดลอง

ส่วนที่ความถี่สูงสัญญาณรูปไซน์จะมีรูปร่างและขนาดผิดเพี้ยนไปเนื่องจากขีดจำกัดของไอซีที่ใช้โดยเฉพาะที่อินทิเกรเตอร์ ในกรณีที่ทำการปรับความถี่เป็นช่วงกว้างมาก ๆ รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อของสัญญาณรูปไซน์ระหว่างซีกบวกและซีกลบจะปรากฏชัดเจนขึ้นแต่สามารถลดลงได้โดยการปรับออฟเซต (offset) ที่ตัวคูณสัญญาณ



รูปที่ 7 ขนาดของสัญญาณรูปไซน์เมื่อความถี่เปลี่ยน

7.สรุปและวิจารณ์

บทความนี้ได้เสนอการสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็น 3 รูปแบบคือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม และสัญญาณรูปไซน์พร้อม ๆ กัน โดยสัญญาณรูปไซน์มีค่า THD เพียง 0.145% ได้ทดลองทำการเลียนแบบวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB และทดลองต่อวงจรจริงซึ่งให้ผลตรงตามหลักการที่ได้นำเสนอ

เป็นที่น่าสังเกตว่า ค่าเริ่มต้น V_0 จะเป็นตัวกำหนดค่าขนาดของสัญญาณ และค่าอัตราขยาย a ของการอินทิเกรตจะเป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณ

ผลการทดลองแสดงว่าวงจรทำงานได้ดีในย่านความถี่เสียง คาดว่าวงจรและหลักการที่นำเสนอนี้ น่าจะนำไปใช้พัฒนาวงจรอื่น ๆ ที่สร้างสัญญาณในหลายรูปแบบได้

หนังสืออ้างอิง

[1] Ferrel G. Stremler, "Introduction to Commution System" ,Reading,Mass.: Addison-Wesley,1977,pp.38-40.

[2] Micheal Tooley, "The Maplin Electronic circuit Handbook, Second Edition",London :Butterworth-Heinemann,1995.

[3] Robert F. Coughlin, "Principles and Applications of Semiconductors and Circuits", Englewood Cliffs,N.J.: Prentice-Hall, 1971.

[4] C. J. Savant, Jr., Martin S. Roden and Gardon L. Carpenter. "Electronic design: Circuits and Systems,Second Edition", Reading,Mass.: Addison-Wesley,1991.

[5] Larry Jones and A. Foster chin, "Electronic Instruments and Measurements" ,New York : John Wiley & Sons, 1983.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรผลิตสัญญาณอย่างง่าย โดยการประมาณสัญญาณไซน์จากสัญญาณสามเหลี่ยม

A Simple Function Generator With Optimal Triangular-to-Sine Wave Converter.

วินัย ศิลารวม จริยา เลิศจรัสอร่ามดี และวิภา แสงพิสิทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างวงจรผลิตสัญญาณแบบง่ายที่ให้เอาต์พุต 3 รูปแบบพร้อมกัน คือ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยมและรูปไซน์ จุดเด่นของบทความนี้คือ การใช้แบบแผนที่จะบังเกิดผลดีที่สุดในการเปลี่ยนรูปสัญญาณสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งยืนยันได้เป็นอย่างดีจากผลของขบวนการวิเคราะห์ การเลียนแบบและการต่อวงจรจริง โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอนี้มีข้อดีกว่าวิธีการที่เคยนำเสนอมาแล้ว คือ นอกจากจะให้สัญญาณรูปไซน์ที่มีค่า THD ต่ำมากเพียง $5.02x10^{-5}$ % แล้วการสร้างวงจรใช้เทคนิคที่ทำให้วงจรมีลักษณะเรียบง่ายไม่ซับซ้อน ดังนั้น หลักการและวงจรที่นำเสนอนี้เป็นที่น่าดึงดูดใจอย่างมากในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

Abstract

A simple and effective function generator is proposed. The generator simultaneously produces rectangular, triangular and sinusoidal outputs. The focal point of this article is to use the optimization scheme, with respect to the total harmonic distortion, to transform a triangular waveform into an approximate sinusoid. The effectiveness of the method is verified by analytical procedures as well as simulation and circuit realization. The results show that the present method is superior to the existing methodologies in the literature for it offers not only an approximate sinusoid with as low distortion as $5.02x10^{-5}$ % but also a simple-to-implement circuit architecture. This makes the design technique very attractive for integrated circuit fabrication.

1. บทนำ

เครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นจะขาดเสียไม่ได้ในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า สัญญาณหลักที่เครื่องกำเนิดสัญญาณควรจะจ่ายได้ คือ สัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ดีควรจะสามารถจ่ายสัญญาณให้มีขนาดคงที่แม้ว่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม ในทางปฏิบัติวงจรซึ่งมักจะก่อปัญหาขึ้นก็คือ ส่วนของวงจรสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 14, No. 2, June 1998

สัญญาณรูปไซน์ โดยปกติแล้วนิยมสร้างสัญญาณดังกล่าวจากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม หลักการนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป [1-4] หว่าวงจรที่ออกแบบมีใช้งานกันอยู่นั้นเป็นวงจรซึ่งค่อนข้างซับซ้อนยุ่งยากและมักจะใช้ตัวอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นมาประกอบสร้างเป็นวงจร สำหรับวิธีการโดยละเอียดนั้นมีการนำเสนอใช้อยู่หลายวิธี ตัวอย่างวิธีที่ใช้กันแพร่หลาย เช่น การใช้ไดโอดเป็นอุปกรณ์หลักในการสร้างวงจร ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ Diode Breakpoint Method [1],[2] มีการนำเอาวิธีการนี้ไปใช้ในวงจรรวม (ไอซี) กำเนิดสัญญาณเบอร์ ICL8038 โดยมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (THD : Total Harmonic Distortion) 0.5% อย่างไรก็ตาม วิธีการใช้ไดโอดดังกล่าวนี้มีจุดด้อยว่าถ้าต้องการสร้างสัญญาณรูปไซน์ให้มีค่า THD ต่ำเพียงใดก็จะต้องใช้ไดโอดจำนวนเพิ่มมากขึ้นเป็นเงาตามตัวเพียงนั้น อีกวิธีการหนึ่งในการสร้างสัญญาณรูปไซน์มีชื่อเรียกว่า Logarithmic Wave Shaper [3],[4] มีการนำวิธีการนี้ไปใช้ในวงจรรวมกำเนิดสัญญาณเบอร์ XR2206 ซึ่งสามารถปรับให้ค่า THD ต่ำเพียง 0.4% กระนั้น ในทำนองเดียวกับวิธีการแรก วงจรที่สร้างโดยวิธีการนี้มีความซับซ้อนทั้งในด้านหลักการทางทฤษฎีและวงจรการออกแบบใช้งาน ต่อมาไม่นานนี้ สืบเนื่องมาจากการคำนึงถึงข้อบกพร่องของวงจรต่างๆดังกล่าวมาข้างต้น ได้มีการนำเสนอวิธีการหนึ่ง [5] ในการสร้างออสซิลเลเตอร์แบบที่รู้จักกันในนามว่า Conservative Oscillator วิธีการนำเสนอดังกล่าวมีหลักการพื้นฐานโดยอาศัยการสร้างสัญญาณรูปไซน์จากฟังก์ชันพาราโบลิกซึ่งสร้างง่ายๆจากการนำสัญญาณรูปสามเหลี่ยมมายกกำลังสอง วงจรที่สร้างจากหลักการนี้สามารถทำงานได้ดีและให้ค่า THD ต่ำเพียง 0.145% อย่างไรก็ดี วงจรนี้ยังคงมีข้อควรได้รับการพัฒนาปรับปรุงได้ บทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยใช้หลักการ Optimization เพื่อให้ค่า THD ของสัญญาณรูปไซน์ที่จะสร้างนั้นมีค่าต่ำที่สุด กล่าวคือ มีค่าเป็นศูนย์ในทางทฤษฎี แหล่งกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอในบทความนี้สามารถจ่ายได้ทั้งสัญญาณรูปไซน์ สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากส่วนของวงจรสร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมนั้นสามารถใช้วงจรพื้นฐานคือวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ (Schmitt trigger) และวงจรอินทิเกรเตอร์ (integrator) มาสร้างได้ ดังนั้น สาระสำคัญที่จะได้เน้นในบทความนี้คือ วิธีการประมาณและสร้างสัญญาณรูปไซน์จากสัญญาณรูปสามเหลี่ยม โดยการ Optimization ซึ่งมีแนวความคิดและหลักการดังจะได้แสดงในหัวข้อถัดไป หลังจากนี้จะได้แสดงผลการทดลองทั้งจากการเลียนแบบวงจรโดยใช้คอมพิวเตอร์และการทดลองวงจรจริง จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้ข้อสนับสนุนถึงประสิทธิภาพของหลักการซึ่งนำเสนอนี้ กล่าวคือ ค่า THD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำเพียง 5.02×10^{-3} % เท่านั้น อีกนัยหนึ่ง สัญญาณรูปไซน์ที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักการนี้เป็นสัญญาณที่ใกล้เคียงมากจนกล่าวได้ว่า แทบจะเป็นสัญญาณรูปไซน์แท้จริงและจากการออกแบบวงจรตามทฤษฎีโดยใช้เพียงวงจรคูณสัญญาณ (multiplier) ร่วมกับวงจรแคลมป์สัญญาณ (clamper) และวงจรขยายสัญญาณเท่านั้น ผลปรากฏได้ชัดเจนว่าวงจรมีความเรียบง่ายไม่ซับซ้อน จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นต้นแบบสร้างวงจรรวมกำเนิดสัญญาณได้เป็นอย่างดี

2. แนวความคิดและหลักการประมาณสัญญาณ

เป็นที่ทราบกันดีว่าส่วนโค้งพาราโบลิก (parabolic section) สามารถใช้ประมาณฟังก์ชันรูปไซน์ได้ กล่าวคือ

$$
f_1(t) = \begin{cases} (\frac{aT}{4})^2 [1 - \alpha (\frac{4}{T})^2 t^2 + (\alpha - 1)(\frac{4}{T})^4 t^4] & ; -\frac{T}{4} < t < \frac{T}{4} \\ -(\frac{aT}{4})^2 [1 - \alpha (\frac{4}{T})^2 (t - \frac{T}{2})^2 + (\alpha - 1) \times (\frac{4}{T})^4 (t - \frac{T}{2})^4] & ; \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4} \end{cases} \quad (1)
$$

$$
\approx (\frac{aT}{4})^2 \cos(\frac{2\pi}{T} t)
$$

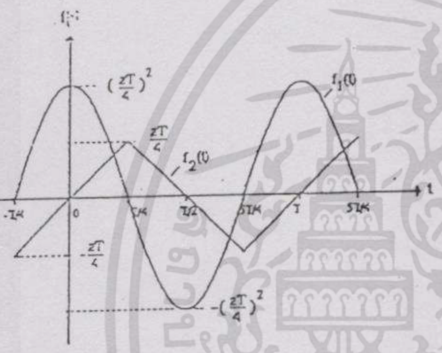
ในที่นี้ a และ α เป็นค่าคงที่ และ T คือค่าคาบเวลาของสัญญาณ $f_1(t)$ ดังนั้นอาจจะคิดได้ว่า สัญญาณ $f_1(t)$ นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถผลิตได้จากการประมวลผลของสมการที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเช่นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมตามสมการ (2) ได้ คือ

$$f_2(t)=\begin{cases} at & -\frac{T}{4}<t<\frac{T}{4} \\ -a(t-\frac{T}{2}) & \frac{T}{4}<t<\frac{3T}{4} \end{cases} \qquad (2)$$

ซึ่ง $f_1(t)$ และ $f_2(t)$ มีความสัมพันธ์กันดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f_1(t)$ และ $f_2(t)$

เพื่อทำให้ $f_1(t)$ มีค่า THD ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้นจากสมการ (1) ทำการกระจายอนุกรมฟูริเยร์ได้ดังนี้ คือ

$$f_3(t)=2a^2T^2\sum_{n=1}^{\infty}\left[(6-5\alpha)(n\pi)^2+48(\alpha-1)\right] \times\frac{\sin n\pi/2}{(n\pi)^5}\cos(\frac{2n\pi}{T}t) \qquad (3)$$

จากสมการ (3) เมื่ออาศัย Parseval's relation มาช่วย จะได้ว่า

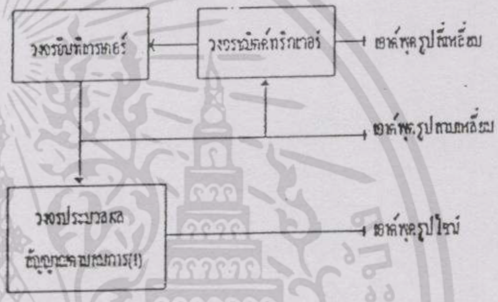
$$THD=\frac{\pi^{10}(\alpha^2-8\alpha+28)}{20160[(48-5\pi^2)\alpha+6\pi^2-48]^2}-1 \qquad (4)$$

เนื่องจากต้องการค่า THD ต่ำสุดที่สัมพันธ์กับค่า α จะทำได้โดยการแก้สมการต่อไปนี้คือ

$$\frac{d}{d\alpha}THD=0 \qquad (5)$$

ซึ่งจะได้ค่า α =1.2232 เมื่อนำกลับไปแทนในสมการ (4) จะได้ค่า THD เท่ากับ 5.02×10^{-5}% ถือได้ว่าเป็นค่าที่ต่ำมาก แสดงว่าฟังก์ชันที่ประมาณขึ้นได้เป็นฟังก์ชันรูปไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนน้อยมาก

แนวความคิดดังกล่าวสามารถนำมาสร้างบล็อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณได้ดังในรูปที่ 2



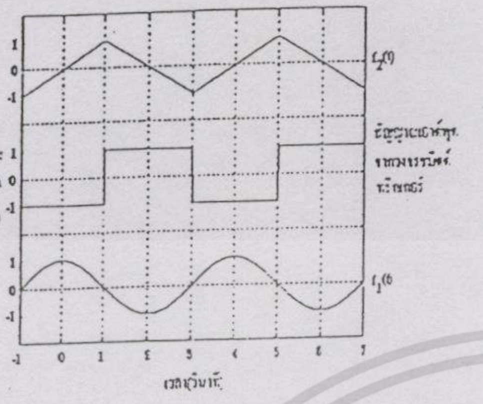
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอ

ดังนั้นจากโครงสร้างตามรูปที่ 2 นี้ สามารถนำไปเป็นต้นแบบในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณที่ผลิตสัญญาณรูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม และรูปไซน์ พร้อมๆ กันในเวลาเดียวกันได้

3. ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วย MATLAB

จากหลักการที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2 เราได้ทดลองเลียนแบบการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 2 ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดให้ T = 4 s ค่าอัตราขยายของอินทิเกรเตอร์ a = 1 และค่าเริ่มต้นของการอินทิเกรตสัญญาณ เท่ากับ -1 V จะได้รูปคลื่นสัญญาณต่างๆ ดังในรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

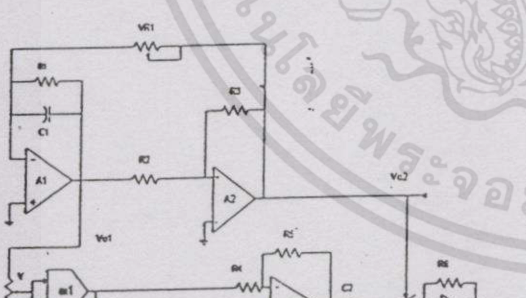


รูปที่ 3 ผลการเลียนแบบคลื่นผลลัพธ์จากวงจรตามรูปที่ 2 ด้วย MATLAB

จากผลลัพธ์ที่ได้นี้ช่วยแสดงให้เห็นว่า วงจรกำเนิดสัญญาณให้สัญญาณเอาต์พุตเป็น 3 รูปแบบ คือ สัญญาณรูปไซน์ รูปสามเหลี่ยม และรูปสี่เหลี่ยมได้ตามต้องการ

4 การออกแบบวงจร

หลักการตามหัวข้อที่ 2 สามารถนำมาเป็นแนวทางสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณได้ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังวงจรกำเนิดสัญญาณ

โดย A_2 ทำงานร่วมกับ R_2 และ R_3 ทำงานเป็นชมิตต์ทริกเกอร์ซึ่งรับอินพุตมาจากอินทิเกรเตอร์ที่ประกอบด้วย A_1 ทำงานร่วมกับ VR_1, R_1 และ C_1 โดยเอาต์พุตของชมิตต์ทริกเกอร์จะถูกป้อนกลับมายังอินพุตของอินทิเกรเตอร์ A_1 ทำให้วงจรในส่วนนี้ทำงานเป็น astable multivibrator ที่มีความถี่ f_o เป็นดังนี้

$$f_o = \frac{R_3}{4 R_1 R_2 C_1} \quad Hz \qquad (5)$$

เอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ V_{o1} จะมีรูปสัญญาณเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีขนาดสัมพันธ์กับไฟเลี้ยง $\pm V_{cc}$ ดังนี้คือ

$$V_{o1} = \frac{2R_2}{R_3} V_{cc} \quad V_{p-p} \qquad (6)$$

และเอาต์พุตของชมิตต์ทริกเกอร์ V_{o2} จะมีรูปสัญญาณเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดประมาณสองเท่าของไฟเลี้ยง คือ

$$V_{o2} \approx 2V_{cc} \quad V_{p-p} \qquad (7)$$

VR_2 ทำหน้าที่ปรับแรงดัน V_{o1} ป้อนให้กับตัวคูณสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณรูปไซน์ V_{o3} ที่มีขนาดตามที่ต้องการ A_5 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ A_3 ทำงานร่วมกับ R_4, R_5, R_6 และR_7 ทำหน้าที่เป็นตัวขยายผลต่างรับอินพุตมาจากตัวคูณสัญญาณ m_1 และ m_2 C_2 และ D_1 ทำหน้าที่เป็นวงจรแคลมป์สัญญาณ เพื่อแคลมป์ค่าต่ำสุดของสัญญาณจากวงจรขยายผลต่างให้มีค่าคงที่ที่ระดับศูนย์โวลต์

A_4 ทำงานร่วมกับ R_8, R_9, R_{10} และอนาลอกสวิตช์ S_1 ซึ่งรับสัญญาณ V_{o2} มาควบคุมการเปิดปิด จะทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีอัตราการขยาย +1 และ -1 สลับกันไป ทำให้การจัดรูปสัญญาณจากวงจรแคลมป์สัญญาณให้ประมาณเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาด

$$V_{o3} = K_2 K_1^2 V^4 - K_1 V^2 \quad V_{p-p} \qquad (8)$$

เมื่อกำหนดให้ R_4, R_5, R_6 และR_7 มีค่าเท่ากัน โดยในที่นี้ K_1 และK_2 คือค่าขนาดความไว (อัตราขยาย)

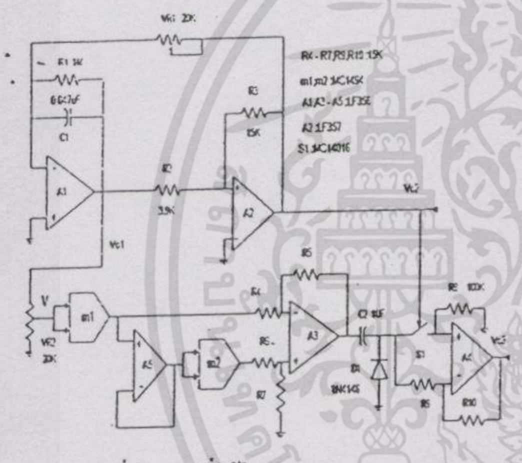
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจรคูณสัญญาณ m_1 และ m_2 มีขนาด 1.2232 และ 0.1492 ตามลำดับ และ V คือแรงดันเอาต์พุตของ VR_2

ในวงจรนี้สัญญาณทั้งหมดจะมีความถี่เท่ากันตามสมการที่ (5) ดังนั้นการปรับความถี่ของสัญญาณสามารถทำได้โดยการปรับค่า VR_1 ซึ่งจะไม่มีผลกระทบต่อขนาดของสัญญาณแต่ประการใด

5 การทดลองและผล

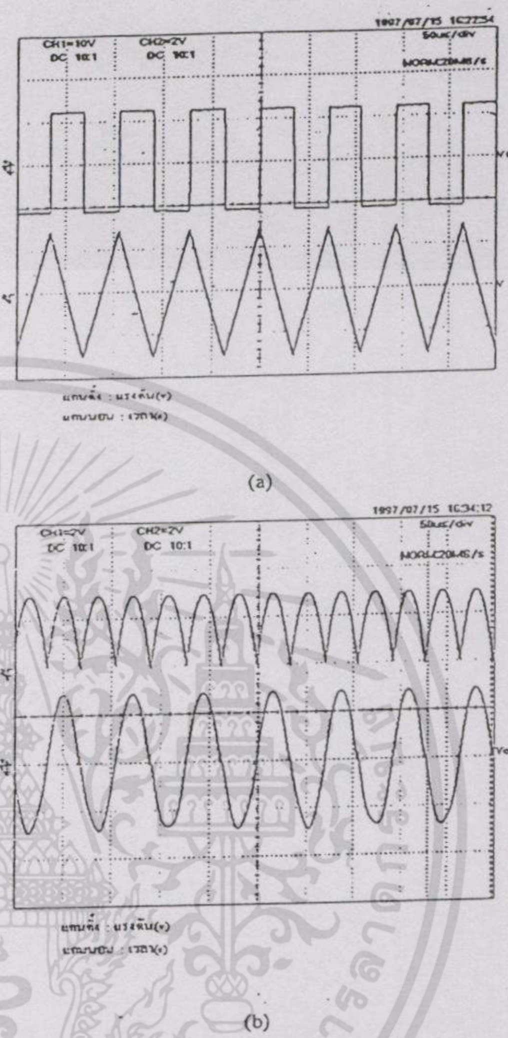
การทดลองได้ต่อวงจรตามแผนผังวงจรรูปที่ 4 ขึ้นมาโดยใช้อุปกรณ์ค่าต่างๆ ดังแสดงรายละเอียดใน



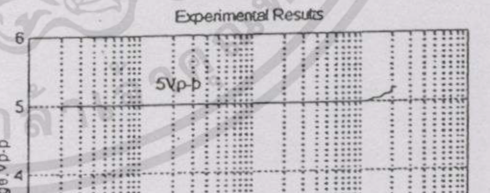
รูปที่ 5 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 5 โดยใช้ออปแอมป์ μLF356 ,ไอซีอนาลอกสวิตช์เบอร์ MC14016 และไอซีตัวคูณสัญญาณ MC1494 เป็นหลัก โดยใช้ไฟเลี้ยงวงจรขนาด ±15 V_{p-p} เอาต์พุตต่างๆ มีดังแสดงในรูปที่ 6a และรูปที่ 6b ประกอบด้วยสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (V_{o2}) สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V) รูปสัญญาณที่ได้จากวงจรแคลมป์สัญญาณและสัญญาณรูปไซน์ (V_{o3}) ที่ความถี่ประมาณ 14 kHz โดยเรียงลำดับจากบนลงล่าง

การเปลี่ยนแปลงขนาดของเอาต์พุตรูปไซน์กับความถี่ดังแสดงด้วยกราฟในรูปที่ 7 ซึ่งได้ทำการวัดขนาดของเอาต์พุตรูปไซน์ในช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 22 kHz ที่ระดับ 3 V_{p-p} และ 5 V_{p-p} จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่า VR_1



รูปที่ 6 สัญญาณที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของขนาดเอาต์พุตรูปไซน์เมื่อความถี่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเปลี่ยนความถี่เอาต์พุตรูปไซน์มีขนาดคงที่ตามทฤษฎี ในย่านความถี่เสียง ส่วนที่ความถี่สูงกว่านี้สัญญาณรูปไซน์จะมีรูปร่างและขนาดผิดเพี้ยนไป เนื่องจากขีดจำกัดของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ นอกจากนี้เมื่อทำการปรับ VR_1 เพื่อลดความถี่ให้ต่ำลงกว่านี้มากๆ สัญญาณเอาต์พุตรูปไซน์จะมีความผิดเพี้ยนที่รอยต่อระหว่างซีกบวกและซีกลบปรากฏชัดขึ้น แต่ก็สามารถลดผลกระทบนี้โดยการปรับออฟเซต (offset) ที่ตัวคูณสัญญาณ

6. สรุปและวิจารณ์

บทความนี้ได้เสนอหลักการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณที่มี 3 รูปแบบพร้อมกันคือ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปไซน์ โดยสัญญาณรูปไซน์สร้างขึ้นจากการจัดรูปสัญญาณสามเหลี่ยมด้วยหลักการง่ายๆ วงจรจึงไม่ยุ่งยากทั้งยังให้ค่า THD จากการวิเคราะห์มีค่าต่ำเพียง 5.02×10^{-5} % เท่านั้น

ผลการทดลองแสดงว่าโดยขีดจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ วงจรทำงานได้ดีในย่านความถี่เสียง วงจรเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในห้องทดลองหรือประกอบการศึกษาในเรื่องเกี่ยวกับการประมวลสัญญาณอนาลอก ตามทฤษฎีแล้ว ถ้าอุปกรณ์ที่ใช้มีผลตอบสนองที่ไวก็จะทำให้วงจรทำงานได้ดีในย่านความถี่ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ถ้าพิจารณาให้ดีจะเห็นว่า หลักการที่นำเสนอน่าจะมีความดึงดูดใจในแง่ของทฤษฎีและปฏิบัติ โดยเฉพาะในเรื่องที่จะพัฒนาส่วนประกอบของวงจรรวมเพราะจากวงจรที่นำเสนอถ้าสร้างเป็นวงจรรวมแล้วจะถือได้ว่ามีความซับซ้อนน้อยมาก

เอกสารอ้างอิง

[1] M.T. Abuelma'atti, "Synthesis of a concave monotonically increasing function using the diode-equation model," *INT.J.Electronics*, vol.51, pp. 57-62,1981.

[2] A. B. Williams, *Designer's Handbook of Integrated Circuits*, New York : McGraw-Hill,1984.

[3] R. G. Meyer,W. M. C. Sansen,S. Lui and S. Peeters, "The differential pair as a triangle-sine wave converter," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-11, pp. 418-420, 1976.

[4] S. Franco, *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*, Singapore: McGraw-Hill, 1988.

[5] วินัย ศิลารวม,วิวัฒน์ กิรานนท์, ปราโมทย์ วาดเขียน และจริยา เลิศอรัสอร่ามศิ, "วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ผลิตสัญญาณ 3 รูปแบบ," *เอกสารรวมเล่มการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20*, หน้า 801-805, 2540.

[6] F. G. Stremler, *Introduction to Communication System*, Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1977, pp. 38-40.

[7] M. Tooley, *The Maplin Electronic Circuit Handbook Second Edition*, London : Butterworth-Heinemann, 1995.

[8] R. F. Coughlin, *Principles and Applications of Semiconductors and Circuits*, Englewood Cliffs,N.J. : Prentice-Hall, 1971.

[9] C. J. Savant, Jr., M. S. Roden and G. L. Carpenter *Electronic Design:Circuit and System Second Edition*, Reading, Mass.:Addison-Wesley,1991

[10] L. Jones and A. F. chin, *Electronic Instruments and Measurements*, New York :John Wiley & Sons, 1983.

[11] *Linear Databook*, Santa Clara, Calif. : National Semiconductor Corp.,1988.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายวินัย ศิลารวม เกิดเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2514 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2535

ปี พ.ศ. 2536 เข้าทำงานเป็นอาจารย์ประจำภาควิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 จนถึงปัจจุบันทำงานเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้