

วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ชดเชยอุณหภูมิ

INVERSE SINE FUNCTION CIRCUIT WITH TEMPERATURE COMPENSATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-080-142

วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ชดเชยอุณหภูมิ

INVERSE SINE FUNCTION CIRCUIT WITH TEMPERATURE COMPENSATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-080-142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVERSE SINE FUNCTION CIRCUIT WITH TEMPERATURE COMPENSATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMITL-2016-EN-M-080-142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ชดเชยอุณหภูมิ
Thesis Title Inverse Sine Function Circuit with Temperature Compensation
นักศึกษา นายเปรม อภิสัทธิจรูญเลิศ
รหัสประจำตัว 54611201
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมระบบควบคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-080-142

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.วันชัย	ธีรวิรุจ	
ดร.อภิไฉ	ฤกษ์รัตน์	
ดร.ธวัชชัย	คำศรี	
ดร.สิริชัย	ธรรมารักษ์วัฒน์	
ผศ.ดร.วรรณดี	เพชรมณีล้ำค่า	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.00-10.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมเอกสารนี้ไปใช้ ย่อยจนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ชดเชยอณูหภูมิ
นักศึกษา	นายเปรม อภิสัทธิจรรย์เลิศ
รหัสนักศึกษา	54611201
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ชดเชยอณูหภูมิ โดยอาศัยคุณสมบัติที่เป็นฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ของวงจรคู่ผลต่างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งประกอบอยู่ภายในวงจรขยายความนำ เนื่องจากวงจรขยายความนำสามารถกำหนดให้ทำงานในช่วงสัญญาณขนาดใหญ่และขนาดเล็กได้จากการกำหนดค่าของสัญญาณจุดเข้าและกระแสไบอัส การชดเชยอณูหภูมิโดยใช้คุณสมบัติของวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กต่อร่วมกับวงจรขยายความนำ ที่ทำงานในช่วงสัญญาณขนาดใหญ่ ทำให้ผลของอณูหภูมิรอบข้างที่กระทบต่อวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอถูกชดเชย ตัววงจรที่ออกแบบได้ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด มีราคาถูก วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอมีขนาดเล็กและเรียบง่าย สามารถใช้งานในอณูหภูมิต่างๆ ได้โดยที่สมรรถนะของวงจรยังเหมือนเดิม อณูหภูมิที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 25 – 70 องศาเซลเซียส ซึ่งผลจากการเลียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSPICE และผลการทดลองต่อวงจรจริงสามารถยืนยันถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรที่นำเสนอว่าเป็นไปตามทฤษฎี

Thesis	Inverse Sine Function Circuit with Temperature Compensation
Student	Mr.Perm Apisitticharoonlert
Student ID.	54611201
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Wandee Petchmaneelumka

Abstract

A technique to realize inverse sine function circuit with temperature compensation is presented in this paper. The hyperbolic tangent characteristic of bipolar-transistor differential pair existed in operational transconductance amplifier (OTA) is utilized for the proposed realization method. Because of the operation of OTA can be assigned to operate in large signal and small signal modes by providing the input voltage signal and bias current of OTA. Temperature compensation of proposed circuit is provided by connecting OTA operation in large signal and small signal modes. Thus temperature effect from the change of ambient temperature will be compensated. So it takes an easy when use this circuit. The proposed scheme provides a simple configuration and low cost. The proposed circuit can operate in range 25-70°C of ambient temperature. Simulation and experimental results confirming the performance of the proposed scheme are agreed with the theoretical values.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบคุณพระคุณในความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. วรณดี เพชรณิล้ำค่า เป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ และตรวจสอบงานวิจัยตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. วันชัย ธีร์รุจา อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่คอยให้ความรู้ คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือ ชี้แนะในการทำงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยออกมาอย่างมีประสิทธิภาพแก่ผู้เขียน ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.อภิณัย ฤกษ์รัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการ CS-Lab ทุกคน ที่ได้ให้ คำปรึกษาและช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการทำงานวิจัย อีกทั้งยังเป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ ผู้เขียนตลอดระยะเวลาของการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลในครอบครัว และเพื่อนทุกคน ที่ได้ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่องแก่ผู้เขียน ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่ได้มอบความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

เปรม อภิสิทธิ์จรูญเลิศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	2
บทที่ 2 ตัวแปลงสัญญาณคลื่นไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยมในอดีต	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 วงจรแปลงกลับสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรคู่ผลต่าง	4
2.3 วงจรสังเคราะห์การแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้ออปแอมป์ต่อร่วมกับวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์.....	8
2.4 วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้การประมาณค่าสมการพหุนาม	10
2.5 วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอทีเอ	11
2.6 บทสรุป	14
บทที่ 3 ทฤษฎีของโอทีเอ	15
3.1 กล่าวนำ	15
3.2 การทำงานของวงจรโอทีเอ.....	15
3.3 วิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่.....	19
3.4 การประยุกต์ใช้งานวงจรโอทีเอ	22
3.5 บทสรุป	24
บทที่ 4 วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอ	25
4.1 กล่าวนำ	25
4.2 หลักการทำงานของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอ	25
4.3 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจร.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ผลเลียนแบบการทำงานของวงจร.....	28
4.3.2 ผลการทำงานของวงจรแบบต่อจริง	34
4.4 บทสรุป	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ	40
6.1 สรุปผลการวิจัย	40
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก.....	43
ภาคผนวก ก. วงจรโอทีเอ.....	44
ก1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุตกับค่ากระแสเอาต์พุต.....	44
ก2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรโอทีเอ	47
ภาคผนวก ข. บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์	49
ประวัติผู้เขียน.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบการทำงานของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์แบบต่างๆ.....	14
4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเลียนแบบการทำงานของวงจร.....	28
4.2 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของแรงดันเอาต์พุตที่อุณหภูมิต่างๆเทียบกับแรงดัน V_{ref}	31
4.3 ค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ จากการเลียนแบบการทำงาน.....	33
4.4 ผลรวมค่าความผิดพลาด ε_2 แต่ละองค์ประกอบความถี่ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จากการเลียนแบบการทำงาน.....	33
4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบต่อวงจรจริง	34
4.6 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่อุณหภูมิต่างๆ	36
4.7 ค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ	38
4.8 ผลรวมค่าความผิดพลาด ε_2 แต่ละองค์ประกอบความถี่ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง.....	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรถ่ายกลับสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรถ่ายกลับต่าง 4
2.2	ฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรถ่ายกลับฟังก์ชันสามเหลี่ยมเป็นฟังก์ชันไซน์ 5
2.3	วงจรถ่ายกลับฟังก์ชันไซน์และฟังก์ชันการถ่ายกลับไซน์ 9
2.4	วงจรถ่ายกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้การประมาณค่าสมการพหุนาม 10
2.5	วงจรถ่ายกลับสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณคลื่นไซน์ 11
2.6	วงจรถ่ายกลับสัญญาณคลื่นไซน์เป็นสัญญาณคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม 13
3.1	โอทีเอ 16
3.2	วงจรถ่ายกลับในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถ่ายกลับโอทีเอ 19
3.3	ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถ่ายกลับโอทีเอ 21
3.4	วงจรถ่ายกลับค่าความเหนี่ยวนำแบบเทียบกราวด์ 22
4.1	วงจรถ่ายกลับฟังก์ชันไซน์อย่างง่าย 25
4.2	วงจรถ่ายกลับฟังก์ชันไซน์ที่ซัดเซยอณหภูมิที่นำเสนอน 27
4.3	ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรถ่ายกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอน 29
4.4	ผลการเลียนแบบองค์ประกอบทางความถี่ของวงจรถ่ายกลับ 29
4.5	ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรถ่ายกลับที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 3 ค่า 30
4.6	ผลการเลียนแบบองค์ประกอบทางความถี่ของวงจรถ่ายกลับที่อุณหภูมิต่างๆ 31
4.7	กราฟผลรวมความผิดพลาด ϵ_1 ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากการเลียนแบบการทำงาน 34
4.8	ผลการทำงานวงจรถ่ายกลับด้วยค่าจริง 35
4.9	สัญญาณเอาต์พุตและองค์ประกอบทางความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ 37
4.10	กราฟผลรวมความผิดพลาด ϵ_2 ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง 39
ก1	วงจรถ่ายกลับในของโอทีเอ 44
ก2	วงจรถ่ายกลับของสัญญาณขนาดเล็กสำหรับโอทีเอในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตัวแปลงสัญญาณคลื่นรูปไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยม (Sine-to-triangular wave converter) หรือวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ (Inverse sine function circuit) เป็นบล็อกวงจรที่มีความสำคัญ วงจรหนึ่งต่อการประมวลผลสัญญาณแบบอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงในระบบการวัดและเครื่องมือวัด อาทิ เช่น นำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการควบคุมการทำงานของรีโซลเวอร์ และนำไปประยุกต์ใช้แทนตัวกำเนิดสัญญาณในวงจรขนาดเล็ก [1-4] เป็นต้น ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีการในการสังเคราะห์วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์อยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ใช้เทคนิคการออกแบบวงจรรวม (Integrated circuit) [5] วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้เทคโนโลยีทรานซิสเตอร์ซีมอส [6] และวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ใช้วงจรถยายค่าความนำ (Operational transconductance amplifier, OTA) หรือโอทีเอ ซึ่งเป็นบล็อกวงจรแบบแอคทีฟ (Active circuit building block) [7] ซึ่งในการออกแบบโดยใช้เทคนิคของวงจรรวมนั้น [5-6] มีความยุ่งยากและซับซ้อนรวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเป็นวงจรจริงที่สูง ในปัจจุบันโอทีเอถือเป็นบล็อกวงจรแบบแอคทีฟที่มีความน่าสนใจเนื่องจากเป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่สามารถแปรค่าอัตราขยายความนำ (Transconductance gain) ได้อย่างเป็นเชิงเส้น [8] และโอทีเอยังสามารถนำไปออกแบบเป็นวงจรที่มีคุณสมบัติของการปรับค่าพารามิเตอร์ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ [9-10] อีกทั้งมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาที่ถูก สามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีความสนใจในการออกแบบวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอทีเอเป็นอุปกรณ์แอคทีฟในการออกแบบ ซึ่งในงานวิจัย [7] ได้มีการนำเสนอการออกแบบวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอทีเอ แต่ทว่าวงจรที่ออกแบบขึ้นนั้นขึ้นกับอุณหภูมิแวดล้อม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการพัฒนาวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอทีเอ [7] ให้มีการชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิแวดล้อมเพื่อลดความผิดพลาดของวงจรอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งวงจรที่ออกแบบมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน รวมถึงอุปกรณ์สามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาดอีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอการออกแบบวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอทีเอเป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลักในการออกแบบ ซึ่งวงจรที่ออกแบบนั้นได้มีการชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิแวดล้อมโดยวงจรมีโครงสร้างอย่างง่าย อุปกรณ์ที่ใช้สามารถหาซื้อได้ง่ายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องตลาด การทดสอบการทำงานของวงจรได้ใช้วิธีเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และวิธีต่อวงจรจริง

1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า

ในอดีตวงจรแปลงสัญญาณคลื่นรูปไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยมที่เคยนำเสนอในอดีตนั้นใช้วงจรคู่ผลต่างแบบไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นส่วนประกอบ เมื่อทำการศึกษาพบว่าวงจรคู่ผลต่างนั้นได้ถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งในวงจรของโอทีเอ และความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเอาต์พุตกับค่าแรงดันอินพุตของโอทีเออยู่ในรูปของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic tangent) แต่ว่าสมรรถนะของวงจรนั้นขึ้นอยู่กับอุมหภูมิแวดล้อมเนื่องจากเป็นพฤติกรรมที่แฝงอยู่ในโอทีเอ เป้าหมายของวิทยานิพนธ์นี้คือการนำเสนอการแปลงสัญญาณคลื่นรูปไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยมหรือวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้คุณสมบัติของโอทีเอ ที่มีการชดเชยผลกระทบจากอุมหภูมิแวดล้อมที่แฝงมากับคุณสมบัติของโอทีเออีกด้วย

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ โดยใช้วงจรโอทีเอเป็นอุปกรณ์แอกทีฟหลักในการออกแบบ วงจรที่ได้ทำการชดเชยผลกระทบจากอุมหภูมิแวดล้อม ทำการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร และทดสอบการทำงานของวงจรด้วยการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE รวมถึงการต่อวงจรจริง เพื่อเป็นการยืนยันถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรอีกด้วย

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บท และภาคผนวกอีก 2 ภาค โดยแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 คือ บทนำ ซึ่งจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และรายละเอียดในบทต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่เคยนำเสนอในอดีตโดยจะนำเสนอวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยการใช้วงจรคู่ผลต่าง วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้ออปแอมป์ต่อร่วมกับวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์ วงจรแปลงกลับแบบการใช้การประมาณค่าด้วยพหุนามและวงจรแปลงกลับแบบใช้โอทีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีของวงจรโอทีเอ ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างของวงจรโอทีเอ รวมถึงหลักการทำงานพื้นฐานของวงจรโอทีเอทั้งในทางอุดมคติและทางปฏิบัติ และการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรโอทีเอ รวมถึงการประยุกต์ใช้งานของวงจรโอทีเอ

บทที่ 4 กล่าวถึงวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจรและเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE รวมถึงการทดลองต่อวงจรจริง

บทที่ 5 บทสรุปผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยต่อไป

ในส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์คือส่วนของภาคผนวก ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติและสมการต่างๆ และบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ภาคผนวก ก กล่าวถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงาน และการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรโอทีเอ

ภาคผนวก ข แสดงบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

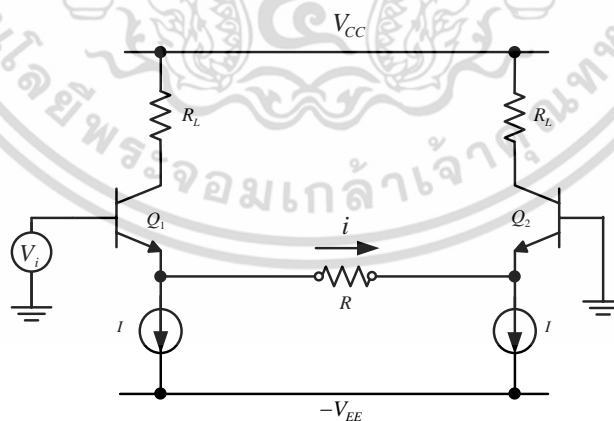
บทที่ 2

ตัวแปลงสัญญาณคลื่นไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยมในอดีต

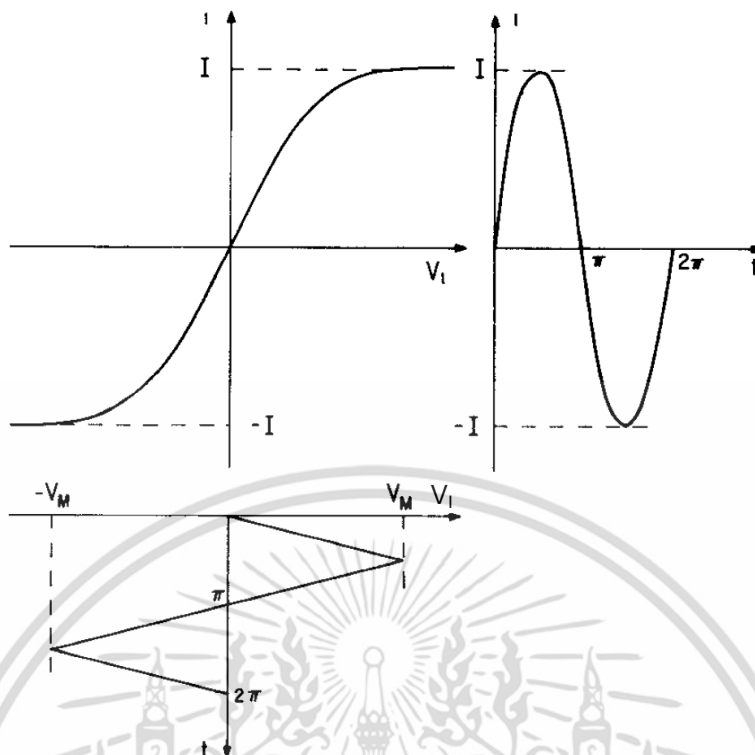
2.1 กล่าวนำ

เทคนิคการสังเคราะห์วงจรแปลงฟังก์ชันไซน์มีการนำเสนอไว้อยู่หลายรูปแบบ ด้วยกัน อาทิ เช่น การใช้คุณสมบัติของวงจรคู่ผลต่าง (Differential pair) [11-12] การประมาณค่าด้วยสมการพหุนาม [6] การใช้อุปกรณ์แบบแอคทีฟ (Active device) ในการสังเคราะห์วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ [7] และการสังเคราะห์วงจรแบบดิจิทัล [13] เป็นต้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอนำเสนอเทคนิคในการสังเคราะห์วงจรแปลงสัญญาณทั้งแบบแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมและแบบสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์ที่มีการนำเสนอในอดีตจำนวน 4 งานวิจัยด้วยกัน คือวงจรแปลงกลับสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรคู่ผลต่าง [11] วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอปแอมป์ต่อกับวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์ [5] วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้การประมาณค่าด้วยสมการพหุนาม [6] และวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้วงจรโอทีเอ [7] ซึ่งแต่ละวิธีมีเทคนิคในการออกแบบที่แตกต่างกันดังอธิบายในบทต่อไปในหัวข้อถัดไป และนำเสนอตารางเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียต่างๆ ของแต่ละเทคนิคอีกด้วย

2.2 วงจรแปลงกลับสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรคู่ผลต่าง



รูปที่ 2.1 วงจรแปลงกลับสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรคู่ผลต่าง



รูปที่ 2.2 ฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรแปลงกลับสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคพื้นฐานที่ใช้ในการแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งเทคนิคนี้ใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นวงจรคูปล์ต่างที่มีความสมพงษ์กัน โดยวงจรที่นำเสนอนี้แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ตัวต้านทาน R และแหล่งจ่ายกระแส I จากรูปที่ 2.1 และ 2.2 เมื่อป้อนแรงดัน V_i เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$V_i = V_{BE1} + iR - V_{BE2} \quad (2.1)$$

ในขณะที่

$$V_{BE1} = V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_K} \quad (2.2)$$

$$V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_K} \quad (2.3)$$

เมื่อ V_T คือแรงดันเชิงอุณหภูมิที่มีค่าเท่ากับ $\frac{kT}{q}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ (2.2) และ (2.3) ลงในสมการที่ (2.1) จะได้

$$V_i = iR + V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \quad (2.4)$$

ถ้าให้ α คือค่าอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 เท่ากับ 1 จะได้ว่า

$$I_{C1} = I + i \quad (2.5)$$

$$I_{C2} = I - i \quad (2.6)$$

แทนค่าสมการที่ (2.5) และ (2.6) ลงในสมการที่ (2.4) จะได้

$$\frac{V_i}{V_T} = \frac{i}{I} \left(\frac{IR}{V_T} \right) + \ln \frac{1 + \frac{i}{I}}{1 - \frac{i}{I}} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) เทอม \ln สามารถกระจายอนุกรมกำลังได้เป็น

$$\ln \frac{1 + \frac{i}{I}}{1 - \frac{i}{I}} = 2 \frac{i}{I} + \frac{2}{3} \left(\frac{i}{I} \right)^3 + \frac{2}{5} \left(\frac{i}{I} \right)^5 + \dots \quad (2.8)$$

โดยมีเงื่อนไข $\frac{i}{I} < 1$ (2.9)

แทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.7) ที่มีฟังก์ชันการส่งผ่าน (Transfer function) จะได้

$$\frac{V_i}{V_T} = \left(\frac{IR}{V_T} + 2 \right) \frac{i}{I} + \frac{2}{3} \left(\frac{i}{I} \right)^3 + \frac{2}{5} \left(\frac{i}{I} \right)^5 + \dots \quad (2.10)$$

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{\left(\frac{IR}{V_T} + 2\right)} \frac{V_i}{V_T} = \frac{i}{I} + \frac{2}{3} \frac{1}{\left(\frac{IR}{V_T} + 2\right)} \left(\frac{i}{I}\right)^3 + \frac{2}{5} \frac{1}{\left(\frac{IR}{V_T} + 2\right)} \left(\frac{i}{I}\right)^5 + \dots \quad (2.11)$$

ในการพิจารณาหาฟังก์ชันการส่งผ่าน จากรูปที่ 2.2 คือ

$$i = K_1 \sin K_2 V_i \quad (2.12)$$

เมื่อ K_1 และ K_2 คือ ค่าคงที่ ดังนั้น

$$K_2 V_i = \frac{i}{I} + \frac{2}{3} K_2 \left(\frac{i}{I}\right)^3 + \frac{2}{5} K_2 \left(\frac{i}{I}\right)^5 \quad (2.13ก)$$

$$K_2 V_i = \arcsin \frac{i}{K_1} \quad (2.13ข)$$

จัดรูปสมการที่ (2.13) ให้อยู่ในรูปของ สมการการกระจายอนุกรมกำลังจะได้

$$K_2 V_i = \frac{i}{K_1} + \frac{1}{6} \left(\frac{i}{K_1}\right)^3 + \frac{3}{40} \left(\frac{i}{K_1}\right)^5 + \dots \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.11) และ (2.14) เมื่อพิจารณาหาฟังก์ชันการส่งผ่านจะได้

$$K_1 = I \quad (2.15)$$

$$K_2 = \frac{1}{\frac{IR}{V_T} + 2} \frac{1}{V_T} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) แสดงค่าสูงสุดของกระแสเอาต์พุต i ซึ่งค่ากระแสเอาต์พุตนั้นควรจะมีค่าเท่ากับ แหล่งจ่ายกระแส ถ้ากำหนดให้อินพุตสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมแล้วค่าที่สูงที่สุดให้ค่าเป็น V_M จากสมการที่ (2.13) ผลลัพธ์ในอุดมคติของสัญญาณเอาต์พุตไซน์จะอยู่ในรูปของ

$$K_2 V_M = \frac{\pi}{2} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแทนสมการที่ (2.16) ลงในสมการที่ (2.17) จะได้

$$\frac{V_M}{V_T} = 1.57 \frac{IR}{V_T} + 3.14 \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) ความเพี้ยนของสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับ การป้อนสัญญาณอินพุตหากเลือกค่าสัญญาณที่เหมาะสมแล้วสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปคลื่นสามเหลี่ยมและความเพี้ยนของสัญญาณน้อยลง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำรูปแบบการใช้วงจรคู่ผลต่างแปลงกลับฟังก์ชันเป็นต้นแบบในการทำวิจัยซึ่งจะทำการอธิบายลักษณะการทำงานอีกครั้งในบทที่ 3

2.3 วงจรสังเคราะห์การแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอปแอมป์ต่อร่วมกับวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์

การออกแบบวงจรสังเคราะห์การแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ใช้โอปแอมป์ต่อร่วมกับวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์เป็นการอาศัยหลักการที่คล้ายคลึงกับหลักการการสังเคราะห์การแปลงกลับฟังก์ชันไซน์แบบดิจิทัล [13] นั่นคือใช้วงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการป้อนกลับแบบลบให้กับโอปแอมป์ แต่ในวิธีการนี้จะให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาในรูปของสัญญาณแอนะล็อก ในรูปที่ 2.3(ก) และ 2.3(ข) แสดงตัวอย่างส่วนหนึ่งของวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์ในรูปแบบของวงจรรวมที่ได้มีการนำเสนอในอดีตโดย [5] วงจรในรูปที่ 2.3(ข) จะให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ที่มีฟังก์ชันการส่งผ่านสามารถเขียนได้เป็น

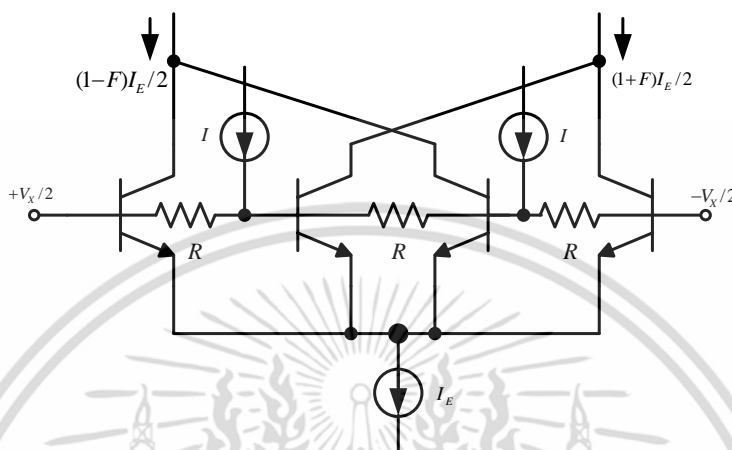
$$V_{out} = A_0 \{A \sin(V_{x1} - V_{x2}) + V_{z2} - V_{z1}\} \quad (2.19)$$

เมื่อ A_0 คือ ค่าอัตราขยายขณะเปิดวงจร (open loop gain) ของโอปแอมป์
 A คือ ค่าคงที่ของสมการ

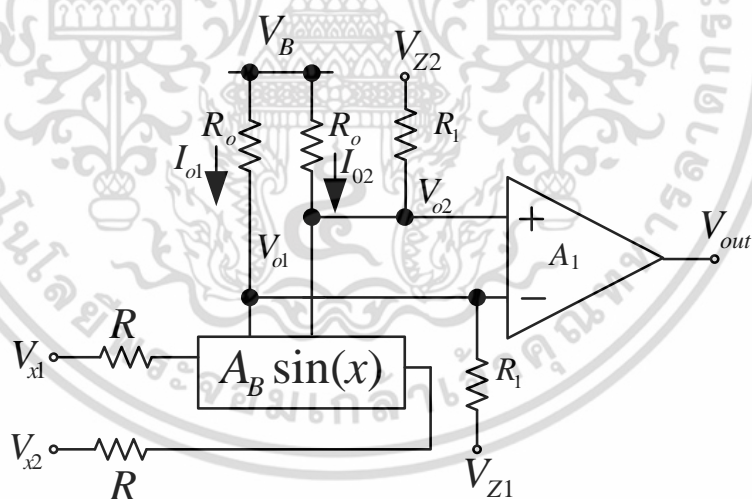
จากสมการที่ (2.19) เมื่อนำวงจรในรูปที่ 2.3(ข) มาต่อใช้งานในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.3(ค) โดยจะเห็นได้ว่าเป็นการใช้งานวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์เป็นส่วนหนึ่งของการป้อนกลับแบบลบให้กับโอปแอมป์ A_1 และใช้ V_{z1} และ V_{z2} เป็นสัญญาณอินพุตของวงจร ซึ่งจะสามารถประมาณค่าได้ว่า

$$V_{out} = \sin^{-1} \left(\frac{V_{z1} - V_{z2}}{A} \right) \quad (2.20)$$

จากสมการดังกล่าวค่าความถูกต้องของฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ที่ต้องการสังเคราะห์สัญญาณไซน์นั้นจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องในการทำงานของวงจรรวมสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์ ซึ่งเทคนิคนี้เหมาะสมการพัฒนาในรูปแบบของวงจรรวม เนื่องจากลักษณะของหลักการนี้ต้องอาศัยความถูกต้องของอุปกรณ์แต่ละตัว



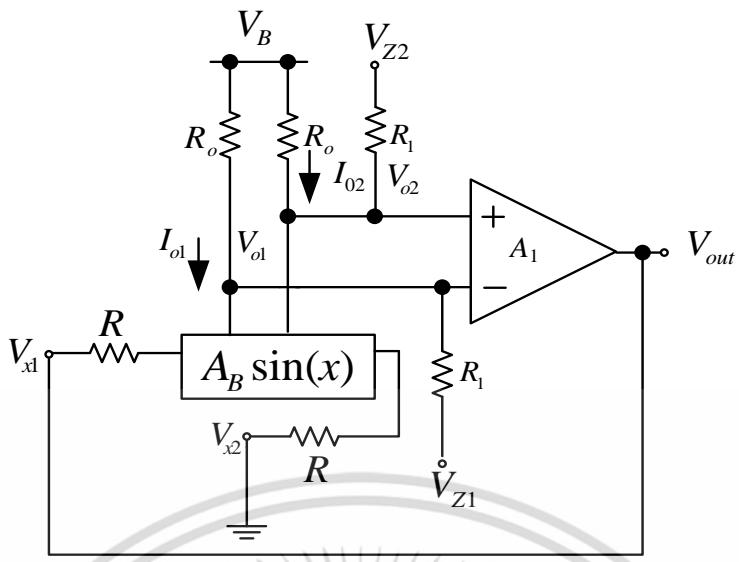
(ก) วงจรย่อยสำหรับการสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์



(ข) การสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์

รูปที่ 2.3 วงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์และฟังก์ชันการแปลงกลับไซน์

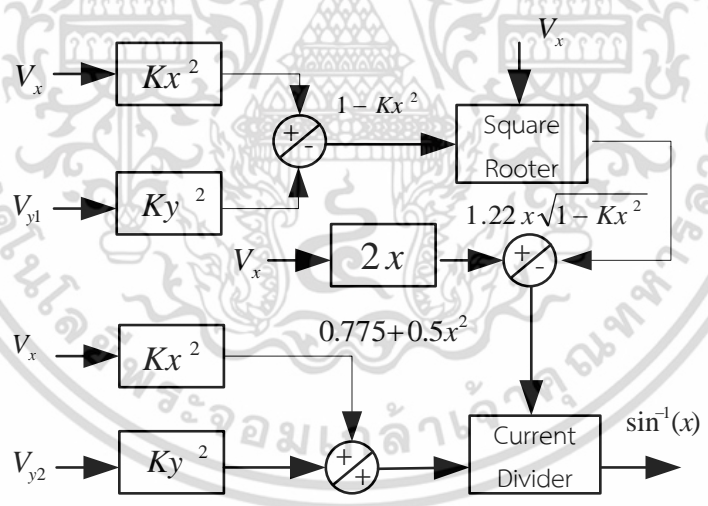
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) การสังเคราะห์ฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์

รูปที่ 2.3 วงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์และฟังก์ชันการแปลงกลับไซน์ (ต่อ)

2.4 วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้การประมาณค่าสมการพหุนาม



รูปที่ 2.4 วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้การประมาณค่าสมการพหุนาม [6]

ในรูปที่ 2.4 เป็นการออกแบบการแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้การประมาณค่าสมการพหุนามที่นำเสนอโดย J.K. Seon และคณะ [6] ซึ่งอาศัยหลักการประมาณค่าที่นำเสนอโดย [14] วงจรย่อยที่ใช้ในส่วนต่างๆ นั้นใช้มอสทรานซิสเตอร์ในการออกแบบประกอบไปด้วย วงจรหารสัญญาณ วงจรคูณสัญญาณ วงจรถอดรากที่สอง วงจรยกกำลังสอง ซึ่งสามารถอธิบายหลักการได้ดังนี้ จากการประมาณค่าการแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอโดย E. Seevinck [14] ที่ประมาณค่า

มาจากสมการพหุนามจะได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y(x) \approx \sin^{-1}(x) = \frac{a \cdot x + b \cdot x \cdot \sqrt{c + (d \cdot x^2)}}{e + f \cdot x^2} \quad (2.21)$$

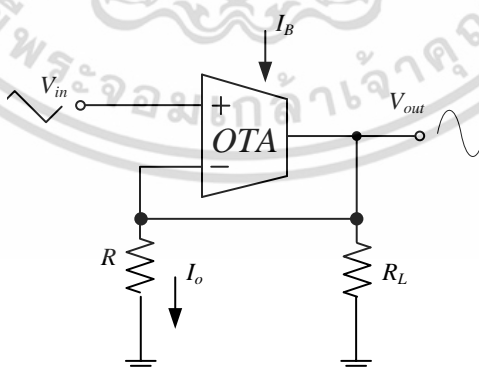
จากสมการที่ (2.21) ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมในค่าต่างๆ คือ $c = 1.0$ $d = -1.0$ และ $f = 0.5$ ซึ่งสามารถเขียนสมการแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ได้ดังนี้

$$\sin^{-1}(x) = \frac{2 \cdot x + 1.22 \cdot x \cdot \sqrt{1 - x^2}}{0.775 + 0.5 \cdot x^2} \quad (2.22)$$

โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมนั้นจะต้องอยู่ในช่วง $y(\pm 1.0)$, $y'(0)$, $y(\pm \frac{1}{2})$ และ $y'(\pm 1.0)$ จากสมการที่ (2.22) ค่าความผิดพลาดสูงสุดนั้นจะมีค่าอยู่ที่ 0.22% จากการเลือกค่าที่เหมาะสมกับวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ เนื่องจากเทคนิคนี้ได้ใช้วงจรย่อยหลายๆ วงจรในการแปลงกลับฟังก์ชันไซน์จึงไม่เหมาะสมกับงานในลักษณะแบบดิสครีต เมื่อทำการต่อเป็นวงจรจริงนั้นจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง และยังต้องใช้ความแม่นยำของวงจรย่อยในแต่ละวงจรเพื่อช่วยในการแปลงกลับฟังก์ชันไซน์

2.5 วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอทีเอ

วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้วงจรโอทีเอที่นำเสนอโดย A. Kaewpoonsak และคณะ [7] นั้นได้ใช้คุณสมบัติของวงจรโอทีเอเป็นหลักในการออกแบบซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้ยังได้นำเสนอวงจรแปลงสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณคลื่นไซน์อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรแปลงสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณคลื่นไซน์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้โอทีเอเป็นอุปกรณ์แอกทีฟหลักในการออกแบบ ดังนั้นจึงได้มีการอธิบายการทำงานและคุณสมบัติของโอทีเอโดยละเอียดในบทที่ 3 ซึ่งจากรูปที่ 2.5 สามารถเขียนเอกสารความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันอินพุตกับกระแสเอาต์พุตได้เป็นนั้น ไม่นานญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{in} = I_o R + 2V_T \tanh^{-1} \left(\frac{I_o}{I_B} \right) \quad (2.23)$$

เมื่อ V_T คือแรงดันเชิงอุณหภูมิตัว (Thermal voltage)

จากหลักการการกระจายอนุกรมกำลัง (Power series expansion principle) ของฟังก์ชันอินเวิร์สไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์

$$\tanh^{-1}(x) = x + \frac{1}{3}(x)^3 + \frac{1}{5}(x)^5 + \dots \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.24) สามารถประมาณได้ว่า

$$V_{in} = I_o R + 2V_T \left(\frac{I_o}{I_B} + \frac{1}{3} \left(\frac{I_o}{I_B} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{I_o}{I_B} \right)^5 + \dots \right) \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.25) เทอมภายในวงเล็บจะสังเกตว่าเป็นอนุกรมกำลังที่เป็นฟังก์ชันคี่ โดยมีลักษณะคล้ายคลึงกับอนุกรมกำลังของฟังก์ชันอินเวิร์สไซน์ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น [15]

$$K \sin^{-1}(x) = K_T \left(x + B_3 \frac{x^3}{3} + B_5 \frac{x^5}{5} + \dots \right) \quad (2.26ก)$$

โดยที่

$$B_i = \prod_{j=1}^{\left(\frac{i-1}{2}\right)} \left[\frac{(i-2j)}{i-2j+1} \right] \quad \text{เมื่อ } i = 3, 5, 7, \dots \quad (2.26ข)$$

และจากการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ

$$K = (I_B R / 2V_T) = 1.3 \quad (2.27)$$

ค่าขนาด (m) ของกระแสเอาต์พุต I_o ถูกกำหนดที่

$$m = 0.975 I_B \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.23) จะสามารถประมาณค่าได้เป็น

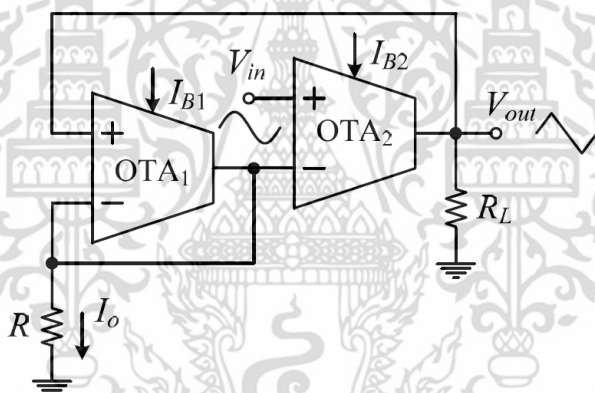
$$V_{in} = (2V_T + I_B R) \sin^{-1} \left(\frac{mI_o}{I_B} \right) \quad (2.29)$$

หรือ
$$I_o = (I_B / m) \sin(V_{in} / (2V_T + I_B R)) \quad (2.30)$$

สามารถจัดให้อยู่ในรูปของแรงดันเอาต์พุตได้ดังนี้

$$V_{out} = R(I_B / m) \sin(V_{in} / (2V_T + I_B R)) \quad (2.31)$$

จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} ที่ได้ อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์ของแรงดันอินพุต V_{in}



รูปที่ 2.6 วงจรแปลงกลับสัญญาณคลื่นไซน์เป็นคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 2.6 แสดงวงจรการแปลงกลับสัญญาณคลื่นไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยมโดยมีการเพิ่มโอทีเออีกหนึ่งตัวเพื่อเป็นการป้อนกลับสัญญาณโดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตได้เป็น

$$V_{out} = (2V_T + I_B R) \sin^{-1} (mV_{in} / I_B R) \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.32) จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} ที่ได้ อยู่ในรูปของการแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ของแรงดันอินพุต V_{in} แต่ว่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} ที่ได้มีเทอมของ V_T ซึ่งเป็นแรงดันที่ขึ้นกับอุณหภูมิติดมาด้วยทำให้แรงดันเอาต์พุต V_{out} จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแวดล้อม

2.5 บทสรุป

จากการได้ยกตัวอย่าง 4 รูปแบบในการแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ได้นำเสนอในบทนี้ได้แก่ วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรคู่ผลต่าง วงจรสังเคราะห์การแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอปแอมป์ต่อร่วมกับวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์ หลักการทำงานและวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้การประมาณค่าสมการพหุนาม และ วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอทีเอ ซึ่งสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียในแต่ละวงจรได้ดังในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบการทำงานของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์แบบต่างๆ

วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ในอดีต	หลักการ	ข้อดี/ข้อเสีย
วงจรแปลงสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณไซน์โดยใช้วงจรคู่ผลต่าง	เทคนิคนี้ใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์สองตัว ทำหน้าที่เป็นวงจรคู่ผลต่าง	ข้อดี มีโครงสร้างวงจรแบบง่าย ข้อเสีย ความสามารถในการทำงานของวงจรคู่ผลต่างนั้นจะไม่ใช่เป็นสมการเชิงเส้นตั้งแต่พจน์ที่ 3
วงจรสังเคราะห์การแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอปแอมป์ต่อร่วมกับวงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์	ใช้วงจรสังเคราะห์ฟังก์ชันไซน์เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการการป้อนกลับแบบลบให้ออปแอมป์	ข้อดี ค่าความผิดพลาดน้อยอยู่ที่ 0.2% ข้อเสีย ใช้หลักการออกแบบวงจรรวมทำให้มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการออกแบบ
วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้การประมาณค่าสมการพหุนาม	อาศัยหลักการประมาณค่าที่นำเสนอโดย [6] โดยที่วงจรย่อยที่ใช้ในส่วนต่างๆใช้มอสทรานซิสเตอร์ในการออกแบบประกอบหลายวงจร	ข้อดี ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยอยู่ที่ 0.22% ข้อเสีย ใช้วงจรย่อยหลายวงจรในการช่วยปรับค่าทำให้ไม่เหมาะกับงานที่ต้องใช้วงจรแบบดิสครีต
วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอทีเอ	ใช้วงจรโอทีเอซึ่งมีคุณสมบัติที่ได้จากวงจรคู่ผลต่างเป็นวงจรหลักในการออกแบบ	ข้อดี สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ มีโครงสร้างวงจรแบบง่ายและใช้อุปกรณ์แอคทีฟ ข้อเสีย วงจรที่ออกแบบมีความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีของโอทีเอ

3.1 กล่าวนำ

วงจรรขยายค่าความนำ (Operational transconductance amplifier, OTA) หรือโอทีเอ เป็นวงจรแปลงค่าผลต่างของสัญญาณแรงดันอินพุตเป็นสัญญาณกระแสเอาต์พุต โอทีเอมีคุณสมบัติการทำงานเป็นวงจรรขยายสัญญาณแบบแหล่งจ่ายกระแสที่ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage controlled current source, VCCS) หรืออาจกล่าวได้ว่าวงจรโอทีเอก็คือวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแรงดันให้กลายเป็นสัญญาณกระแส (Voltage-to-current converter, V/I) ประเภทหนึ่ง ซึ่งสามารถควบคุมค่าเอาต์พุตโดยการปรับกระแสไบอัสจากภายนอก เนื่องจากวงจรโอทีเอเป็นวงจรที่มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน จึงทำให้มีการนำประยุกต์ใช้งานต่างๆ มากมาย ตัวอย่างเช่น วงจรกรองสัญญาณแบบแอกทีฟ (Active filter) [8-9],[16] วงจรกำเนิดความถี่ (Frequency generator) [17] และวงจรรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ (Instrumentation amplifier) [18] ซึ่งได้มีการนำโอทีเอมาสร้างเป็นวงจรรวม (Integrated circuit, IC) และได้มีการผลิตไอซีหรือวงจรรวมออกมาหลายรุ่นเช่น CA3080 CA3280 และ LM13600 เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วงจรโอทีเอเป็นอุปกรณ์หลักในการออกแบบวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ชดเชยอุณหภูมิ ในบทนี้จึงกล่าวถึงคุณสมบัติและหลักการทำงานของวงจรโอทีเอเพื่อให้มีความเข้าใจในการทำงานของโอทีเอมากขึ้น

3.2 การทำงานของวงจรโอทีเอ

โครงสร้างพื้นฐานและสัญลักษณ์ของวงจรโอทีเอแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยวงจรรคู่มผลต่าง (Difference pair) คือ ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 โดยหลักการทำงานคือ ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 มีความสมพงษ์กันทุกประการ ซึ่งวงจรรคู่มผลต่างนี้ต่อร่วมกับวงจรรสะท้อนกระแส (Current mirror, CM) ที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง $CM_1 - CM_3$ และ I_B เป็นแหล่งจ่ายกระแสไบอัสภายนอกของโอทีเอ เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ในวงจรรคู่มผลต่างถูกไบอัสด้วยกระแส I_B จะได้ความสัมพันธ์ของ i_1 และ i_2 จากทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ ดังนี้ [ภาคผนวก ก]

$$i_1 = \frac{I_B e^{(-v_{in}/2V_T)}}{e^{(-v_{in}/2V_T)} + e^{(v_{in}/2V_T)}} \quad (3.1)$$

และ

$$i_2 = \frac{I_B e^{(v_{in}/2V_T)}}{e^{(-v_{in}/2V_T)} + e^{(v_{in}/2V_T)}} \quad (3.2)$$

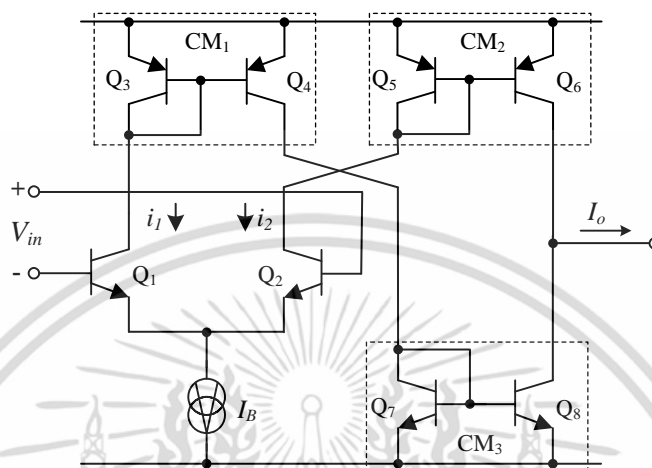
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_T คือ แรงดันเชิงอุณหภูมิ (thermal voltage) มีค่าเท่ากับ KT/q

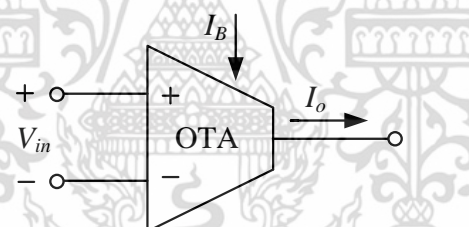
K คือ ค่าคงที่ของโบลท์แมน (Boltzman's constant) มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K

T คือ ค่าอุณหภูมิแวลต์อม (K)

q คือ ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน (electron charge) มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C



(ก) โครงสร้างพื้นฐาน



(ข) สัญลักษณ์

รูปที่ 3.1 โอทีเอ

เนื่องจากการกำหนดให้วงจรถ่ายโอนกระแสมีอัตราส่วนกระแสเท่ากับหนึ่ง เมื่อพิจารณาที่จุดเอาต์พุตของวงจรจะได้

$$I_o = i_2 - i_1 = I_B \left[\frac{e^{(v_{in}/2V_T)} - e^{(-v_{in}/2V_T)}}{e^{(v_{in}/2V_T)} + e^{(-v_{in}/2V_T)}} \right] \quad (3.3)$$

หรือ

$$I_o = I_B \tanh \left(\frac{V_{in}}{2V_T} \right) \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.4) จะเห็นได้ว่าค่ากระแสเอาต์พุต I_o อยู่ในรูปของฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์จากการคำนวณพบว่าเมื่อสัญญาณแรงดันอินพุตมีขนาดเล็กมากหรือมีค่าเข้าศูนย์ความสัมพันธ์นี้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linear approximation) โดยใช้วิธีการกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor's series) จะได้ค่าดังสมการ

$$\tanh(x) = x - \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} - \frac{17x^7}{315} + \dots \quad \text{เมื่อ } |x| < \frac{\pi}{2} \quad (3.5)$$

เมื่อแทนค่า $x = \frac{V_{in}}{2V_T}$ ลงในสมการที่ (3.5) จะได้

$$\tanh\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) = \left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) - \frac{1}{3}\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right)^3 + \frac{2}{15}\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right)^5 - \frac{17}{315}\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right)^7 + \dots \quad \text{เมื่อ } \left|\frac{V_{in}}{2V_T}\right| < \frac{\pi}{2} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) ค่า V_{in} จะต้องน้อยกว่าค่า $2V_T$ จึงจะสามารถประมาณค่าฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ให้เป็นเชิงเส้นได้เป็น

$$\tanh\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) \cong \frac{V_{in}}{2V_T} \quad (3.7)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.7) แทนลงในสมการที่ (3.4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุต I_o กับผลต่างแรงดันอินพุต V_{in} ที่เป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$I_o = V_{in} \frac{I_B}{2V_T} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.8) ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรโอทีเอคือค่าอัตราขยายค่าความนำ g_m ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$g_m = \frac{dI_o}{dV_{in}} = \frac{I_B}{2V_T} \operatorname{sech}^2\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) \quad (3.9)$$

เมื่อขนาดของสัญญาณ V_{in} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะทำให้อัตราขยายค่าความนำ g_m มีค่าเท่ากับ

$$g_m = \left. \frac{dI_o}{dV_{in}} \right|_{V_{in}=0} = \frac{I_B}{2V_T} \quad (3.10)$$

ซึ่งจะได้สมการค่ากระแสเอาต์พุต I_o เท่ากับ

$$I_o = g_m V_{in} = V_{in} \frac{I_B}{2V_T} \quad (3.11)$$

เมื่อทำการพิจารณาค่า V_{in} ที่อุณหภูมิห้องซึ่งจะได้ค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิ V_T ประมาณเท่ากับ 26 mV ทำให้เห็นได้ว่าข้อจำกัดของกระแสเอาต์พุต I_o ขึ้นอยู่กับผลอุณหภูมิแฝงในรูปของค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิ V_T ข้อที่สองคือค่าแรงดันอินพุต V_{in} จะต้องมีค่าน้อยกว่า 52mV ซึ่งถือว่าเป็นช่วงปฏิบัติการทางขนาดที่ค่อนข้างแคบ ซึ่งในการรักษาเสถียรภาพของวงจรมันควรเลือกรวมการชดเชยมีความไวที่น้อยที่สุด โดยสามารถวิเคราะห์หาค่าความไว (Sensitivity: S) ได้จากสมการ

$$S_X^Y = \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln X} = \frac{\partial Y/Y}{\partial X/X} \quad (3.12)$$

ดังนั้นจะสามารถวิเคราะห์หาค่าความไวของกระแสเอาต์พุต I_o ต่ออุณหภูมิแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดังนี้

$$S_T^{I_o} = \frac{\partial I_o / I_o}{\partial T / T} = -1 \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสเอาต์พุตได้เป็น

$$\frac{\delta I_o}{I_o} = -\frac{\Delta T}{T} \times 100\% \quad (3.14)$$

เมื่อ δI_o คือ กระแสเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป

ΔT คือ อุณหภูมิแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

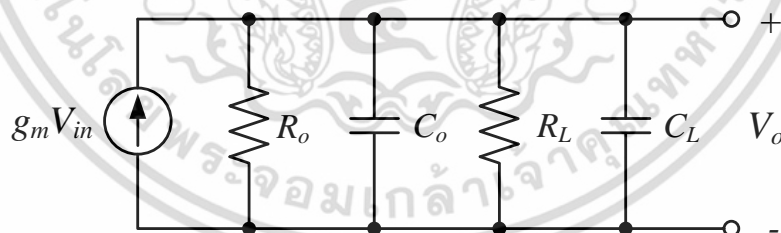
จากโครงสร้างพื้นฐานของวงจรรอทีเอในรูปที่ 3.1(ก) เมื่อพิจารณาที่เอาต์พุตของวงจรรอทีเอจะได้ค่าความต้านทานเอาต์พุต R_o ของวงจรรอทีเอมีค่าที่สูง ซึ่งสามารถวิเคราะห์และเขียนได้ดังสมการ

$$R_o = r_{o6} // r_{o8} = \frac{r_{o6} r_{o8}}{r_{o6} + r_{o8}} \quad (3.15)$$

เมื่อ r_{o6} และ r_{o8} คือค่าความต้านทานเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ Q_6 และ Q_8 ของวงจรรอทีเอตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำวงจรรอทีเอไปต่อใช้กับงานที่ต้องการค่าอัตราขยายแรงดันที่สูง ค่าความต้านทาน R_L ของโหลดที่นำมาต่อกับจุดเอาต์พุตของวงจรรอทีเอจะต้องมีค่าที่สูงด้วยเช่นกัน จากเงื่อนไขนี้ทำให้วงจรรอทีเอที่อยู่ในรูปของไอซีสำเร็จรูปบางเบอร์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด จึงได้มีการออกแบบวงจรรอทีเอโดยนำวงจรรีบฟเฟอร์ (Buffer) ต่อที่จุดเอาต์พุตของวงจรรอทีเอเพื่อรักษาค่าความต้านทานเอาต์พุตให้ยังคงมีค่าที่สูงเมื่อนำไปต่อประยุกต์ใช้งาน

3.3 การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่

ในรูปที่ 3.2 แสดงวงจรรอทีเอในการคิดวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ในการพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรอทีเอ โดยให้ R_o และ C_o คือ ค่าความต้านทานแผลงและค่าความจุไฟฟ้าแผลงที่เอาต์พุตของไอทีเอ ตามลำดับ R_L คือ ค่าความต้านทานภายนอกที่นำมาต่อร่วมกับไอทีเอ และ C_L คือค่าความจุไฟฟ้าของโหลดที่นำมาต่อร่วมกับไอทีเอ



รูปที่ 3.2 วงจรรอทีเอในการคิดวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรอทีเอ

จากวงจรรอทีเอในรูปที่ 3.2 พิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรอทีเอ สามารถวิเคราะห์หาค่าอัตราขยายแรงดันของสัญญาณได้ดังนี้

$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{g_m (R_o // R_L)}{(R_o // R_L)(C_o + C_L)s + 1} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทน $s = j\omega$ ลงในสมการที่ (3.16) จะได้ดังสมการ

$$A_v(j\omega) = \frac{g_m(R_o // R_L)}{(R_o // R_L)(C_o + C_L)j\omega + 1} = \frac{A_{vo}}{j(\omega/\omega_c) + 1} \quad (3.17)$$

เมื่อ
$$A_{vo} = g_m(R_o // R_L) = \frac{I_B}{2v_T}(R_o // R_L) \quad (3.18)$$

$$\omega_c = \frac{1}{(R_o // R_L)(C_o + C_L)} \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.19) จะเห็นได้ว่าการจำลองวงจรในรูปที่ 3.2 อยู่ในรูปของตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low-pass filter) ซึ่งมีค่า ω_c จากสมการที่ (3.19) เป็นความถี่หักมุม (Corner frequency) ทำให้ได้ค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth, f_c) มีค่าเท่ากับ

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi(R_o // R_L)(C_o + C_L)} \quad (3.20)$$

สำหรับการทำงานของวงจรที่ความถี่ต่ำมาก อัตราขยายแรงดัน A_v ในสมการที่ (3.16) จะมีค่าเท่ากับอัตราขยายแรงดัน A_{vo} ในสมการที่ (3.18) โดยสามารถกำหนดอัตราขยายแรงดันได้จากการปรับค่ากระแสไบอัสภายนอก I_B จากคุณลักษณะที่กล่าวมาทำให้วงจรโอทีเอสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรขยายที่สามารถควบคุมอัตราขยายได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

ในกรณีวงจรทำงานที่ความถี่สูงมาก ในสมการที่ (3.17) จะถือว่า $j(\omega/\omega_c) \gg 1$ ทำให้สามารถเขียนสมการที่ (3.17) ใหม่ได้ว่า

$$A_v(j\omega) = \frac{A_{vo}}{j(\omega/\omega_c)} \quad (3.21)$$

เมื่อกำหนดให้ความถี่ $\omega = \omega_T$ เป็นความถี่ที่ทำให้อัตราขยายแรงดันเท่ากับหนึ่ง (Unity-gain frequency) ดังนั้นสมการที่ (3.21) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$|A_v(j\omega_T)| = \left| \frac{A_{vo}}{j(\omega_T/\omega_c)} \right| = \frac{A_{vo}}{\sqrt{(\omega_T/\omega_c)^2}} = 1 \quad (3.22)$$

ดังนั้นความถี่ ω_T จะมีค่าเท่ากับ

$$\omega_T = A_{vo}\omega_c \quad (3.23)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (3.18) และ (3.19) ลงในสมการที่ (3.23) จะได้

$$\omega_T = \frac{g_m}{C_o + C_L} = \frac{I_B}{2v_T(C_o + C_L)} \quad (3.24)$$

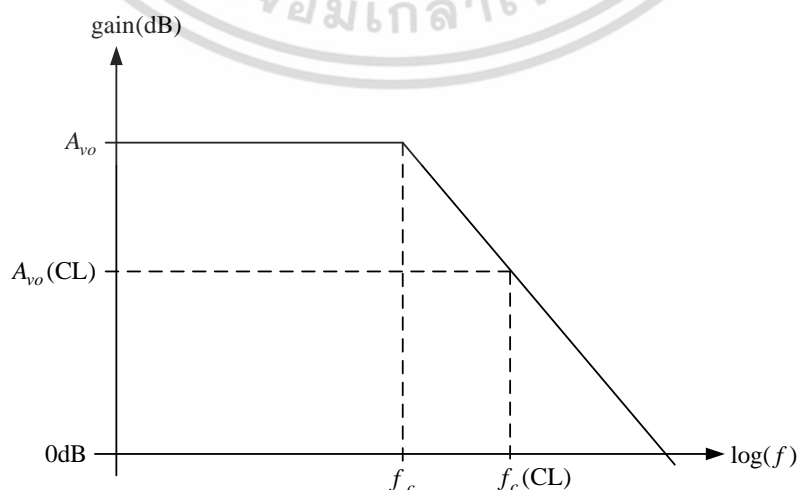
ทำให้ค่าแบนด์วิดท์ f_T ของความถี่ ω_T มีค่าเป็น

$$f_T = \frac{\omega_T}{2\pi} = \frac{I_B}{4\pi v_T(C_o + C_L)} \quad (3.25)$$

ในกรณีการใช้งานวงจรรวมที่เอโดยการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) จะได้ค่าแบนด์วิดท์แบบป้อนกลับ (Close-loop bandwidth, $f_c(\text{CL})$) มีค่าเท่ากับ

$$f_c(\text{CL}) = \frac{A_{vo}}{A_{vo}(\text{CL})} f_c \quad (3.26)$$

จากค่าอัตราขยายแรงดัน A_{vo} ในสมการที่ (3.18) ทำให้ค่าแบนด์วิดท์แบบป้อนกลับในสมการที่ (3.26) สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบอัสภายนอก I_B ทำให้มีการนำวงจรรวมที่เอไปประยุกต์ใช้งานในการสังเคราะห์วงจรกรองสัญญาณแบบแอกทีฟที่สามารถปรับค่าแบนด์วิดท์ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ [9],[16]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรวมที่เอ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

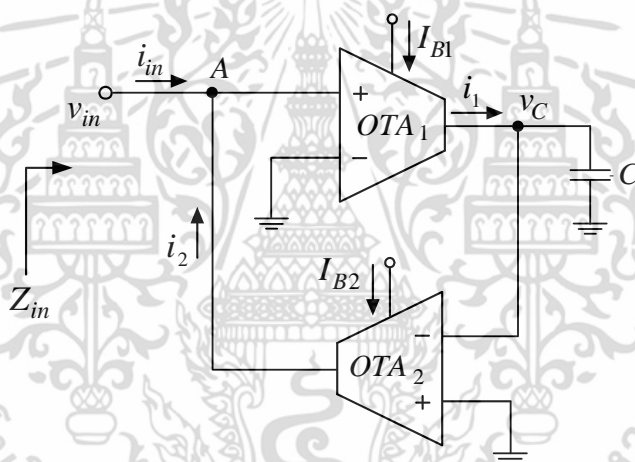
ในรูปที่ 3.3 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของโอทีเอระหว่างค่าอัตราขยาย (Gain) กับค่าแบนด์วิดท์ ในเทอมของลอการิทึม (Logarithm)

3.4 การประยุกต์ใช้งานวงจรโอทีเอ

วงจรโอทีเอเป็นอุปกรณ์แอกทีฟที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ โดยจะขอยกตัวอย่าง วงจรสังเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำแบบเทียบกราวด์ (Grounded inductor) [19]

วงจรสังเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำแบบเทียบกราวด์

สำหรับวงจรสังเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำแบบเทียบกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ประกอบด้วย วงจรโอทีเอสองวงจรต่อกันกับตัวเก็บประจุ C แบบเทียบกราวด์



รูปที่ 3.4 วงจรสังเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำแบบเทียบกราวด์

เมื่อพิจารณากระแสเอาต์พุต i_1 และ i_2 จะมีค่าเท่ากับ

$$i_1 = g_{m1} v_{in} \quad (3.27)$$

และ

$$i_2 = -g_{m2} v_C \quad (3.28)$$

เมื่อพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C จะได้

$$v_C = \frac{i_1}{sC} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการที่ (3.29) แทนในสมการที่ (3.28) จะได้

$$i_2 = \frac{-g_{m2}i_1}{sC} \quad (3.30)$$

แทนค่า i_1 จากสมการที่ (3.29) ลงในสมการที่ (3.30) จะได้

$$i_2 = \frac{-g_{m1}g_{m2}v_{in}}{sC} \quad (3.31)$$

พิจารณาที่โหนด A จะได้

$$i_{in} = -i_2 \quad (3.32)$$

แทนค่ากระแส i_2 จากสมการที่ (3.31) ลงในสมการที่ (3.32) จะได้

$$i_{in} = \frac{g_{m1}g_{m2}v_{in}}{sC} \quad (3.33)$$

จากสมการที่ (3.33) เมื่อพิจารณาแรงดัน v_{in} โหนด A และกระแส i_{in} ที่ไหลเข้าโหนด A จะได้

$$\frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{sC}{g_{m1}g_{m2}} \quad (3.34)$$

ดังนั้นจะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ Z_{in} ของวงจรเท่ากับ

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{sC}{g_{m1}g_{m2}} = sL_{eq} \quad (3.35)$$

จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ Z_{in} ของวงจรในรูปที่ 3.4 มีคุณสมบัติเสมือนตัวเหนี่ยวนำที่ต่อเทียบกราวด์ ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำสมมูล (Equivalent inductance, L_{eq}) ที่สังเคราะห์ขึ้นเท่ากับ

$$L_{eq} = \frac{C}{g_{m1}g_{m2}} \quad (3.38)$$

3.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงคุณสมบัติ หลักการทำงานและตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของวงจรโอทีเอ ซึ่งข้อดีของวงจรโอทีเอคือเป็นอุปกรณ์แอคทีฟสามารถตอบสนองได้รวดเร็ว มีการผลิตขึ้นมาหลายรุ่นซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด โดยวงจรโอทีเอนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแรงดันให้กลายเป็นสัญญาณกระแส ซึ่งกระแสเอาต์พุตที่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของแรงดันอินพุต โดยมีคุณสมบัติที่มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง ยังสามารถควบคุมได้ง่ายเนื่องจากรูปแบบของวงจรไม่ซับซ้อน และวงจรภายในของโอทีเอนั้นมีวงจรสะท้อนกระแสต่อร่วมกับวงจรคู่ผลต่าง จึงสามารถนำคุณสมบัติของวงจรผลคู่ผลต่างที่แฝงอยู่ในโอทีเอมาใช้สร้างวงจรแปลงสัญญาณคลื่นรูปไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งได้นำเสนอไปในบทที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

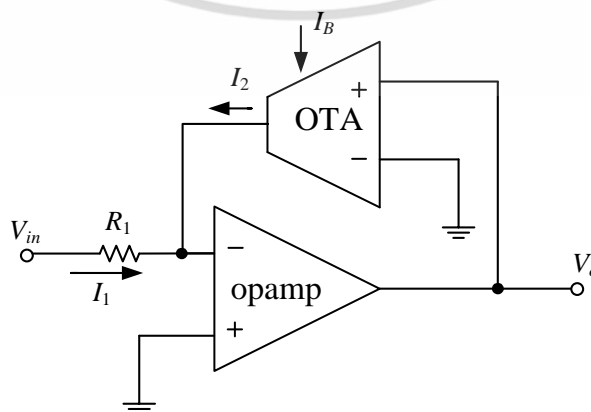
วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอ

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์หรือวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสามเหลี่ยมโดยใช้โอทีเอทีที่มีการชดเชยอณูภูมิ ในอดีตนั้นได้มีการนำเสนอการแปลงกลับฟังก์ชันไซน์โดยใช้โอทีเอทีโดย [7] แต่ตัววงจรนั้นมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากอณูภูมิแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ติดมากับโอทีเอที วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอวงจรแปลงสัญญาณคลื่นไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยมโดยใช้คุณสมบัติของโอทีเอทีเป็นพื้นฐานในการออกแบบ โดยผลของอณูภูมิที่มีต่อโอทีเอทีได้ถูกชดเชย อีกทั้งวงจรที่นำเสนอมีโครงสร้างอย่างง่ายรวมถึงมีราคาถูก เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะการทำงานของวงจรจึงได้ทำการ ทดสอบการทำงานของวงจรโดยการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE และวิธีการต่อวงจรจริง ซึ่งผลการทดสอบการทำงานนั้นเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ

4.2 หลักการทำงานของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอ

หลักการทำงานของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ชดเชยอณูภูมิที่นำเสนอนี้ใช้เทคนิคการแปลงกลับฟังก์ชัน (Inverse function) ของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting amplifier) โดยใช้โอปแอมป์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และจากหลักการการทำงานของโอทีเอทีที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 ที่มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ประกอบด้วย วงจรคู่ผลต่างต่อร่วมกับวงจรสะท้อนกระแส ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีคุณสมบัติของฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์แฝงมากับตัวโอทีเอที ซึ่งการทำงานของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรในรูปที่ 4.1 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง I_1 และ I_2 ได้ดังนี้

$$I_1 + I_2 = 0 \quad (4.1)$$

จากความสัมพันธ์ของโอทีเอในสมการที่ (3.4) และ สมการที่ (4.1) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\frac{V_{in}}{R_1} + I_B \tanh\left(\frac{V_o}{2V_T}\right) = 0 \quad (4.2ก)$$

หรือ

$$V_o = -2V_T \tanh^{-1}\left(\frac{V_{in}}{I_B R}\right) \quad (4.2ข)$$

สมการการกระจายอนุกรมกำลังของฟังก์ชันอินเวอร์สไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ แสดงได้ดังนี้

$$\tanh^{-1}(x) = x + \frac{1}{3}(x)^3 + \frac{1}{5}(x)^5 + \dots \quad (4.3)$$

ดังนั้นจากสมการ (4.2) อาศัยวิธีการกระจายอนุกรมกำลังของฟังก์ชันอินเวอร์สไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ สมการที่ (4.3) สามารถประมาณได้ว่า

$$V_o = -2V_T \left(\frac{V_{in}}{I_B R} + \frac{1}{3} \left(\frac{V_{in}}{I_B R} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{V_{in}}{I_B R} \right)^5 + \dots \right) \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.4) เทอมภายในวงเล็บจะสังเกตว่าเป็นอนุกรมกำลังที่เป็นฟังก์ชันคี่ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับอนุกรมกำลังของฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น [15]

$$K \sin^{-1}(x) = K_T \left(x + B_3 \frac{x^3}{3} + B_5 \frac{x^5}{5} + \dots \right) \quad (4.5ก)$$

โดยที่

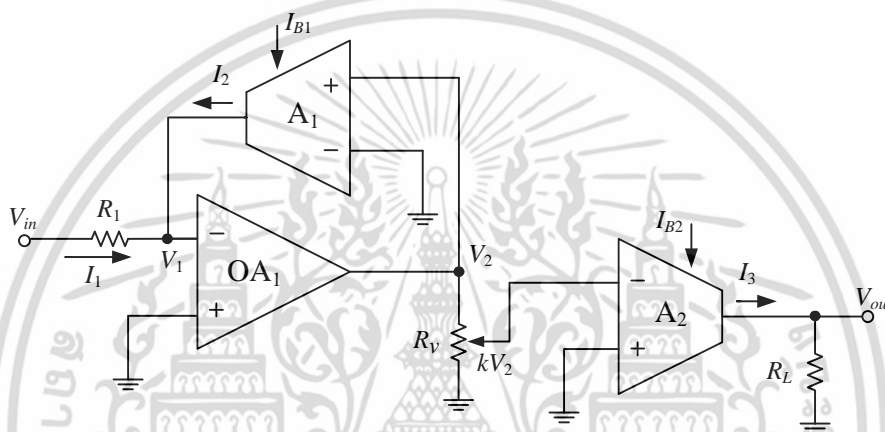
$$B_i = \prod_{j=1}^{\left(\frac{i-1}{2}\right)} \left[\frac{(i-2j)}{i-2j+1} \right] \quad \text{เมื่อ } i = 3, 5, 7, \dots \quad (4.5ข)$$

ถ้าเลือกสัญญาณกระแส I_2 ได้เหมาะสมกับค่า m ที่ตำแหน่งสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_o ในสมการที่ (4.4) สามารถเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = -2V_T \sin^{-1}\left(\frac{mV_{in}}{I_{B1}R}\right) \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.6) จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุต V_o ของวงจรในรูปที่ 4.1 นั้นขึ้นอยู่กับค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิ V_T ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแวดล้อม จึงได้มีการต่อโอทีเอ A_2 เพิ่มดังแสดงในรูปที่ 4.2 เพื่อทำการชดเชยอุณหภูมิแวดล้อมโดยตัววงจรที่นำเสนอประกอบด้วย ออปแอมป์ OA_1 โอทีเอ A_1 และ A_2 ตัวต้านทานคงที่ R_1 และ R_L และตัวต้านทานปรับค่าได้ R_V การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 วงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ชดเชยอุณหภูมิที่นำเสนอ

ค่าแรงดันอินพุต V_{in} ถูกป้อนเข้าไปในวงจรในรูปที่ 4.2 ค่าสัญญาณแรงดัน V_2 สามารถหาได้จาก

$$V_2 = -2V_T \sin^{-1}\left(\frac{mV_{in}}{I_{B1}R}\right) \quad (4.7)$$

แรงดัน V_2 ถูกลดทอนด้วยตัวต้านทาน R_V เพื่อให้ได้ค่าแรงดันอินพุตให้กับโอทีเอ A_2 ที่เหมาะสม โดยมีเงื่อนไขที่แรงดันอินพุตของโอทีเอ A_2 ต้องมีค่าไม่เกิน $2V_T$ ค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_{out} สามารถหาได้จาก

$$V_{out} = -\frac{I_{B2}}{2V_T} R_L k V_2 \quad (4.8)$$

เมื่อ k คือค่าอัตราขยายที่เหมาะสมของแรงดัน V_2 สำหรับใช้เป็นแรงดันอินพุตให้กับโอทีเอ A_2 แทนค่าจากสมการที่ (4.7) ลงในสมการที่ (4.8) ค่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} ของวงจรที่นำเสนอมีค่าสมการเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out} = -\frac{I_{B2}}{2V_T} R_L k \left(-2V_T \sin^{-1} \left(\frac{mV_{in}}{I_{B1} R} \right) \right) \quad (4.9ก)$$

$$V_{out} = I_{B2} R_L k \sin^{-1} \left(\frac{mV_{in}}{I_{B1} R} \right) \quad (4.9ข)$$

จากสมการที่ (4.9) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} ของวงจรที่นำเสนออยู่ในรูปแบบอินเวิร์สฟังก์ชันไซน์นอกจากนี้ผลของอุณหภูมิได้ถูกชดเชยออกไปอีกด้วย

4.3 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจร

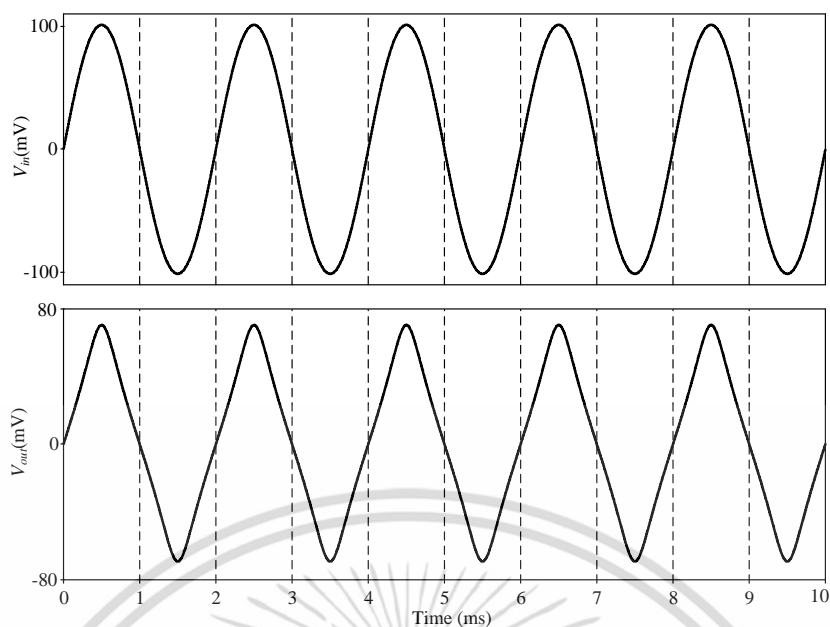
4.3.1 ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจร

ทำการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่ชดเชยอุณหภูมิในรูปที่ 4.2 โดยวิธีการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE โดยเลือกใช้ ออปแอมป์เบอร์ LM358 สำหรับ OA_1 และโอทีเอเบอร์ CA3080 สำหรับ A_1 และ A_2 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1

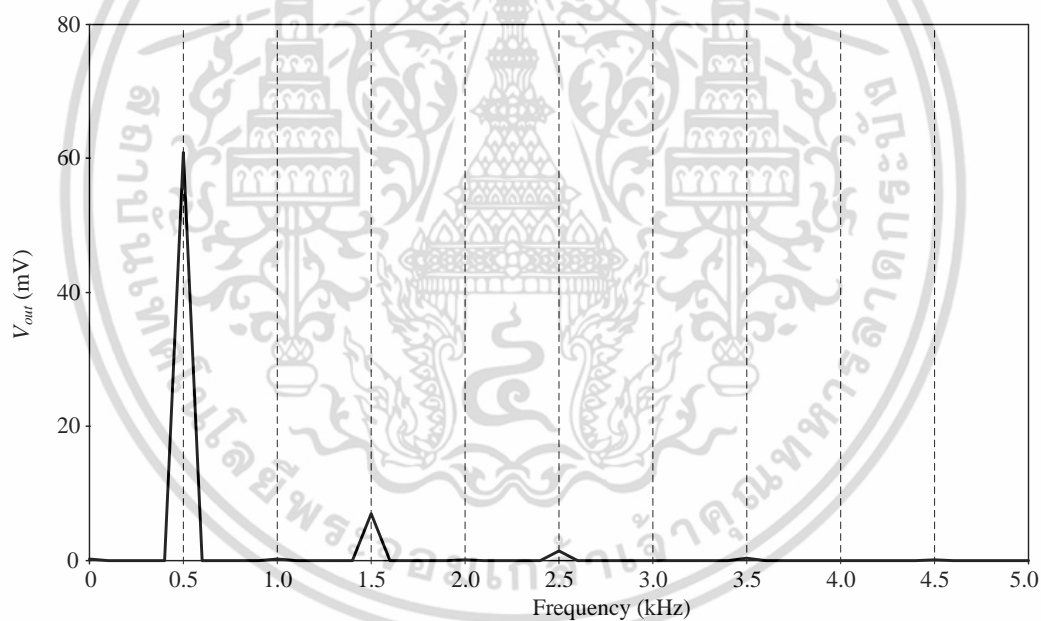
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเลียนแบบการทำงานของวงจร

ตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์
Supply Voltage	$\pm 10V$
R_1	1k Ω
R_L	10k Ω
I_{B1}	100 μA
I_{B2}	400 μA

ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรในรูปที่ 4.2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.3-4.5 ในรูปที่ 4.3 แสดงผลการเลียนแบบการทำงานเมื่อแรงดันอินพุต V_{in} เป็นสัญญาณไซน์ ความถี่ 500 Hz ขนาด 200 mV_{pp} จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} ที่ได้เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ทำการทดสอบเพื่อเป็นการยืนยันสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานของวงจร องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต V_{out} ที่ได้จากรูปที่ 4.3 แสดงดังในรูปที่ 4.4

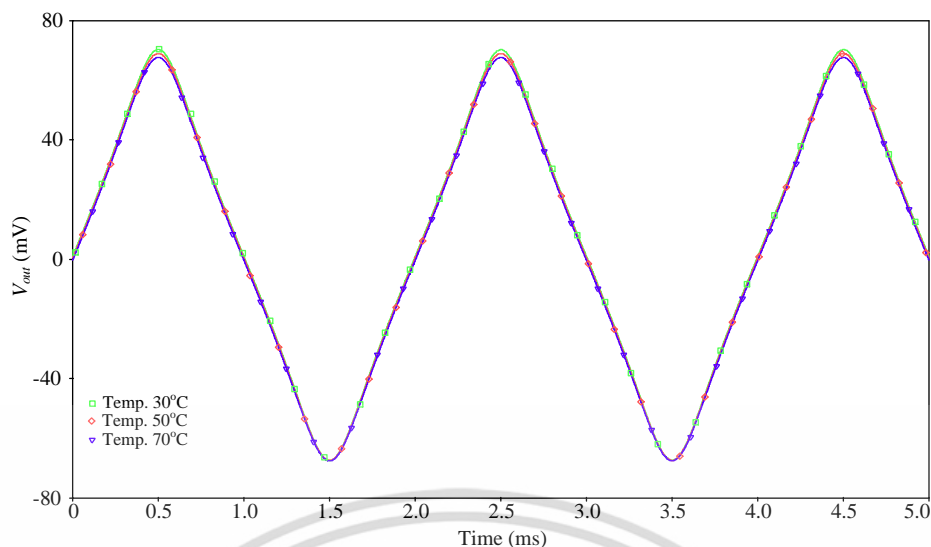
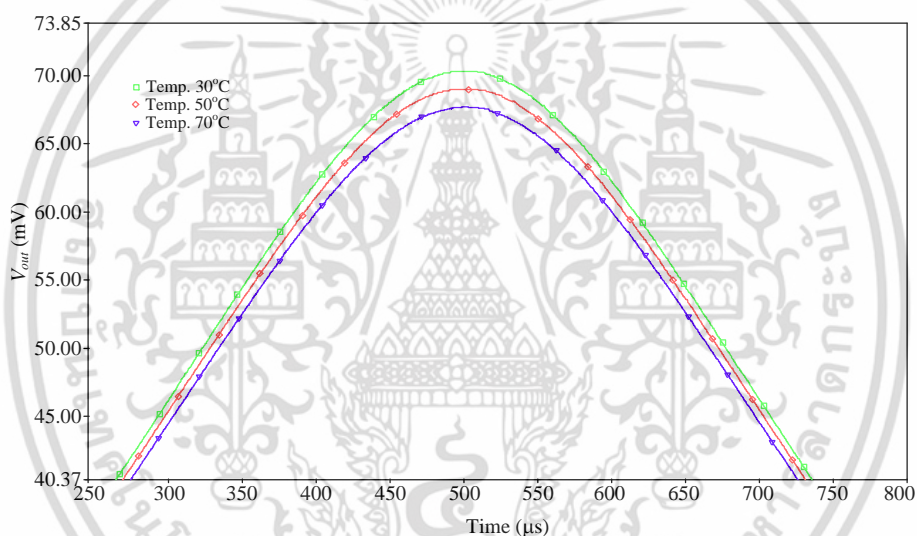


รูปที่ 4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่นำเสนอ



รูปที่ 4.4 ผลการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางความถี่ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) สัญญาณเอาต์พุต V_{out} ที่ได้(ข) ภาพขยายที่จุดยอดของสัญญาณเอาต์พุต V_{out} ในรูป (ก)

รูปที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 3 ค่า

รูปที่ 4.5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 3 ค่า คือ 30°C 50°C และ 70°C สามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ε_1 จากแรงดันเอาต์พุตที่อุณหภูมิ 25°C ได้ดังนี้

$$\varepsilon_1 = \left| \frac{V_{ref} - V_{out}}{V_{ref}} \right| \times 100\% \quad (4.10)$$

เมื่อ ε_1 คือ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงดันเอาต์พุตที่อ้างอิงกับแรงดัน V_{ref}

V_{ref} คือ แรงดันเอาต์พุตที่อุณหภูมิ 25°C

V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุตที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถสรุปเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงดันเอาต์พุตเทียบกับแรงดัน V_{ref} ที่อุณหภูมิต่างๆ จากการจำลองการทำงานได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงดันเอาต์พุตที่อุณหภูมิต่างๆเทียบกับแรงดัน V_{ref}

อุณหภูมิ (°C)	ค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{out})	ε_1 (%)
25	132.13 mV	0
50	130.70 mV	1.09
70	129.64 mV	1.92

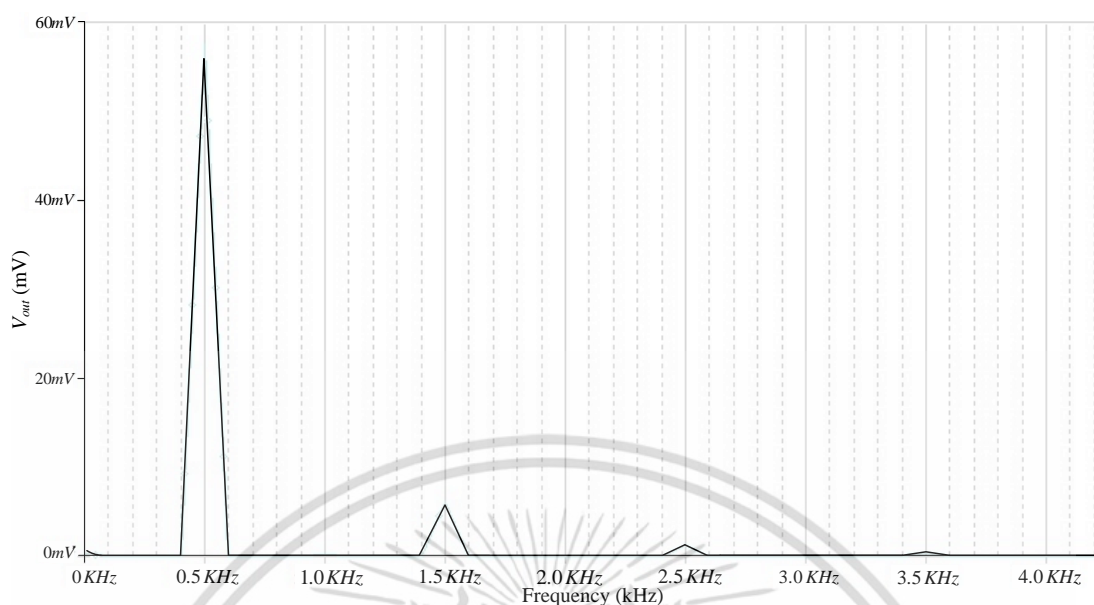
จากตารางที่ 4.2 ผลที่ได้จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมิมีผลต่อขนาดของแรงดันเอาต์พุตน้อย ซึ่งมีค่ามากที่สุดคิดเป็น 1.9% จากค่าความผิดพลาดที่แสดงในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า วงจรที่นำเสนอสามารถแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ อีกทั้งสามารถยังชดเชยผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อมได้ และแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ได้ในแสดงในรูปที่ 4.6



(ก) ที่อุณหภูมิ 25°C

รูปที่ 4.6 ผลการเลียนแบบองค์ประกอบทางความถี่ของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ที่อุณหภูมิ 50°C



(ค) ที่อุณหภูมิ 70°C

รูปที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงของคัพประกอบทางความถี่ของวงจรที่อุณหภูมิต่างๆ (ต่อ)

รูปที่ 4.6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานโดยวัดสัญญาณเอาต์พุต V_{out} ที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ในรูปแบบของคัพประกอบทางความถี่ที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C และ 70°C สำหรับค่าองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต V_{out} ที่ได้ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ จากการเลียนแบบการทำงาน

Frequency components	25°C		50°C		70°C	
	Ideal triangle wave (V_{rms})	Output of proposed circuit (V_{rms})	Ideal triangle wave (V_{rms})	Output of proposed circuit (V_{rms})	Ideal triangle wave (V_{rms})	Output of proposed circuit (V_{rms})
0.5kHz	58.01	58.01	57.59	57.59	57.29	57.29
1.5kHz	6.45	6.40	6.39	6.18	6.36	6.03
2.5kHz	2.32	1.27	2.30	1.19	2.29	1.14

กำหนดให้ ε_2 คือ ค่าผลรวมความผิดพลาดของแต่ละองค์ประกอบความถี่ที่อยู่ในรูปของรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (Root-weighted-mean-square) ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^q w_i \left(\frac{f'_i - f_i}{f_i} \right)^2} \times 100\% \quad (4.11)$$

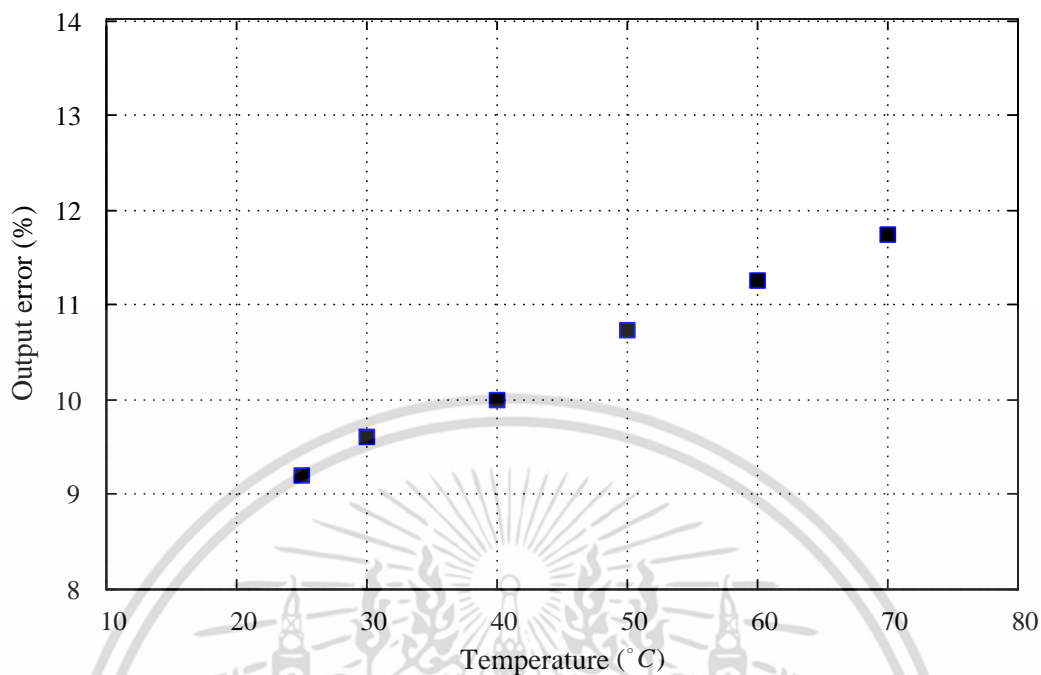
โดยที่ค่า f'_i และ f_i คือค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square; rms) ขององค์ประกอบความถี่ลำดับที่ i จากสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_{out} ที่วัดได้กับค่าในอุดมคติตามลำดับ q คือองค์ประกอบความถี่สุดท้ายที่ต้องการคำนวณ และ w_i คือค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบความถี่ที่ประกอบขึ้นเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม โดยจากตารางที่ 4.3 สามารถคำนวณหาค่า ε_2 ในช่วง 25°C - 70°C ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลรวมค่าความผิดพลาด ε_2 แต่ละองค์ประกอบความถี่ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากการเลียนแบบการทำงาน

อุณหภูมิ (°C)	ε_2 (%)
25	9.2
50	10.74
70	11.74

จากตารางที่ 4.4 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าผลรวมความผิดพลาด ε_2 ได้ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้นั้นมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดนั้นมากที่สุดอยู่ที่ 11.74% ซึ่งเป็นค่าที่สูง จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการต่อวงจรจริงใหม่ โดยจะทำการเสนอในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟผลรวมความผิดพลาด ε_1 ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนแปลงการทำงาน

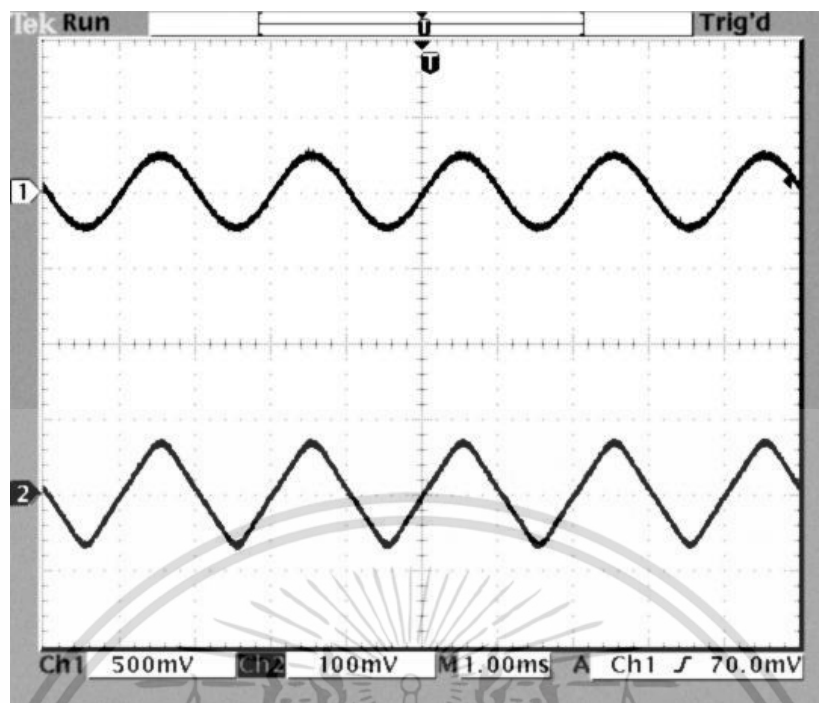
4.3.2 ผลการทำงานของวงจรแบบต่อจริง

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบการทำงานของวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 4.2 ด้วยการต่อวงจรจริง โดยเลือกใช้อุปกรณ์ LM351 สำหรับออปแอมป์ OA_1 และ CA3280 สำหรับโอทีเอ A_1 และ A_2 ส่วนพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการต่อจริงแสดงในตารางที่ 4.5

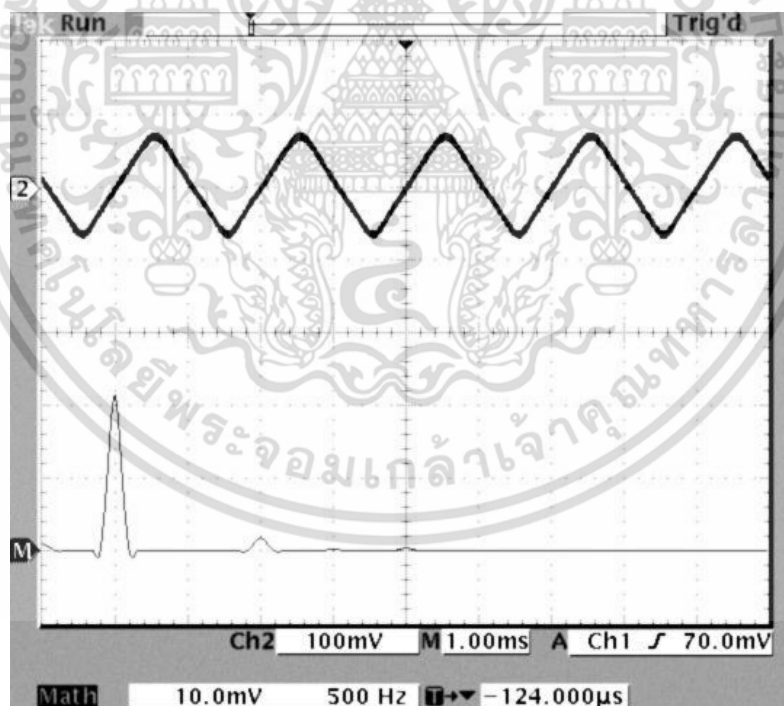
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบต่อวงจรจริง

ตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์
Supply Voltage	$\pm 10V$
R_1	$1k\Omega$
R_L	$10k\Omega$
I_{B1}	$300\mu A$
I_{B2}	$700\mu A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สัญญาณแรงดันอินพุตไซน์และเอาต์พุตที่เป็นสามเหลี่ยม



(ข) องค์ประกอบทางความถี่ของวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์
รูปที่ 4.8 ผลการทำงานวงจรด้วยการต่อจริง

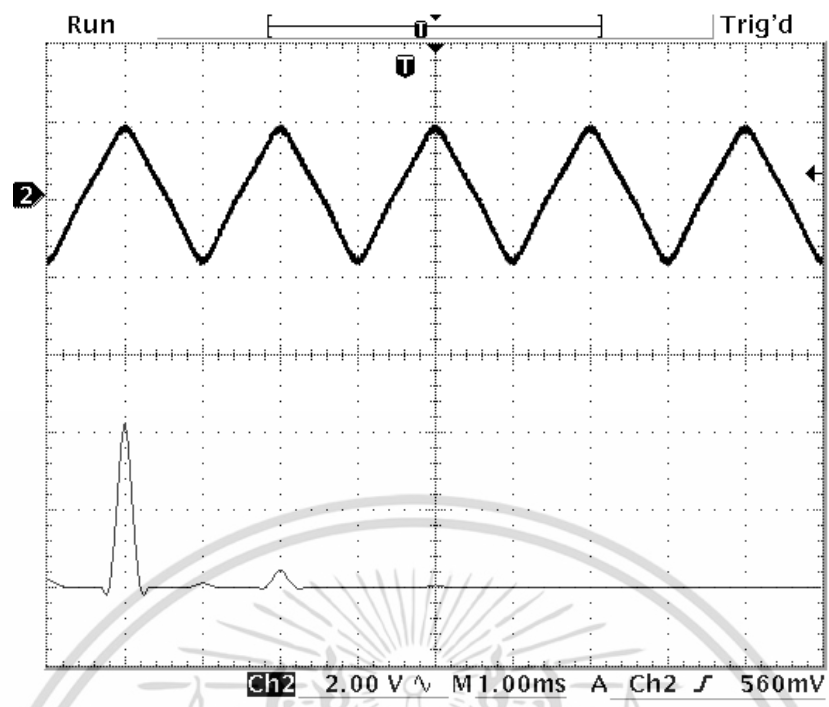
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงผลการต่อวงจรจริงโดยสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่ 500 Hz ขนาด 500 mV_{PP} ในรูปที่ 4.8(ก) สัญญาณเส้นบนเป็นสัญญาณอินพุต V_{in} ส่วนสัญญาณเส้นล่างเป็นสัญญาณเอาต์พุต V_{out} จะเห็นได้ว่า วงจรที่นำเสนอสามารถแปลงกลับสัญญาณไซน์ให้เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมได้ ส่วนรูปที่ 4.8(ข) แสดงองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต V_{out} ที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยรอบที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C และ 70°C

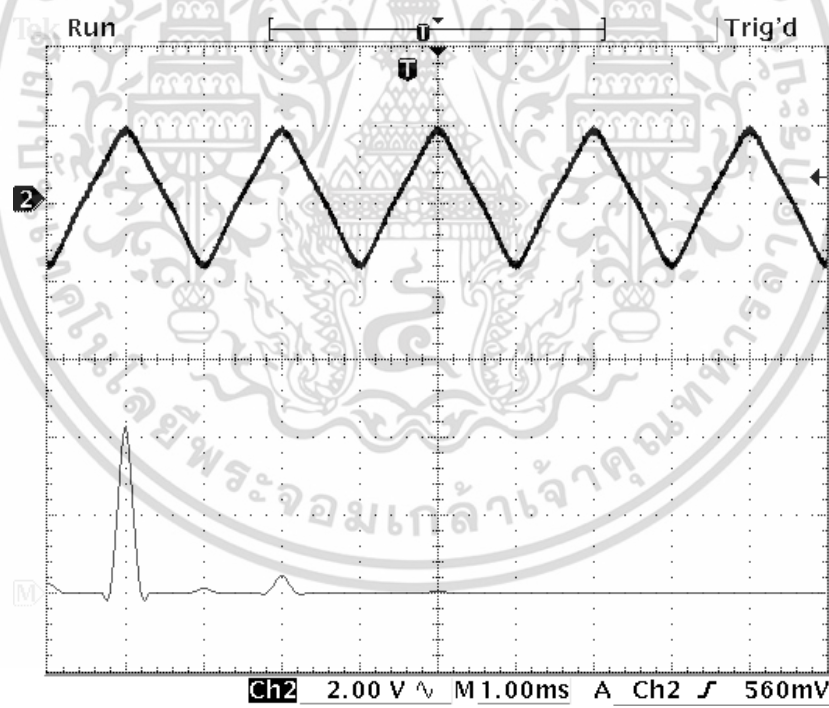
ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{out})	ϵ_1 (%)
25	3.320 V	0
50	3.340 V	0.60
70	3.426 V	3.19

เมื่อนำค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้มาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนโดยเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุตที่อุณหภูมิห้องเป็นจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากวงจรได้จากสมการที่ (4.10) จะพบว่า เมื่อนำค่าแรงดันเอาต์พุตที่อุณหภูมิต่างๆ มาแทนค่าจะได้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ตามตารางที่ 4.6 อยู่ที่ 3.19% ซึ่งหากเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานอยู่ที่ 1.9% พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการต่อวงจรจริงมากกว่าการจำลองผลการทำงาน เนื่องมาจากการประมาณค่าของฟังก์ชันอินเวอร์สไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์กับอนุกรมกำลังของฟังก์ชันอินเวอร์สไซน์ในสมการที่ 4.6



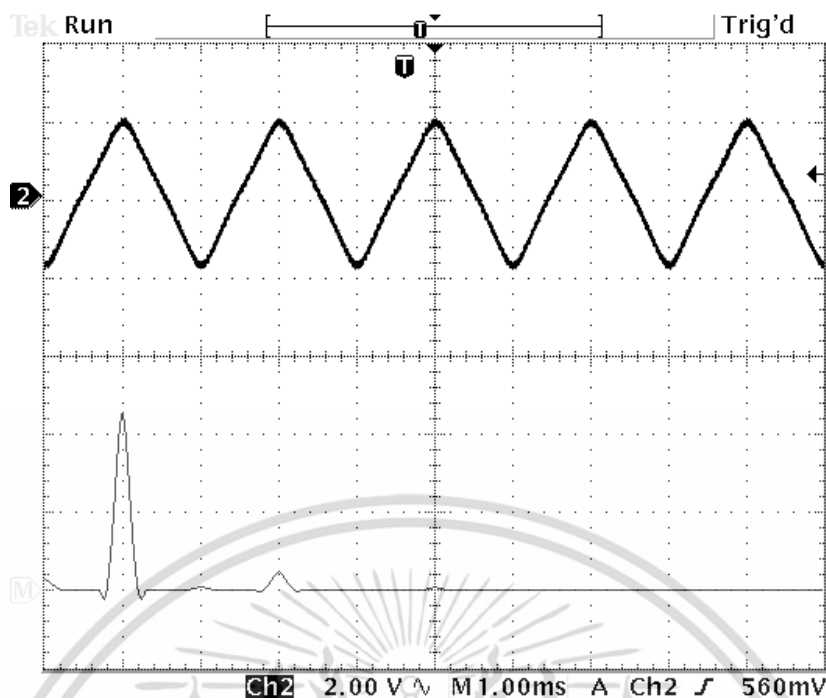
(ก) ที่อุณหภูมิ 25°C



(ข) ที่อุณหภูมิ 50°C

รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุต V_{out} และองค์ประกอบทางความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ที่อุณหภูมิ 70°C

รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุต V_{out} และองค์ประกอบทางความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ (ต่อ)

รูปที่ 4.9 แสดงสัญญาณเอาต์พุต V_{out} ที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ พร้อมทั้งองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณที่ได้ที่อุณหภูมิ 25°C, 50°C และ 70°C สำหรับองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต V_{out} ที่ได้ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ

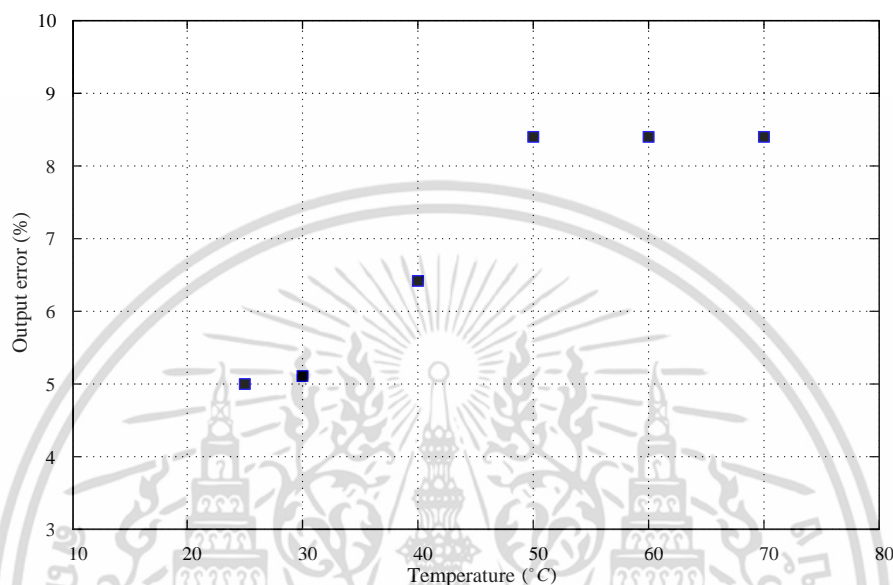
Frequency components	25°C		50°C		70°C	
	Ideal triangle wave (V_{rms})	Output of proposed circuit (V_{rms})	Ideal triangle wave (V_{rms})	Output of proposed circuit (V_{rms})	Ideal triangle wave (V_{rms})	Output of proposed circuit (V_{rms})
0.5kHz	1.12	1.12	1.14	1.14	1.14	1.14
1.5kHz	0.12	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12
2.5kHz	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05	0.03

เรานำค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบทางความถี่ในตารางที่ 4.7 มาหาค่าผลรวมค่าความผิดพลาดจากสมการที่ (4.11) ในช่วง 25°C - 70°C จะแสดงในตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลรวมค่าความผิดพลาด ε_2 แต่ละองค์ประกอบความถี่ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ε_2 (%)
25	5
50	8.4
70	8.4



รูปที่ 4.10 กราฟผลรวมความผิดพลาด ε_2 ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

จากตารางที่ 4.8 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าผลรวมความผิดพลาด ε_2 ได้ดังรูปที่ 4.10 โดยในการทดลองนั้นได้ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยรอบของวงจรแล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุตที่ได้ในช่วงอุณหภูมิ 25°C - 70°C แล้วจึงนำมาคิดหาค่าผลรวมความผิดพลาดของแต่ละองค์ประกอบความถี่ตามสมการที่ (4.11) มีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 8.4% จึงเป็นตัวยืนยันการทำงานของวงจรมีการทำงานได้จริงและผลลัพธ์ที่ได้นั้นสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี

4.4 สรุป

วงจรแปลงกลับสัญญาณไซน์เป็นสามเหลี่ยมหรือวงจรแปลงกลับฟังก์ชันไซน์ที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วงจรโอทีเอในการออกแบบ วงจรที่น่าเสนอมีโครงสร้างอย่างง่ายอีกทั้งอุปกรณ์สามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด ผลจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรและผลจากการต่อวงจรจริงตามรูปที่ 4.2 พบว่าวงจรมีความสามารถแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมได้จริงและค่าความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นได้ถูกขจัดเซยออกไป เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรจริงกับการเลียนแบบวงจรมีผลสอดคล้องตามทฤษฎี มีค่าผลรวมค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 8.4% และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโดยการวัดสัญญาณ V_{out} อยู่ที่ 3.19%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนเห็นใบเสร็จรับเงินขอคืนค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแนวทางในการแปลงสัญญาณคลื่นไซน์เป็นคลื่นสามเหลี่ยมที่ชดเชยอุณหภูมิโดยการใช้วงจรขยายค่าความนำ หรือวงจรโอทีเอ ที่มีคุณสมบัติไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ของวงจรคู่ผลต่างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และยังสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับเปลี่ยน ค่ากระแสไบอัสภายนอกของวงจรโอทีเอ โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย วงจรโอทีเอจำนวน 2 ตัวต่อร่วมกับบออปแอมป์ 1 ตัว ซึ่งเห็นได้ว่าวงจรที่นำเสนอมีขนาดเล็กเนื่องจาก ปัจจุบันวงจรโอทีเอเป็นวงจรสำเร็จรูปที่มีการผลิตออกมาหลากหลายรุ่นเช่น CA3080 CA3280 และ LM13600 เป็นต้น จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรและการต่อวงจรจริง พบว่าการแปลงกลับสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมมีค่าผลรวมความผิดพลาดของวงจรมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 8.4 % และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโดยการวัดสัญญาณแรงดัน V_{out} อยู่ที่ 3.19% สามารถยืนยันถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรได้ด้วยผลการเลียนแบบการทำงานและผลทดสอบการทำงานด้วยการต่อวงจรจริง ซึ่งผลการทำงานของวงจรมีความสอดคล้องและเป็นไปในทางเดียวกัน

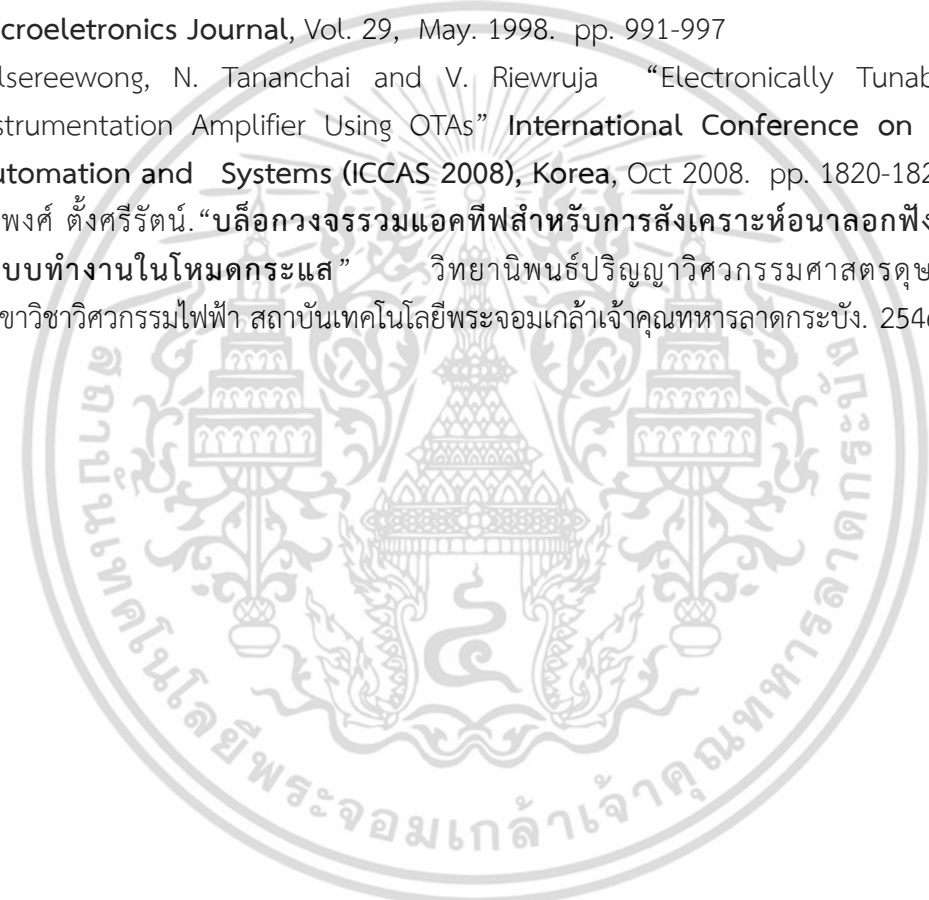
5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ

จากตัวชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังมีประเด็นที่น่าสนใจอันเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาวงจรให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเด็น ได้แก่ เนื่องจากตัววงจรโอทีเอที่ใช้คือ CA3280 นั้นใช้ได้ภายในย่านอุณหภูมิ 25-70 องศาเซลเซียสจึงเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน และยังคงมีข้อจำกัดในแง่ของช่วงปฏิบัติการของวงจร ที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวงจรโอทีเอที่เลือกใช้ อุณหภูมิที่มีผลต่อการทำงาน จึงได้ออกแบบวงจรตัวชดเชยผลของความผิดพลาดของวงจรโอทีเอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วยตัวชดเชยอุณหภูมิยังมีค่าสูงถึง 8.4% ในการแนะนำการทำวิจัยต่อคือ ต้องทำการเปลี่ยนวงจรย่อยในส่วนของวงจรแปลงกลับสัญญาณคลื่นรูปไซน์เป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยมหรือ ปรับเปลี่ยนวิธีการชดเชยใหม่ให้สามารถชดเชยค่าที่ผิดพลาดขณะที่มีอุณหภูมิสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Karry, J.K. Seon, J.J. Charlot, and N. Masmoudi. "VHDL-AMS modeling of a new PLL with an inverse sine phase detector (ISPD PLL)" **Proceeding of the 2002 IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation**, 6-8 Oct. 2002. pp. 80-83
- [2] Y. Chiu, B. Jalali, S. Garner, and W. Steier. "Broad-band electronic linearizer for externally modulated analog fiber-optic links" **IEEE Photonics Technol. Lett.**, vol. 11, Jan. 1999. pp. 48-50
- [3] M. Benammar, L. Ben-Brahim, and M. A. Alhamadi. "A Novel Resolver-to-360° Linearized Converter" **IEEE Sensors J.**, vol. 4, Feb. 2004. pp. 96-101
- [4] J. Tongcharoen, W. Petchmaneelumka, and V. Riewruja. "Low-Cost Resolver-to-DC Converter." **15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015)**, Oct. 2015. pp. 1699-1702
- [5] Gilbert. B. "A Monolithic Microsystem for Analog Synthesis of Trigonometric Functions and Their Inverses" **IEEE Journal of Solid-Stat Circuits**, vol.sc-17, No.6, Dec. 1982. pp. 1179-1191.
- [6] J.K. Seon. and J.J. Charlot. "A CMOS Inverse Trigonometric Function Circuit" **Proceedings 43rd IEEE Midwest Symposium On Circuits and Systems, Lansing MI**, Aug. 2000. pp. 474-477
- [7] A. Kaewpoonsuk, S. Khunkong, A. Rerkratn, W. Petchmaneelumka, and N. Kanjanapart. "OTA-Based Triangular-to-Sine and Sine-to-Triangular Waveform Converters" **JSST 2013, Tokyo, Japan**, Sep 2013.
- [8] E.W. Greneich. 1997. **Analog Integrated Circuits**. New York. Chapman & Hall
- [9] M.T. Abuelma' atti and A. Bentrchia. "A novel mixed mode OTA-C universal filter" **International Journal of Electronics**, vol. 92, no. 7, Dec. 2005. pp. 375-383
- [10] V. Riewruja and W. Petchmaneelumka. "Floating current-controlled resistance converters using OTAs" **Int. J. Electron. Commun. (AEU)**, vol. 62, Nov. 2008. pp. 725-731
- [11] Robert G. Meyer, Willy M. C. Sansen, Sik.L and Stefan P. "The Differential Pair as a Triangle-Sine Wave Converter" **IEEE. Journal of Solid-State Circuits**, vol.11, Jun. 1976. pp. 418-420
- [12] T.G. Constandinou and J. Georgiou. "Micropower arcsine circuit for tilt processing" **Electronic Letters**, vol.44, no.23, Nov. 2008. pp. 1336-1338
- [13] Narasimha, M. J.,Shenoi, K. and Peterson, A. M. "The Arcsine Transform and It's Application in Signal Processing" **ICASSP'77**, May 1977. pp. 502-505

- [14] Seevinck, E. “Simple, Wide-Range Approximations to Trigonometric and Inverse Trigonometric Function Useful in Real-Time Signal processing” **IEE Proceedings G - Electronic Circuits and Systems**, vol.128, Pt.G, no.1, Feb. 1981. pp. 41-45
- [15] อนุชา แก้วพลสุข. “การสังเคราะห์วงจรแปลงสัญญาณรีโซลเวอร์เป็นสัญญาณดิจิตอล” วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [16] L.G. Randall, and S.S. Edgar. “Active filter design using operational transconductance amplifiers : A tutorial” **IEEE Circuits and Devices Magazine**, Mar. 1985. pp. 20-32
- [17] H. Kuntman and A. Özpınar. “On the realization of DO-OTA-C oscillators” **Microelectronics Journal**, Vol. 29, May. 1998. pp. 991-997
- [18] Julsereewong, N. Tananchai and V. Riewruja “Electronically Tunable Gain Instrumentation Amplifier Using OTAs” **International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2008)**, Korea, Oct 2008. pp. 1820-1823
- [19] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์. “บล็อกวงจรรวมแอกทีฟสำหรับการสังเคราะห์อนาล็อกฟังก์ชันเชิงระบบทำงานในโหมดกระแส” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.



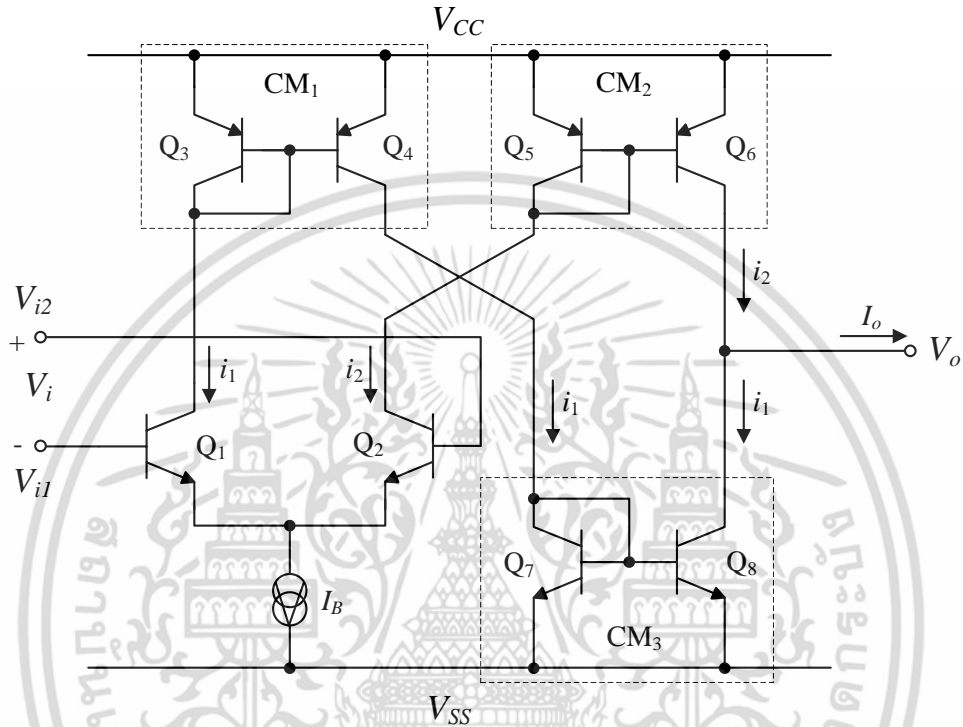


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
วงจรโอทีเอ

ก1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุต V_{in} กับค่ากระแสเอาต์พุต I_o



รูปที่ ก1 วงจรภายในของโอทีเอ

จากรูปที่ ก1 จะได้ค่าผลรวมกระแสที่ไหลผ่านขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 มีค่าเท่ากับ

$$i_{e1} + i_{e2} = I_B = \frac{i_{c1}}{\alpha_F} + \frac{i_{c2}}{\alpha_F} \quad (ก1.1)$$

เมื่อ i_{e1} และ i_{e2} คือค่ากระแสที่ไหลผ่านของอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ ค่า i_{c1} และ i_{c2} คือค่ากระแสที่ไหลผ่านขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ และค่า α_F คือค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์ต่อค่ากระแสอิมิตเตอร์ เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานจะได้กระแส i_1 และ i_2 มีค่าเท่ากับ

$$i_1 = i_{c1} = i_s e^{(V_{be}/V_T)} \quad (ก1.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_1 = i_{c1} = i_s e^{(V_{be1}/V_T)} \quad (ก1.3)$$

เมื่อ i_s คือค่ากระแสอิ่มตัว ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ V_{be1} และ V_{be2} คือค่าแรงดันตกคร่อมขาอีมีเตอร์-เบส ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ และ V_T คือค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิจากสมการที่ (ก1.1) (ก1.2) และ (ก1.3) กำหนดให้ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าอัตราขยายระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์กระแสเบสมีค่าสูงมาก จะสามารถประมาณค่า α_F มีค่าเท่ากับหนึ่ง สามารถเขียนรูปแบบความสัมพันธ์ใหม่ได้เป็น

$$I_B = i_x (e^{(V_{be1}/V_T)} + e^{(V_{be2}/V_T)}) \quad (ก1.4)$$

$$i_s = \frac{I_B}{e^{(V_{be1}/V_T)} + e^{(V_{be2}/V_T)}} \quad (ก1.5)$$

แทนค่าสมการที่ (ก1.5) ลงในสมการที่ (ก1.2) และ (ก1.3) จะได้

$$i_1 = \frac{I_B e^{(V_{be1}/V_T)}}{e^{(V_{be1}/V_T)} + e^{(V_{be2}/V_T)}} \quad (ก1.6)$$

$$i_2 = \frac{I_B e^{(V_{be2}/V_T)}}{e^{(V_{be1}/V_T)} + e^{(V_{be2}/V_T)}} \quad (ก1.7)$$

เนื่องจากกำหนดให้วงจรสะท้อนกระแส (CM_i) ทุกตัวมีอัตรากระแสสะท้อนกระแสเท่ากับ 1 ดังนั้นจะได้ I_o มีค่าเท่ากับ

$$I_o = i_2 - i_1 \quad (ก1.8)$$

แทนค่าสมการที่ (ก1.6) และ (ก1.7) ลงในสมการที่ (ก1.8) จะได้

$$I_o = \frac{I_B [e^{(V_{be1}/2V_T)} - e^{(V_{be2}/2V_T)}]}{[e^{(-V_{be1}/2V_T)} + e^{(V_{be2}/2V_T)}]} \quad (ก1.9)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันอินพุต V_i จะได้

$$V_{i2} - V_{i1} = V_{be2} - V_{be1} \quad (ก1.10)$$

จากสมการที่ (ก1.10) เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 มีความสมพงษ์กัน ซึ่งจะประมาณได้ว่า

$$V_{be2} = -V_{be1} \quad (ก1.11)$$

แทนค่าสมการที่ (ก1.10) และ (ก1.11) ลงในสมการที่ (ก1.9) จะได้

$$I_o = \frac{I_B [e^{\frac{V_{i2}-V_{i1}}{2V_T}} - e^{-\frac{V_{i2}-V_{i1}}{2V_T}}]}{(e^{\frac{V_{i2}-V_{i1}}{2V_T}} + e^{-\frac{V_{i2}-V_{i1}}{2V_T}})} \quad (ก1.12)$$

จาก

$$\tanh(x) = \frac{[e^x - e^{-x}]}{(e^x + e^{-x})} \quad (ก1.13)$$

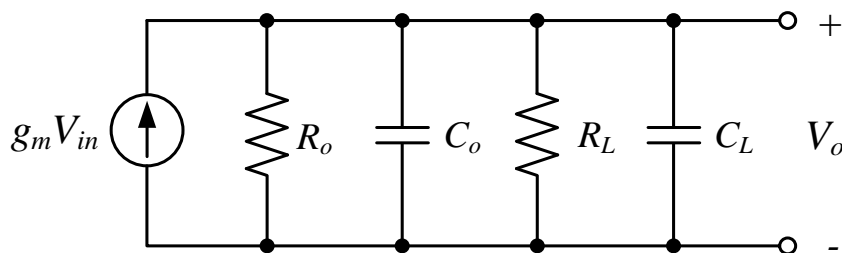
เปรียบเทียบสมการที่ (ก1.12) กับสมการที่ (ก1.13) จะได้

$$I_o = I_B \tanh\left(\frac{V_{i2} - V_{i1}}{2V_T}\right) \quad (ก1.14)$$

และเมื่อกำหนดให้ $V_i = V_{i2} - V_{i1}$ จะได้

$$I_o = I_B \tanh\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) \quad (ก1.15)$$

ก2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรอทีเอ



รูปที่ ก2 วงจรสมมูลของสัญญาณขนาดเล็กสำหรับโอทีเอในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่

จากวงจรในรูปที่ ก2 เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานรวม R_{oL} และค่าความจุไฟฟ้ารวม C_{oL} จะได้

$$R_{oL} = R_o // R_L = \frac{R_o R_L}{R_o + R_L} \quad (ก2.1)$$

$$C_{oL} = C_o // C_L = C_o + C_L \quad (ก2.2)$$

เมื่อ R_o และ C_o คือ ค่าความต้านทานแผลงและค่าความจุไฟฟ้าแผลงที่เอาต์พุตของโอทีเอ
 R_L และ C_L คือ ค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าของโหลดที่นำมาต่อร่วมกับโอทีเอ

จากสมการที่ (ก2.1) และ (ก2.2) เมื่อพิจารณาในเทอมของค่าอิมพีแดนซ์ จะได้ตั้งสมการ

$$Z_{R_{oL}}(s) = R_{oL} \quad (ก2.3)$$

และ

$$Z_{C_{oL}}(s) = \frac{1}{sC_{oL}} \quad (ก2.4)$$

จึงทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ Z_o ที่โนดเอาต์พุตของโอทีเอมีค่าดังนี้

$$Z_o(s) = Z_{R_{oL}}(s) // Z_{C_{oL}}(s) = \frac{Z_{R_{oL}}(s)Z_{C_{oL}}(s)}{Z_{R_{oL}}(s) + Z_{C_{oL}}(s)} = \frac{R_{oL}}{R_{oL}C_{oL}s + 1} \quad (ก2.5)$$

จากรูปที่ ก2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต $V_o(s)$ กับแรงดันอินพุต $V_{in}(s)$ แสดงได้ตั้งสมการ

$$g_m V_{in}(s) = \frac{V_o(s)}{Z_o(s)} \quad (ก2.6)$$

หรือ
$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = g_m Z_o(s) \quad (ก2.7)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (ก2.5) ลงในสมการ (ก2.7) จะได้สมการ

$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{g_m R_{oL}}{R_{oL} C_{oL} s + 1} = \frac{g_m (R_o // R_L)}{(R_o // R_L)(C_o + C_L)s + 1} \quad (ก2.8)$$

แทนค่า $s = j\omega$ ลงในสมการที่ (ก2.8) จะได้

$$A_v(j\omega) = \frac{g_m R_{oL}}{R_{oL} C_{oL} j\omega + 1} = \frac{g_m (R_o // R_L)}{(R_o // R_L)(C_o + C_L)j\omega + 1} = \frac{A_{ov}}{j(\omega/\omega_c) + 1} \quad (ก2.9)$$

$$\text{เมื่อ} \quad A_{ov} = g_m R_{oL} = g_m (R_o // R_L) \quad (ก2.10)$$

$$\omega_c = \frac{1}{R_{oL} C_{oL}} = \frac{1}{(R_o // R_L)(C_o + C_L)} \quad (ก2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์

บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารวิชาการและการประชุมวิชาการระดับนานาชาติในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีรายละเอียดดังนี้

- [1] P. Apisitticharoonlert, W. Petchmaneelumka, and V. Riewruja, “Inverse sine function circuit with temperature compensation”, **International MultiConference of Engineer and Computer Scientists 2016 (IMECS)**, Hong Kong, 16-18 March 2016, pp. 616-619. 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lecture Notes in Engineering and Computer Science

IMECS 2016

International MultiConference of
**Engineers and Computer
 Scientists 2016**

Volume II

**Hong Kong
 16-18 March, 2016**

S. I. Ao
 Oscar Castillo
 Craig Douglas
 David Dagan Feng
 A. M. Korsunsky (Eds.)

IA ENG

International Association of Engineers

ISBN: 978-988-14047-6-3

ISSN: 2078-0958

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Inverse Sine Function Circuit with Temperature Compensation

Perm Apisittharoonlert, Wandee Petchmaneelumka, and Vanchai Riewruja

Abstract—A technique to realize inverse sine function circuit with temperature compensation is presented in this paper. The hyperbolic tangent characteristic of bipolar-transistor differential pair existed in operational transconductance amplifier (OTA) is utilized for the proposed realization method. The proposed scheme provides a simple configuration and low cost. Simulation and experimental results confirming the performance of the proposed scheme are agreed with the theoretical values.

Index Terms—sine-to-triangular waveform converter, operational transconductance amplifier, temperature compensation, hyperbolic tangent

I. INTRODUCTION

Inverse sine function circuit or sine-to-triangular waveform converter is important circuit building block in electronic signal processing, instrumentation and measurement system. Many applications of sine-to-triangular waveform converter can be found in the literatures [1-4]. The techniques for implementation of sine-to-triangular waveform converter based on the use of hyperbolic tangent characteristic of bipolar-transistor differential pair existed in OTA have been reported [4-5]. Unfortunately, the performance of these approaches is disturbed by ambient temperature which exists in the behavior of OTA. Therefore, the aim of this paper is to propose a sine-to-triangular waveform converter based on the use of OTA's characteristic. The temperature effect of OTA used in the proposed scheme is compensated. Moreover, the circuit configuration is simple and low cost. PSPICE simulation and experimental results verifying the performance of the proposed circuit agreed with theoretical values are given.

II. CIRCUIT DESCRIPTION

A. Principle of OTA

Basic scheme of BJT-based OTA and its symbol is shown

Manuscript received December 23, 2015. This work was supported in part by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang of Thailand under Grant KREF115701.

Perm Apisittharoonlert is with the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand (e-mail: pay_ac120@msn.com).

Wandee Petchmaneelumka is with the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand (corresponding author to provide phone: 662-739-0758; fax: 662-739-0758; e-mail: wandee.per@kmit.ac.th).

Vanchai Riewruja is with the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand (e-mail: vanchai.ri@kmit.ac.th).

in Fig. 1, where V_{in} , I_B and I_o define the input voltage, bias current and output current of OTA, respectively.

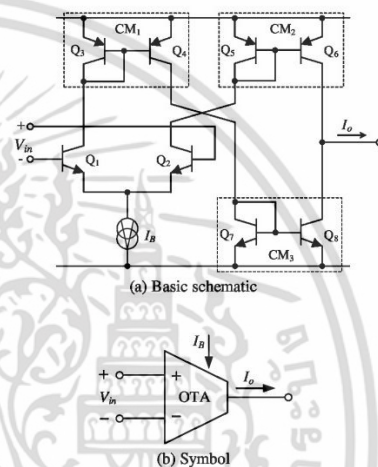


Fig. 1. BJT-based of OTA.

Transistors $Q_1 - Q_2$ form the differential pair. Transistors $Q_3 - Q_4$, $Q_5 - Q_6$ and $Q_7 - Q_8$ function as the current mirrors CM_1 , CM_2 and CM_3 , respectively, with unity gain. The relation between V_{in} and I_o can be given by

$$I_o = I_B \tanh(V_{in}/2V_T) \quad (1a)$$

or

$$V_{in} = 2V_T \tanh^{-1}(I_o/I_B) \quad (1b)$$

where V_T is the thermal voltage. From (1b), the hyperbolic tangent term in (1a) can be expressed as

$$I_o = I_B \left(\frac{V_{in}}{2V_T} - \frac{1}{3} \left(\frac{V_{in}}{2V_T} \right)^3 + \frac{2}{15} \left(\frac{V_{in}}{2V_T} \right)^5 - \dots \right) \quad (2)$$

It can be seen that the series covers to a sine function as

$$\sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots \quad (3)$$

If the input voltage of OTA V_{in} is weighted with the appropriated value of the factor m for $0 < m < 1$, then the output current I_o can be approximated as

$$I_o \cong I_B \sin\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) \quad (4)$$

B. Proposed circuit

The proposed principle is based on the use of the inverse function technique of an inverting amplifier using operational amplifier (opamp) as shown in Fig. 2.

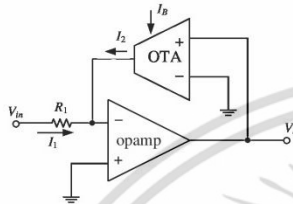


Fig. 2 Simple inverse sine function.

From routine circuit analysis, the relation between the currents i_1 and i_2 can be stated as

$$I_1 + I_2 = 0 \quad (5)$$

For (1a), (5) can be rewritten as

$$\frac{V_{in}}{R_1} + I_B \tanh\left(\frac{V_o}{2V_T}\right) = 0 \quad (6a)$$

or

$$V_o = -2V_T \tanh^{-1}\left(\frac{V_{in}}{I_B R}\right) \quad (6b)$$

The power series of (6b) can be stated as

$$V_o = -2V_T \left(\frac{V_{in}}{I_B R} + \frac{1}{3} \left(\frac{V_{in}}{I_B R} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{V_{in}}{I_B R} \right)^5 + \dots \right) \quad (7)$$

From (7), the series is corresponded to an inverse sine function as [6]

$$K \sin^{-1}(x) = K_T \left(x + B_3 \frac{x^3}{3} + B_5 \frac{x^5}{5} + \dots \right) \quad (8a)$$

and

$$B_i = \prod_{j=1}^{\left(\frac{i-1}{2}\right)} \left[\frac{(i-2j)}{i-2j+1} \right] \quad \text{for } i = 3, 5, 7, \dots \quad (8b)$$

If the current I_2 is chosen with the appropriated value by the weighting factor m at the output voltage V_o , then the series in (7) can then be expressed as

$$V_o = -2V_T \sin^{-1}\left(\frac{mV_{in}}{I_B R}\right) \quad (9)$$

From (9), the term of thermal voltage V_T causes the output voltage V_o depended on the ambient temperature. The proposed inverse sine function with temperature compensation is shown in Fig. 3. It consists of opamp OA₁, OTAs A₁ – A₂, constant resistors R_1 and R_L and variable resistor R_v . The operation of the proposed scheme can be explained as follow. The input voltage V_{in} is applied to the proposed circuit in Fig. 3.

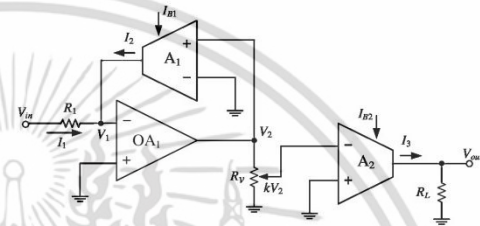


Fig. 3. Proposed inverse sine function circuit.

The voltage V_2 can be expressed as

$$V_2 = -2V_T \sin^{-1}\left(\frac{mV_{in}}{I_{B1}R}\right) \quad (10)$$

The voltage V_2 is attenuated by the variable resistor R_v to obtain the appropriated value for OTA A₂. The output voltage V_{out} can be expressed as

$$V_{out} = -\frac{I_{B2}}{2V_T} R_L k V_2 \quad (11)$$

where k is the optimal gain of the voltages V_2 for OTA A₂. Substitute V_2 from (10) into (11), the output voltage V_{out} of the proposed converter can be rewritten as

$$V_{out} = -\frac{I_{B2}}{2V_T} R_L k \left(-2V_T \sin^{-1}\left(\frac{mV_{in}}{I_{B1}R}\right) \right) = I_{B2} R_L k \sin^{-1}\left(\frac{mV_{in}}{I_{B1}R}\right) \quad (12)$$

It should be noted that the output of the proposed sine-to-triangular converter is in the form of inverse sine. Moreover, temperature existing in thermal voltage V_T is compensated.

III. SIMULATION RESULTS

To verify the performance of the proposed inverse sine function, the circuit in Fig. 3 was simulated using PSPICE simulation program. The commercial opamp and OTA

models are selected for OA_1 and $A_1 - A_2$, respectively. The circuit parameters $R_1 = 1k\Omega$, $R_L = 10k\Omega$, $I_{B1} = 100\mu A$ and $I_{B2} = 400\mu A$ were chosen. The supply voltage was set to $\pm 10V$. Fig. 4 demonstrates the simulation result of the proposed inverse sine function circuit, where V_{in} is 500Hz sinusoidal with $200mV_{pp}$.

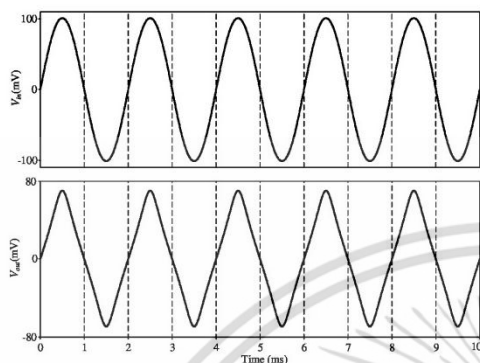


Fig. 4. Simulation result of the proposed sine-to-triangular waveform converter.

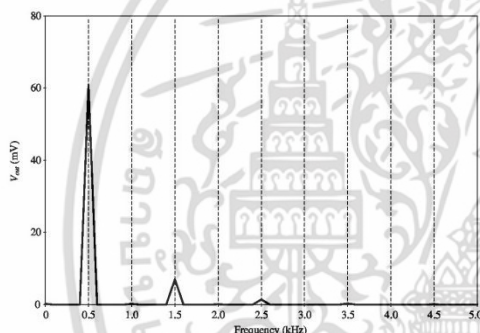


Fig. 5. Simulated frequency spectrum of the proposed sine-to-triangular waveform converter.

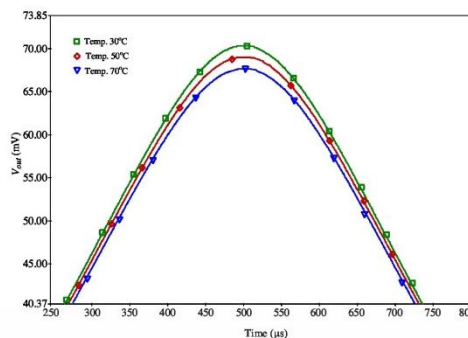
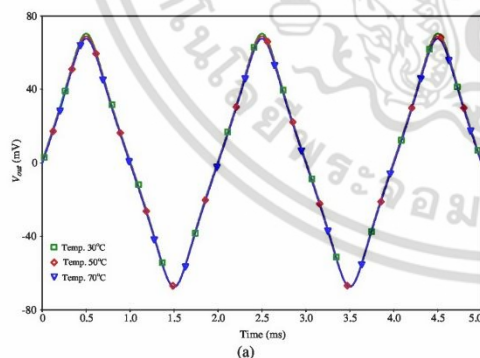


Fig. 6. Simulation results of temperature change by 3 difference values.
(a) obtained triangular wave
(b) zoom in at the peak of the obtained output

Fig. 5 shows simulated frequency spectrum of the obtained triangular signal in Fig. 4. Fig. 6 illustrates the simulated results by changing temperature with 3 difference values ($30^\circ C$, $50^\circ C$ and $70^\circ C$). From Fig. 6(b), the proposed circuit can minimize the effect from the ambient temperature, which the error caused by temperature changing is about 1.9%. The error of the It is evident that the performance of the proposed scheme is agreed with the expected values.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

The proposed inverse sine function circuit in Fig. 3 was also experimentally implemented using commercial available devices LM351 and CA3280 for opamp OA_1 and OTAs $A_1 - A_2$, respectively. The circuit parameters are summarized in Table I. Experimental result of the proposed inverse sine function circuit is shown in Fig. 7(a). Frequency spectrum of the obtained triangular wave provided from the proposed circuit is shown in Fig. 7(b). It is clearly seen that the proposed converter is close agreement with the expected value.

TABLE I
PARAMETERS SET IN PRACTICE REALIZATION IN FIG. 3

parameter	value
Supply voltage	$\pm 10V$
I_{B1}	$300\mu A$
I_{B2}	$700\mu A$
R_1	$1k\Omega$
R_L	$10k\Omega$

V. CONCLUSION

Simple technique to realize inverse sine function or sine-to-triangular waveform converter with temperature compensation has been introduced in this paper. The proposed circuit provides simple configuration and low cost. Simulation and experimental results confirming the circuit performance are agreed with the expected values.

Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016 Vol II,
 IMECS 2016, March 16 - 18, 2016, Hong Kong

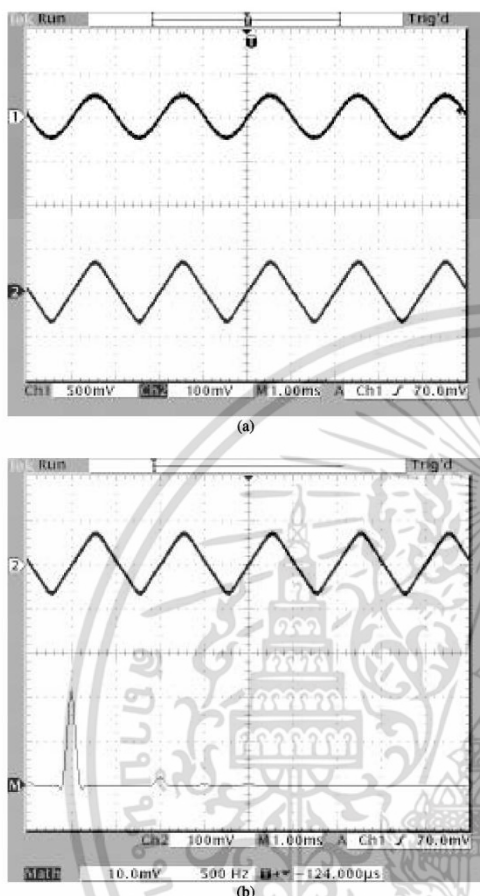


Fig. 7. Experimental results of the proposed sine-to-triangular waveform converter.

- (a) behavior of the proposed circuit
 (b) frequency spectrum

REFERENCES

- [1] M. Karry, J. -K. Seon, J. -J. Charlot, and N. Masmoudi, "VHDL-AMS modeling of a new PLL with an inverse sine phase detector (ISPD PLL)," *Proceeding of the 2002 IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation*, 2002.
- [2] Y. Chiu, B. Jalali, S. Garner, and W. Steier, "Broad-band electronic linearizer for externally modulated analog fiber-optic links," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 11, pp.48-50, 1999.
- [3] M. Benammar, L. Ben-Brahim, and M. A. Alhamadi, "A novel resolver-to-360° linearized converter," *IEEE Sensors J.*, vol. 4, pp. 96-101, 2004.
- [4] J. Tongcharoen, W. Petchmaneeumka, and V. Riewruja, "Low-Cost Resolver-to-DC Converter," *15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015)*, pp. 1699-1702, Oct. 13-16, 2015.
- [5] A. Kaewpoonsuk, S. Khunkong, A. Rerkratn, W. Petchmaneeumka, and N. Kanjanapart, "OTA-Based Triangular-to-Sine and Sine-to-Triangular Waveform Converters" *JSSST 2013*, Tokyo, Japan, Sep. 11-13, 2013.
- [6] V.Riewruja and A. Kaewpoonsuk, "OTA-based sine-to-triangular wave converter", *Circuits, System and Signal Processing*, vol. 25, no. 6, pp. 753-765, 2006.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นายเปรม อภิสทธิจรูญเลิศ
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 1 สิงหาคม 2530
 ที่อยู่ 180/237 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220
 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2552 และในปีการศึกษา 2554 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้