

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรดีมอดูเลตอย่างง่ายสำหรับรีโซลเวอร์และการประยุกต์ใช้งาน

Simple Resolver Demodulator and Its Application



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2558  
KMITL-2015-EN-M-080-202

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Simple Resolver Demodulator and Its Application



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015  
KMITL-2015-EN-M-080-202

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT. 2015**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่รวมกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

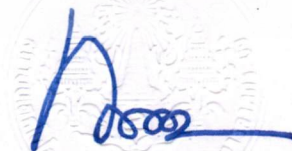
หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรดีมอดูเลตอย่างง่ายสำหรับรีโซลเวอร์และการประยุกต์ใช้งาน  
Thesis Title Simple Resolver Demodulator and Its Application  
นักศึกษา นายอศิระ โอตะ  
รหัสประจำตัว 55611351  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมระบบควบคุม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.วันชัย รุ่งรุจา  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-080-202

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วรพงศ์	ตั้งศรีรัตน์	
ผศ.ดร.วรรณดี	เพชรณิลักษณ์	
ดร.ธวัชชัย	คำศรี	
ดร.อภิไญ	ฤกษ์รัตน์	
ศ.ดร.วันชัย	รุ่งรุจา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วงจรมอดูเลตอย่างง่ายสำหรับรีโซลเวอร์และการ  
ประยุกต์ใช้งาน

นักศึกษา

นายอศิระ โอตะ

รหัสนักศึกษา

55611351

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมระบบควบคุม

พ.ศ.

2558

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศ.ดร.วันชัย รีวรุจา

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์อย่างง่าย และการประยุกต์ใช้งาน โดยหลักการที่นำเสนอสามารถมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ทั้งสัญญาณไซน์และสัญญาณโคไซน์โดยไม่จำเป็นต้องใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ดังที่เคยมีการนำเสนอในอดีต ทำให้สามารถแก้ปัญหาการหวนเฟสของสเตเตอร์และโรเตอร์ได้ โครงสร้างของวงจรถูกนำเสนอประกอบด้วย วงจรเปรียบเทียบ วงจรสุ่มและคงค่า และ วงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบเรเตอร์ ซึ่งเป็นวงจรสำเร็จรูปที่สามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด วงจรมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน รวมถึงมีต้นทุนที่ต่ำ อีกทั้งได้มีการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร หลักการที่นำเสนอสามารถยืนยันได้จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink และการทดลองต่อวงจรจริง เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของวงจร ในส่วนของการประยุกต์ใช้งาน ได้นำหลักการการมอดูเลตที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานในวงจรตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าในส่วนของวงจรตรวจจับแอมพลิฟายด์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรมีประสิทธิภาพสอดคล้องเป็นไปตามหลักการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Simple Resolver Demodulator and Its Application
<b>Student</b>	Mr. Akira Ota
<b>Student ID.</b>	55611351
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Control Engineering
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Prof.Dr. Vanchai Riewruja

### Abstract

A simple method to demodulate the resolver signal and its application is introduced in this thesis. The proposed method can provide the demodulated resolver quadrature signals, sine and cosine, without requiring the low-pass filter used in the traditional approach. Therefore, the phase delay between the stator winding and the rotor winding is avoided. The configuration of this approach consists of commercial available circuit building blocks such as comparator, sample and hold circuit (S/H) and monostable multivibrators. Thus, the proposed approach is obtained to the economical attraction. The operation of the proposed demodulator and its performances are confirmed by MATLAB & Simulink simulation and experimental results. For the application of this method, the proposed demodulator is used to be amplitude detector for capacitance sensing circuit. The circuit configuration is implemented using only commercially available devices. The performances of proposed circuit confirmed by experimental results are agreed with the expected values.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร. วันชัย ธีรรัฐจา ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดการทำงานวิจัยนี้ รวมถึงฝึกฝนทักษะต่างๆ ในการทำงานวิจัย เพื่อที่จะสามารถทำงานวิจัยนี้ออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมอบประสบการณ์และแนวความคิดที่ดีที่สามารถนำไปใช้ในชีวิตประจำวันให้แก่ผู้เขียน

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. วรณดี เพชรณณิล้ำค่า อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่คอยให้ความรู้ คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือ ชี้แนะในการทำงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบงานวิจัยให้แก่ผู้เขียน ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้มอบสถานที่และให้ทุนการวิจัยสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.เทพจิตร เขยโสภา และ ดร.อภินิย ฤกษ์รัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม และรุ่นพี่ทุกคนในห้องปฏิบัติการ CS-Lab ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการทำงานวิจัย อีกทั้งยังเป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ผู้เขียนตลอดระยะเวลาของการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลในครอบครัว และเพื่อนทุกคน ที่ได้ให้การสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจให้แก่ผู้เขียน ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่ได้มอบความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

อศิระ โอตะ

# 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 .....	2
1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า .....	2
1.4 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์ .....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 หลักการทำงานของรีโซลเวอร์ .....	4
2.2 หลักการดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาด .....	6
2.2.1 เอนVELOPE ดีมอดูเลชัน (Envelope demodulation) .....	6
2.2.2 โคฮีเรนต์ ดีมอดูเลชัน (Coherent demodulation) .....	7
2.3 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ในอดีต .....	9
2.3.1 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์แบบซิงโครนัส .....	9
2.3.2 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยอาศัยวงจรตรวจจับแอมพลิจูด แบบพื้นฐาน .....	11
2.3.3 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยใช้วงจรเลื่อนเฟส .....	15
2.4 บทสรุป .....	17
บทที่ 3 วงจรดีมอดูเลเตอร์ที่นำเสนอ .....	18
3.1 กล่าวนำ .....	18
3.2 หลักการของวงจรที่นำเสนอ .....	18
3.2.1 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ .....	19
3.2.2 วงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุมและคงค่า .....	20
3.2.3 วงจรสุมและคงค่า .....	23
3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร .....	25
3.4 การจำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB .....	28
3.5 ผลการทดลองจริง .....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 บทสรุป .....	38
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้งานวงจรตีมอดูเลตสัญญาณที่นำเสนอ .....	40
4.1 กล่าวนำ .....	40
4.2 หลักการทำงานของวงจร .....	40
4.2.1 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง .....	41
4.2.1.1 วงจรขยายค่าประจุไฟฟ้า .....	41
4.2.1.2 วงจรขยายแรงดัน .....	43
4.2.2 วงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูด .....	44
4.3 ผลจากการทดลองจริง .....	45
4.4 บทสรุป .....	50
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ .....	51
5.1 บทสรุป .....	51
5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ .....	51
เอกสารอ้างอิง .....	52
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์ .....	54
ประวัติผู้เขียน .....	67

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	หลักการติมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาด ..... 9
3.1	การทำงานบนโปรแกรม MATLAB & Simulink ..... 28
3.2	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน ..... 28
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ..... 30
3.4	การเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหลักการในอดีตและหลักการที่นำเสนอ ..... 39
4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ..... 45
4.2	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ..... 46



# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรเสมือนภายในของรีโซลเวอร์.....	4
2.2	รีโซลเวอร์ .....	5
2.3	รูปสัญญาณของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองแกนที่ได้จากรีโซลเวอร์ .....	6
2.4	วงจรตีมอดูเลตแบบเอนเวโลป.....	7
2.5	สัญญาณที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.4.....	7
2.6	หลักการงานของการตีมอดูเลชันแบบโคฮีเรนท์ .....	8
2.7	สัญญาณที่ได้จากหลักการการทำงานจากรูปที่ 2.6 .....	8
2.8	หลักการตีมอดูเลตแบบซิงโครนัสสำหรับสัญญาณไซน์และโคไซน์จากรีโซลเวอร์ .....	10
2.9	วงจรตรวจจับแอมพลิจูดสัญญาณไซน์.....	12
2.10	กราฟสัญญาณที่ได้ในแต่ละจุดของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดสัญญาณไซน์ .....	12
2.11	วงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยอาศัยวงจรตรวจจับแอมพลิจูดพื้นฐาน .....	13
2.12	กราฟสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของวงจรในรูปที่ 2.11 .....	14
2.13	วงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยใช้วงจรเลื่อนเฟส .....	15
2.14	สัญญาณที่เกิดจากการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของวงจรในรูปที่ 2.13 .....	16
3.1	หลักการของวงจรตีมอดูเลตที่นำเสนอ .....	18
3.2	โครงสร้างของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์.....	19
3.3	กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์.....	20
3.4	หลักการงานของวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า .....	20
3.5	กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรโมโนสเตเบิลมีลติไวเบเรเตอร์ตัวที่ 1 .....	21
3.6	กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรโมโนสเตเบิลมีลติไวเบเรเตอร์ตัวที่ 2 .....	22
3.7	กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า .....	22
3.8	โครงสร้างพื้นฐานของวงจรสุ่มและคงค่า .....	23
3.9	กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า.....	24
3.10	กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรสุ่มและคงค่า .....	25
3.11	การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า.....	26
3.12	การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดความกว้าง สัญญาณพัลส์ควบคุม .....	26
3.13	แสดงความผิดพลาดอันเนื่องมาจากขนาดความกว้างของพัลส์ที่ใหญ่เกินไป.....	27

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14	29
โครงสร้างการจำลองการทำงานของหลักการที่นำเสนอ ด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink .....	29
3.15	30
กราฟสัญญาณที่จำลองได้ในแต่ละจุดจากรูปที่ 3.14 .....	30
3.16	31
บล็อกวงจรที่ใช้ในการทดลองต่อจริง .....	31
3.17	32
สัญญาณกระตุ้น $V_{ex}$ และสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ $V_z$ .....	32
3.18	33
สัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า .....	33
3.19	33
สัญญาณที่ได้จากวงจรสุ่มและคงค่า .....	33
3.20	34
สัญญาณจากรีโซลเวอร์ .....	34
3.21	35
วงจรดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ที่นำเสนอ .....	35
3.22	35
สัญญาณมอดูเลตและสัญญาณดีมอดูเลตจากรีโซลเวอร์ .....	35
3.23	36
สัญญาณจากรีโซลเวอร์ทั้งสองสัญญาณและการดีมอดูเลตสัญญาณทั้งสอง .....	36
3.24	36
การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าเมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณเปลี่ยนแปลง .....	36
3.25	37
ผลการทดสอบความผิดพลาดอันเนื่องมาจากขนาดความกว้างของพัลส์ .....	37
3.26	38
ค่าความผิดพลาดจากขนาดความกว้างของพัลส์ที่ความถี่ต่างกัน .....	38
4.1	40
หลักการของการประยุกต์ใช้งานวงจรที่นำเสนอ .....	40
4.2	41
วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง .....	41
4.3	41
วงจรขยายค่าประจุไฟฟ้า .....	41
4.4	43
วงจรขยายแรงดันที่ใช้ในวงจรรูปที่ 4.1 .....	43
4.5	44
วงจรตรวจจับแอมพลิจูดที่ใช้ในวงจรรูปที่ 4.1 .....	44
4.6	45
กราฟที่ได้ในแต่ละจุดของวงจรตรวจจับแอมพลิจูด .....	45
4.7	46
การทดสอบการทำงานของวงจรตรวจจับแอมพลิจูด .....	46
4.8	48
ผลการทดสอบของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง .....	48
4.9	50
กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจร .....	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รีโซลเวอร์ (Resolver) เป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่งที่มีบทบาทและความสำคัญในระบบการวัดและการควบคุม ทำหน้าที่วัดค่าตำแหน่งมุม ตัวอย่างในการใช้งานรีโซลเวอร์ อาทิเช่น ระบบหุ่นยนต์ เครื่องบิน ซีเอ็นซี และการค้นหาสัญญาณดาวเทียม เป็นต้น [1-7] รีโซลเวอร์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือสูง สภาพทนทานสูงและมีค่าการบำรุงรักษาที่ต่ำ ทำให้การใช้งานรีโซลเวอร์นั้นได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น [7-8] ส่วนประกอบของรีโซลเวอร์นั้นจะมีลักษณะที่คล้ายกับมอเตอร์ขนาดเล็ก ประกอบไปด้วยขดลวดโรเตอร์ (Rotor) เป็นขดลวดหลักและขดลวดสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งอยู่สองขดวางตั้งฉากกันเป็นขดลวดรอง การทำงานของรีโซลเวอร์นั้นจะต้องจ่ายสัญญาณกระตุ้นไปที่ขดลวดหลัก สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากขดลวดรองทั้งสองจะเกิดจากการมอดูเลต (Modulation) ของสัญญาณกระตุ้นกับค่ามระหว่างขดลวดหลักและขดลวดรอง ซึ่งจะอยู่ในรูปของสัญญาณไซน์และโคไซน์ โดยปกติแล้วการตีมอดูเลตแบบซิงโครนัส (Synchronous demodulation) มีไว้เพื่อกำจัดสัญญาณพาหะหรือสัญญาณกระตุ้นที่มาพร้อมกับสัญญาณของรีโซลเวอร์ ซึ่งเมื่อกำจัดสัญญาณข้างต้นออกไป ทำให้ได้สัญญาณที่เกิดขึ้นจากค่ามมระหว่างขดลวดหลักและขดลวดรอง ซึ่งการตีมอดูเลตแบบซิงโครนัสนั้นต้องการวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low-pass filter) มาทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณความถี่สูงออกไป สัญญาณที่ได้จากรีโซลเวอร์ทั้งสองจะถูกใช้เพื่อหาค่ามระหว่างขดลวดหลักและขดลวดรอง [6], [8-9] แต่การอ่านค่ามที่ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองที่ได้จากการตีมอดูเลตแบบซิงโครนัสนั้นมีความแม่นยำต่ำ ซึ่งเกิดจากความไม่สมพงษ์กันของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณเอาต์พุต โดยหากต้องการความแม่นยำในการวัดค่ามุมที่สูงขึ้นต้องออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำให้มีความสมพงษ์กัน แต่ในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ยากมากที่จะออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำให้มีความสมพงษ์กันทุกประการ ซึ่งการตีมอดูเลตแบบซิงโครนัสต้องอาศัยสัญญาณกระตุ้นเพื่อตัดสัญญาณพาหะที่มากับสัญญาณที่ได้จากรีโซลเวอร์ มีการนำเสนอเทคนิคการตีมอดูเลตแบบอื่น ๆ ที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีและแม่นยำมากขึ้น [7], [10-11] แต่เทคนิคเหล่านั้นล้วนแต่มีความต้องการในการปรับแต่งและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มาก ทำให้ไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานจริง

จากความสำคัญของรีโซลเวอร์และปัญหาในการออกแบบวงจรเพื่ออ่านค่ามจากรีโซลเวอร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอเทคนิคการตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์อย่างง่าย โดยสัญญาณกระตุ้นนั้นจะถูกใช้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมลำดับเวลา (Sequence time) หลักการที่นำเสนอไม่จำเป็นต้องใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเลื่อนเฟสของสัญญาณและทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไม่แม่นยำ โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอมีขนาดเล็ก อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนที่ต่ำอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอเทคนิคการตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ โดยใช้หลักการที่ง่าย ไม่ต้องใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ มีขนาดวงจรที่เล็กลง พร้อมทั้งวิเคราะห์การทำงานของวงจร รวมถึงการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรที่นำเสนอโดยการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink และการต่อวงจรจริง นอกจากนี้ยังได้นำเทคนิคการตีמודูเลตที่นำเสนอ มาประยุกต์ใช้งานกับวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรงอีกด้วย

## 1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า

จากการศึกษาวงจรตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ที่มีการนำเสนอในอดีต จะเห็นว่าวงจรส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่และใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งต้องอาศัยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่มาก ทำให้ไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานจริง อีกทั้งยังเกิดค่าความผิดพลาดจากการใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ 2 ชุดที่ไม่สมพ้องกันทางปฏิบัติ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวงจรตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์อย่างง่าย ที่ประกอบไปด้วยวงจรรวมสำเร็จรูป (Integrated circuit, IC) ที่สามารถหาได้ตามท้องตลาด อีกทั้งยังสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ได้ง่าย โดยวงจรมีขนาดเล็ก ไม่ต้องใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ทำให้สามารถตัดผลของความไม่สมพ้องกันของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำออกไปได้ รวมถึงสามารถนำไปใช้งานจริงและนำไปประยุกต์เข้ากับวงจรอื่นได้

## 1.4 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์อย่างง่าย รวมถึงการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร อีกทั้งยังทดสอบการทำงานของวงจรด้วยการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink และการต่อวงจรจริง เพื่อแสดงให้เห็นว่าวงจรที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างถูกต้อง และได้มีการนำวงจรตีמודูเลตที่ออกแบบขึ้นไปประยุกต์ใช้งาน

## 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บทและภาคผนวกอีก 1 ภาค โดยแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ จะเป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของรีโซลเวอร์ การติมอดูเลตสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด และงานวิจัยเกี่ยวกับการติมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ในอดีตที่มีการนำเสนอ

บทที่ 3 หลักการของวงจรติมอดูเลตที่นำเสนอ ประกอบไปด้วยการทำงานของวงจรแต่ละส่วน การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจรรวมถึงผลการทดลองจากการเลียนแบบการทำงานจากโปรแกรม MATLAB & Simulink และการต่อวงจรจริง

บทที่ 4 การประยุกต์ใช้เทคนิคการติมอดูเลตที่นำเสนอ เป็นการนำเสนอการนำหลักการของวงจรติมอดูเลตที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง โดยประกอบไปด้วยหลักการทำงานของวงจร และการต่อวงจรจริง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ในส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์คือส่วนของภาคผนวก ซึ่งจะแสดงถึงบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ภาคผนวก ก แสดงบทความที่เกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

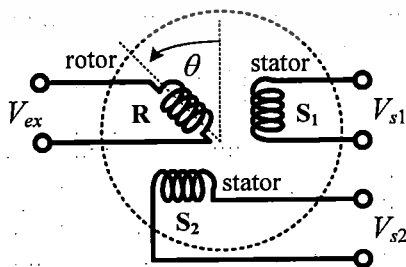
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์อย่างง่าย อีกทั้งยังได้มีการนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรอื่น ดังนั้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษา ในบทนี้จึงเป็นการอธิบายถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่หลักการทำงานของรีโซลเวอร์ การตีמודูเลตสัญญาณเชิงขนาด (Amplitude modulation, AM) และวงจรตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในอดีต

### 2.1 หลักการทำงานของรีโซลเวอร์

รีโซลเวอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเร็วและตำแหน่งมุมแกนหมุนของอุปกรณ์ที่มีแกนหมุนต่างๆ รีโซลเวอร์เป็นอุปกรณ์วัดที่มีความแม่นยำสูง มีความทนทานต่อทุกสภาวะแวดล้อม และมีความการบำรุงรักษาที่ต่ำ จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ มากมาย เช่น งานทางด้านหุ่นยนต์ เครื่องบิน ซีเอ็นซี และการค้นหาสัญญาณดาวเทียม เป็นต้น ซึ่งมีโครงสร้างอย่างง่ายดังรูปที่ 2.1 รูปร่างของรีโซลเวอร์จะคล้ายกับมอเตอร์ขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในการประยุกต์การใช้งาน สามารถทำได้โดยการต่อแกนหมุนของอุปกรณ์ที่ต้องการวัดเข้ากับแกนหมุนของตัวรีโซลเวอร์ ในการทำงานของรีโซลเวอร์นั้น จะต้องจ่ายอินพุตในรูปของสัญญาณไซน์  $V_{ex}$  ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (2.1) กระตุ้นให้กับขดลวดโรเตอร์

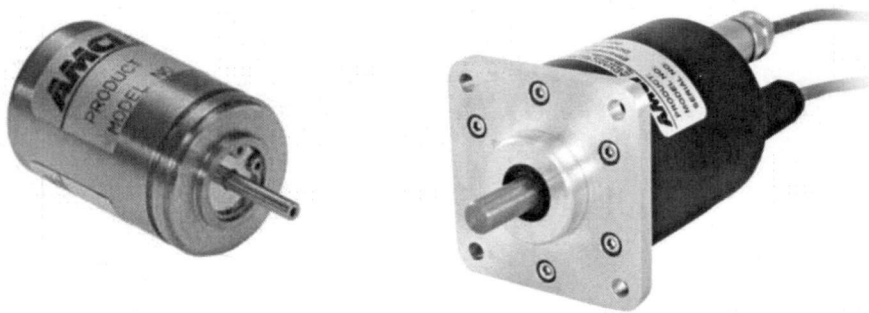
$$V_{ex} = A_{ex} \sin(\omega t) \tag{2.1}$$

- เมื่อ  $V_{ex}$  คือ สัญญาณกระตุ้น  
 $A_{ex}$  คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณกระตุ้น  
 $\omega$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมของสัญญาณกระตุ้น  
 $t$  คือ ค่าเวลา



รูปที่ 2.1 วงจรเสมือนภายในของรีโซลเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 รีโซลเวอร์

สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากขดลวดสเตเตอร์ สองชุดที่วางตั้งฉากกันนั้น จะได้จากการมอดูเลตของสัญญาณกระตุ้นที่ขดลวดโรเตอร์ กับค่ามุมระหว่างขดลวดโรเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากรีโซลเวอร์จะอยู่ในรูปของสัญญาณไซน์ (Sine) และโคไซน์ (Cosine) โดยขดลวดแรกจะเป็นสัญญาณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์ ค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ขึ้นอยู่กับสัญญาณแรงดันกระตุ้น และขดลวดชุดที่สองจะเป็นสัญญาณในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ ค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ขึ้นอยู่กับสัญญาณแรงดันกระตุ้น ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองนั้นเกิดจากการมอดูเลตเชิงขนาด มีค่าดังสมการ

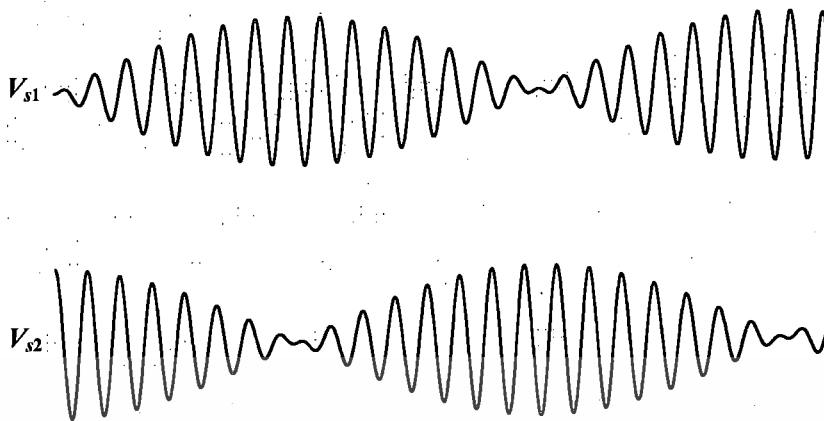
$$V_{s1} = A_{ex} k \sin(\omega t) \sin \theta = A \sin(\omega t) \sin \theta \quad (2.2)$$

และ

$$V_{s2} = A_{ex} k \sin(\omega t) \cos \theta = A \sin(\omega t) \cos \theta \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $V_{s1}$  คือ สัญญาณแรงดันของขดลวดชุดแรก  
 $V_{s2}$  คือ สัญญาณแรงดันของขดลวดชุดที่สอง  
 $\theta$  คือ ค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์  
 $A$  คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณกระตุ้น ( $A_{ex}$ ) คูณกับอัตรา  
 การส่งผ่าน  $k$  ระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับขดลวดโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปสัญญาณของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองแกนที่ได้จากรีโวลเวอร์

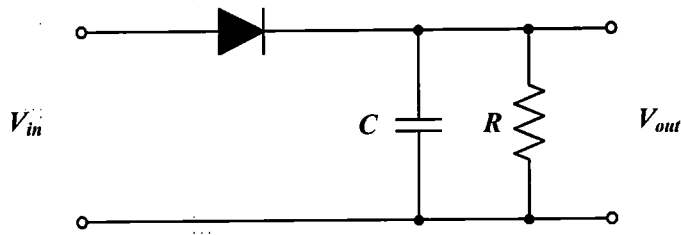
จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) และรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากรีโวลเวอร์มีลักษณะเป็นสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตเชิงขนาด ดังนั้นการนำสัญญาณจากรีโวลเวอร์ไปประยุกต์ใช้งานจึงต้องทำการดีมอดูเลตสัญญาณก่อน โดยหลักการดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาดที่เหมาะสมกับสัญญาณรีโวลเวอร์จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

## 2.2 หลักการดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาด

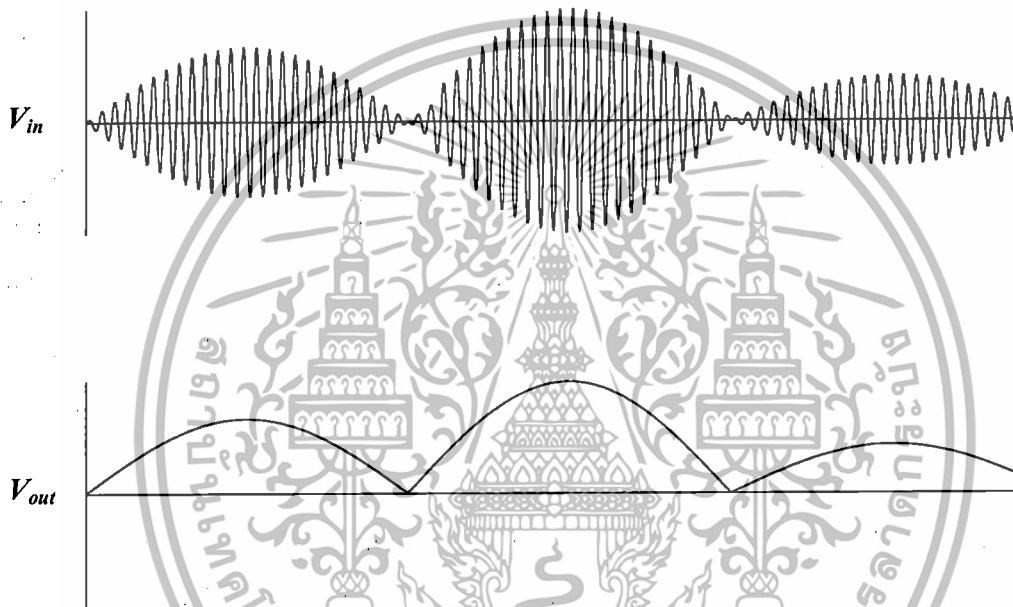
สัญญาณที่ได้จากรีโวลเวอร์จะเป็นสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด โดยทั่วไปแล้วการดีมอดูเลตสัญญาณแบบนี้จะสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างหลักการที่ใช้กันทั่วไป 2 หลักการดังนี้

### 2.2.1 เอนVELOป ดีมอดูเลชัน (Envelope demodulation)

เอนVELOป ดีมอดูเลชัน เป็นการดีมอดูเลตสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาดที่ง่ายและสะดวกในการสร้างวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.4 สัญญาณมอดูเลตจะถูกส่งเป็นอินพุตของวงจร เมื่อสัญญาณผ่านส่วนที่เป็นไดโอดแล้วจะถูกตัดเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นสัญญาณด้านบวก จากนั้นจะถูกส่งต่อผ่านวงจร RC ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณด้านบวกที่ตัดสัญญาณพาหะออกไปแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.5



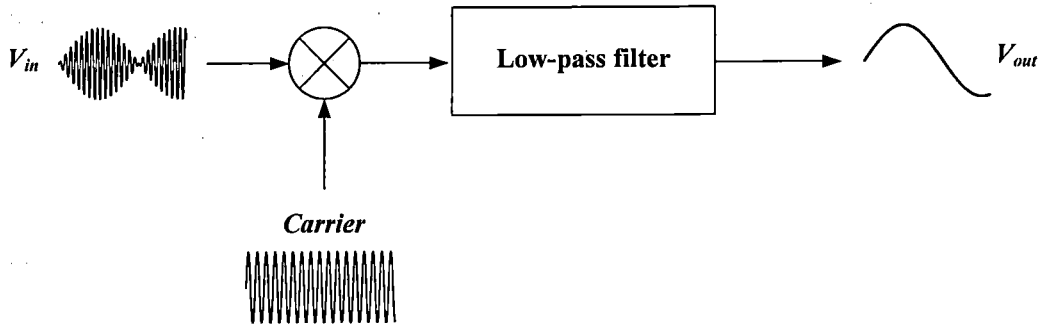
รูปที่ 2.4 วงจรตีมอดูเลตแบบเอนVELO



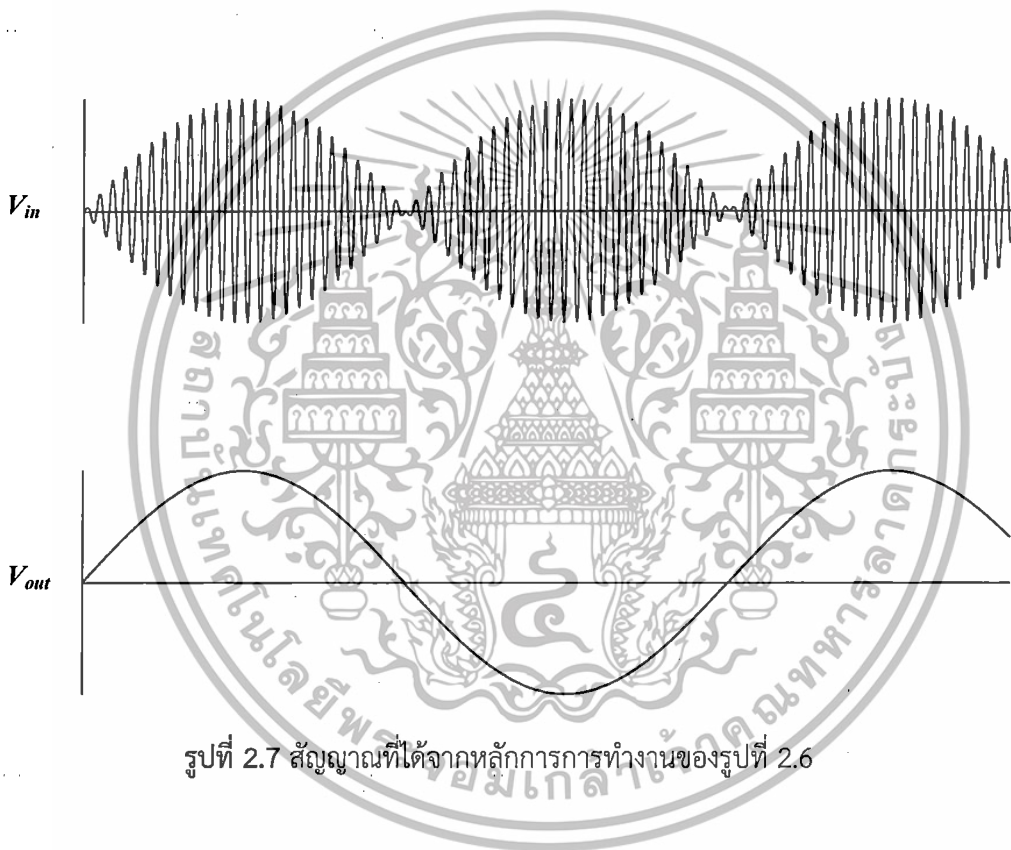
รูปที่ 2.5 สัญญาณที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.4

### 2.2.2 โคฮีเรนท์ ตีมอดูเลชัน (Coherent demodulation)

โคฮีเรนท์ ตีมอดูเลชัน หรือ ซิงโครนัส ตีมอดูเลชัน (Synchronous demodulation) เป็นหลักการตีมอดูเลตที่พบเห็นได้ทั่วไปในการตีมอดูเลตสัญญาณรีโซลเวอร์ โดยหลักการนี้จะคล้ายกับการมอดูเลตสัญญาณอีกครั้งหนึ่ง โดยการคูณสัญญาณความถี่อ้างอิง (Reference signal) หรือสัญญาณพาหะเข้าไป จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ผ่านวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low-pass filter) เพื่อตัดสัญญาณความถี่สูงออกไป สำหรับการทำงานของหลักการโคฮีเรนท์ ตีมอดูเลชันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ส่วนสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากหลักการนี้ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของมอดูเลชันแบบโคฮีเรนซ์

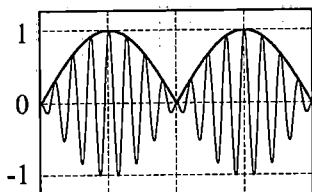
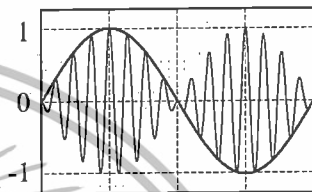


รูปที่ 2.7 สัญญาณที่ได้จากหลักการการทำงานของรูปที่ 2.6

จากหลักการมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาดพื้นฐานที่นำเสนอ จะเห็นว่าในการทำงานของหลักการทั้งสองจะต้องอาศัยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมถึงจะได้เอาต์พุตที่ต้องการ วงจรมอดูเลตแบบแอนโวลอปต้องอาศัยการปรับแต่งค่า RC ในวงจร ส่วนหลักการมอดูเลชันแบบโคฮีเรนซ์ต้องทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ซึ่งทำให้ไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานจริง หลักการที่นำเสนอสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 หลักการดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาด

หลักการดีมอดูเลตสัญญาณ	รูปแบบของวงจร	เอาต์พุตที่ได้จากหลักการ
การดีมอดูเลตแบบเอนเวลอป	วงจรจะประกอบไปด้วยไดโอดต่อร่วมกับวงจร RC ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ	
การดีมอดูเลตแบบโคฮีเรนต์	วงจรจะประกอบไปด้วยวงจรคูณสัญญาณแอมพลิจูดกับวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ	

## 2.3 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ในอดีต

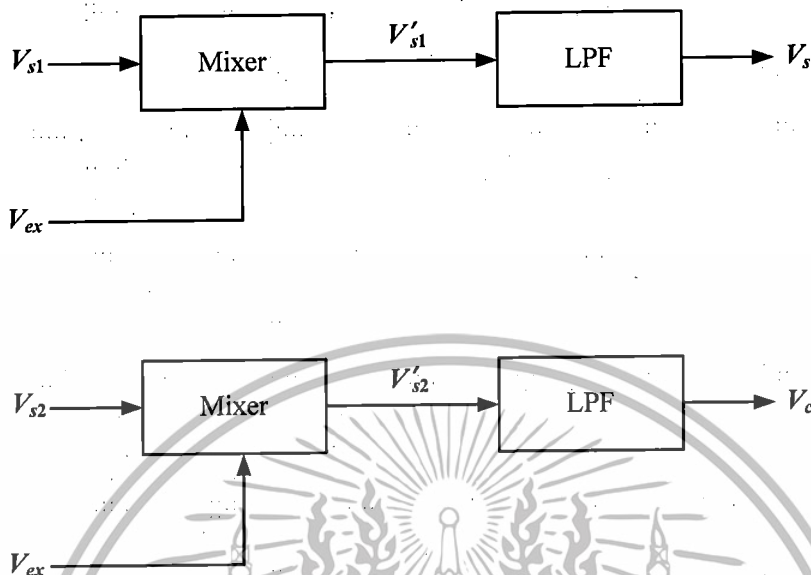
จากทฤษฎีดังกล่าวเห็นได้ว่าค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากรีโซลเวอร์มีค่าไม่เป็นเชิงเส้นกับค่ามอดูเลตของแอมพลิจูด การนำสัญญาณจากรีโซลเวอร์ไปประยุกต์ใช้งานจึงจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับอุปกรณ์หรือวงจรอื่นซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากรีโซลเวอร์ให้เป็นเชิงเส้นกับค่ามอดูเลตของแอมพลิจูด หรือที่เรียกว่าตัวแปลงสัญญาณรีโซลเวอร์ (Resolver converter) โดยส่วนมากตัวแปลงสัญญาณจากรีโซลเวอร์จะแบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วนหลัก ส่วนแรกคือส่วนของวงจรดีมอดูเลต (Demodulator) ทำหน้าที่ดีมอดูเลตสัญญาณที่ได้จากรีโซลเวอร์ให้ได้สัญญาณที่ปราศจากสัญญาณกระตุ่น ก่อนที่จะถูกส่งต่อไปยังส่วนต่อไป ซึ่งเป็นส่วนแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นเชิงเส้นกับค่ามอดูเลตของแอมพลิจูดเพื่อนำไปใช้งาน สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอในส่วนของการดีมอดูเลต จึงขอกล่าวถึงเฉพาะการดีมอดูเลต ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะอธิบายในส่วนของวงจรดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ที่เคยนำเสนอไว้ในอดีต

### 2.3.1 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์แบบซิงโครนัส [8, 12]

จากงานวิจัยในอดีต การแปลงสัญญาณจากรีโซลเวอร์อาศัยพื้นฐานการดีมอดูเลตแบบซิงโครนัสในการกำจัดสัญญาณพหุหรือสัญญาณกระตุ่น ซึ่งถูกรวมอยู่กับสัญญาณของรีโซลเวอร์ เพื่อให้เห็นสัญญาณที่เกิดขึ้นจากค่ามอดูเลตระหว่างขดลวดโรเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ ในการดีมอดูเลตแบบซิงโครนัสนั้นจะต้องใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ในการกำจัดเอาสัญญาณความถี่สูงออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังวงจรสุ่มและคงค่า เพื่อนำไปใช้งานต่อไปในส่วนของวงจรแปลงสัญญาณเป็นค่ามอดูม หลักการของการดีมอดูเลตแบบซิงโครนัสแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หลักการดีมอดูเลตแบบซิงโครนัสสำหรับสัญญาณไซน์และโคไซน์จากรีโซลเวอร์

ขั้นตอนการทำงานของหลักการดีมอดูเลตแบบซิงโครนัสสามารถอธิบายได้ดังนี้ สัญญาณ  $V_{s1}$  และ  $V_{s2}$  เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากรีโซลเวอร์ในรูปของไซน์กับโคไซน์ มีค่าดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ  $V_{ex}$  ซึ่งเป็นสัญญาณกระตุ้นให้กับรีโซลเวอร์ ซึ่งเท่ากับสมการที่ (2.1) กำหนดให้  $A$  เท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $A_{ex}$  จะได้

$$V'_{s1} = V_{s1} \cdot V_{ex} \quad (2.4)$$

$$V'_{s1} = \sin(\omega t) \cdot \sin\theta \cdot \sin(\omega t) \quad (2.5)$$

$$V'_{s1} = \sin(2\pi ft) \cdot \sin\theta \cdot \sin(2\pi ft) \quad (2.6)$$

$$V'_{s1} = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(4\pi ft) \right\} \cdot \sin\theta \quad (2.7)$$

สำหรับ  $V'_{s2}$  จะได้

$$V'_{s2} = V_{s2} \cdot V_{ex} \quad (2.8)$$

$$V'_{s2} = \sin(\omega t) \cdot \cos\theta \cdot \sin(\omega t) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V'_{s2} = \sin(2\pi ft) \cdot \cos\theta \cdot \sin(2\pi ft) \quad (2.10)$$

$$V'_{s2} = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(4\pi ft) \right\} \cdot \cos\theta \quad (2.11)$$

เอาต์พุตหลังจากการคูณสัญญาณของทั้ง  $V'_{s1}$  และ  $V'_{s2}$  จะเท่ากับสมการที่ (2.7) และ (2.11) การกำจัดสัญญาณความถี่สูงหรือสัญญาณพาหะออกนั้นเราจะใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ สัญญาณเอาต์พุต  $V'_{s1}$  และ  $V'_{s2}$  จะถูกส่งต่อไปยังวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ จะได้

$$V_s = \frac{1}{2} \sin(\theta) \quad (2.12)$$

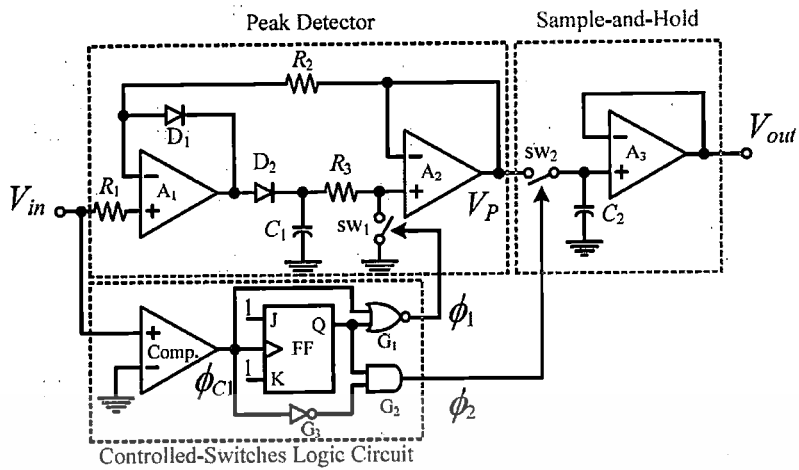
และ

$$V_c = \frac{1}{2} \cos(\theta) \quad (2.13)$$

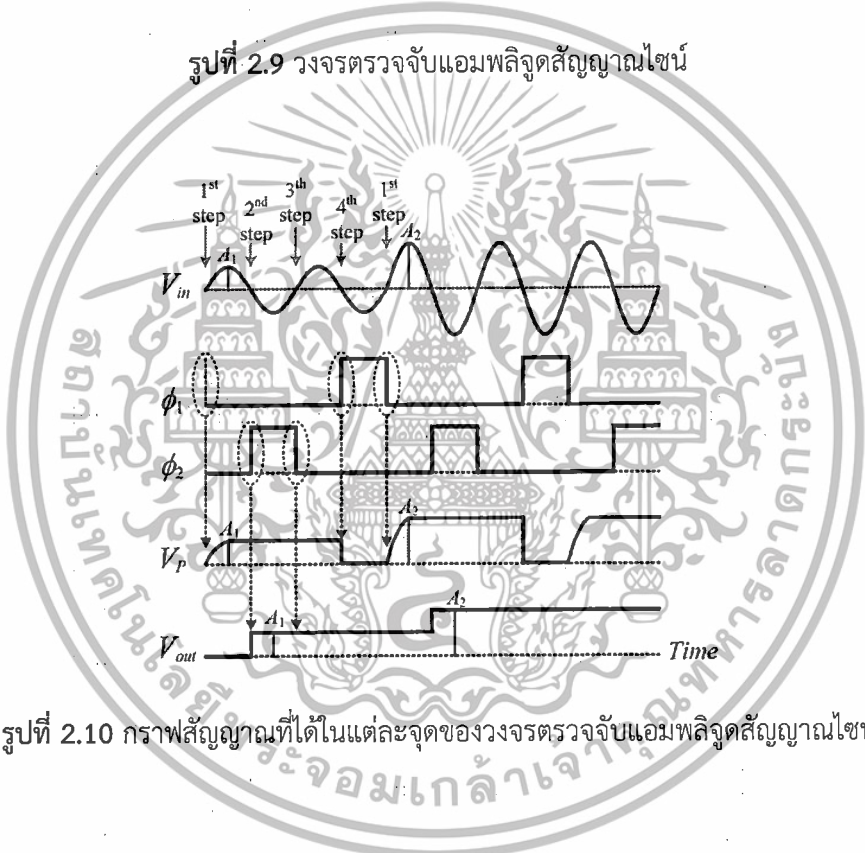
เอาต์พุตที่ได้จากวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำจะทำให้ในรูปของสัญญาณเชิงมุมจากรีโซลเวอร์ สัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังวงจรสุ่มและคงค่าเพื่ออ้างอิงตำแหน่งของสัญญาณ ณ เวลาใดๆ ก่อนนำไปใช้งานในส่วนต่อไป

### 2.3.2 วงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยอาศัยวงจรตรวจจับแอมพลิจูดแบบพื้นฐาน [2]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวงจรตีมอดูเลตสัญญาณรีโซลเวอร์โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดของสัญญาณไซน์ วงจรที่นำเสนอสามารถให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตสองสัญญาณคือสัญญาณไซน์และสัญญาณโคไซน์โดยไม่จำเป็นต้องใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ และไม่เกิดการหน่วงเวลา โครงสร้างของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดสัญญาณไซน์ที่ควบคุมด้วยสัญญาณอินพุตของตนเองแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรตรวจจับค่าสูงสุด วงจรสุ่มและคงค่า และวงจรควบคุมลอจิก รูปที่ 2.10 แสดงกราฟสัญญาณที่ได้ในแต่ละจุดของรูปที่ 2.9



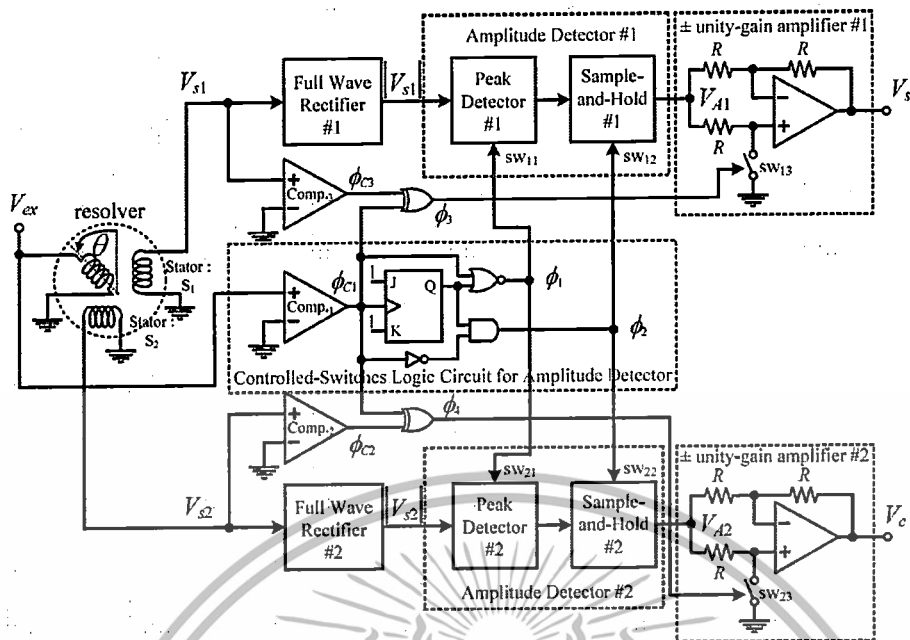
รูปที่ 2.9 วงจรตรวจจับแอมพลิจูดสัญญาณไซน์



รูปที่ 2.10 กราฟสัญญาณที่ได้ในแต่ละจุดของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดสัญญาณไซน์

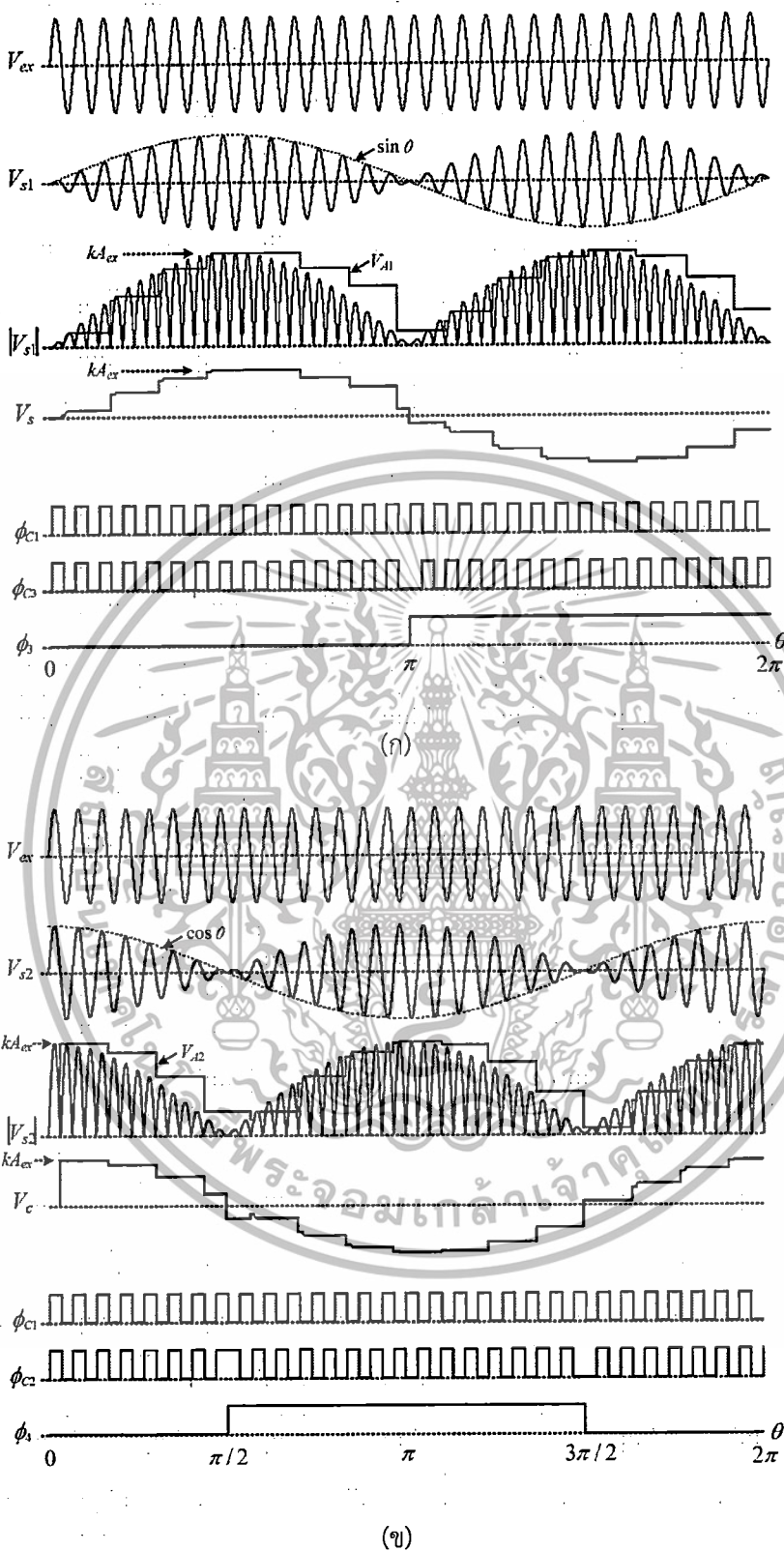
ขั้นตอนการทำงานของวงจรตรวจจับสัญญาณไซน์สามารถอธิบายได้ดังนี้ ขั้นแรกค่าสูงสุดของสัญญาณอินพุตจะถูกตรวจจับและคงค่าไว้ จากนั้นค่าสูงสุดที่ตรวจจับได้จะถูกทำการสุ่มตัวอย่างและถูกส่งไปยังโนดเอาต์พุต ต่อมา ค่าสุดท้ายของสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างจะถูกหน่วงไว้จนกระทั่งเกิดการทํางานในรอบถัดไป และสุดท้ายสัญญาณเอาต์พุตก็จะถูกรีเซ็ตเมื่อการตรวจจับสัญญาณเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 วงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยอาศัยวงจรตรวจจับแอมพลิจูดพื้นฐาน

วงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยอาศัยวงจรตรวจจับแอมพลิจูดแบบพื้นฐานที่นำเสนอในรูปที่ 2.11 โดยวงจรนี้ประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นสองวงจร วงจรขยายแบบบวกลบที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่งสองวงจร วงจรตรวจจับแอมพลิจูดสัญญาณสองวงจร และวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมหนึ่งวงจร เมื่อสัญญาณ  $V_{ex}$  ซึ่งเป็นสัญญาณกระตุ้น ถูกจ่ายให้กับรีโซลเวอร์ จะเกิดสัญญาณ  $V_{s1}$  และ  $V_{s2}$  ซึ่งเป็นสัญญาณจากขดลวดไซน์และโคไซน์ สัญญาณ  $V_{ex}$ ,  $V_{s1}$  และ  $V_{s2}$  จะถูกส่งไปยังวงจรเปรียบเทียบ  $Comp.1$ ,  $Comp.2$  และ  $Comp.3$  ตามลำดับ ได้เอาต์พุตออกมาเป็น  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$  และ  $\phi_4$  เพื่อใช้เป็นสัญญาณควบคุม และเพื่อป้องกันค่าความผิดพลาดจากการทำงานอย่างต่อเนื่องทางด้านลบ ได้มีการนำวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นมาใช้งานเพื่อจัดเรียงสัญญาณ  $V_{s1}$  และ  $V_{s2}$  ก่อนนำไปจ่ายให้กับวงจรตรวจจับแอมพลิจูด โดยที่วงจรตรวจจับแอมพลิจูดนี้จะถูกควบคุมด้วยสัญญาณควบคุม  $\phi_1$  และ  $\phi_2$  และสัญญาณควบคุม  $\phi_3$  และ  $\phi_4$  จะถูกนำไปใช้เป็นสัญญาณควบคุมของวงจรขยายแบบบวกลบที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง เพื่อใช้ควบคุมเฟสของสัญญาณเอาต์พุต  $V_s$  และ  $V_c$  ซึ่งเป็นสัญญาณไซน์และโคไซน์ โดยมีกราฟสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของวงจรในรูปที่ 2.11

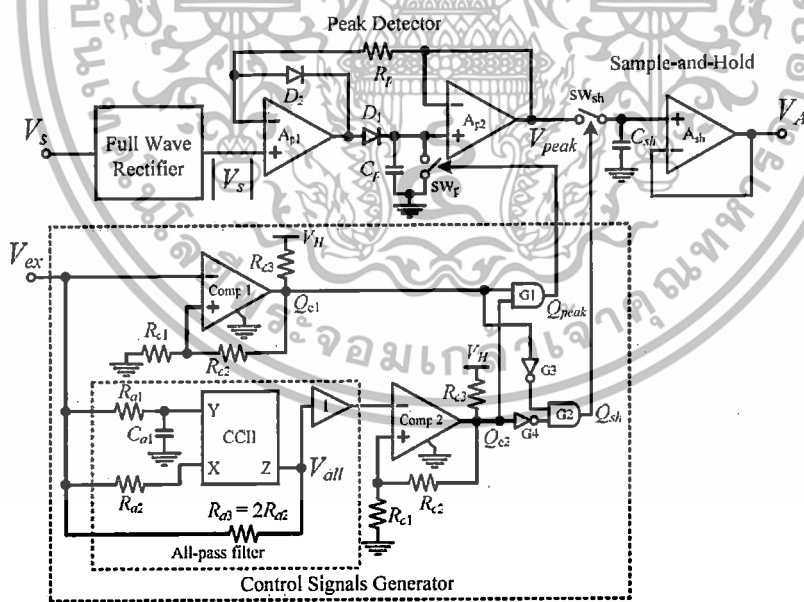
- ก) สัญญาณที่ได้เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณไซน์จากรีโซลเวอร์
- ข) สัญญาณที่ได้เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณโคไซน์จากรีโซลเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 วงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโวลเวอร์โดยใช้วงจรเลื่อนเฟส [3]

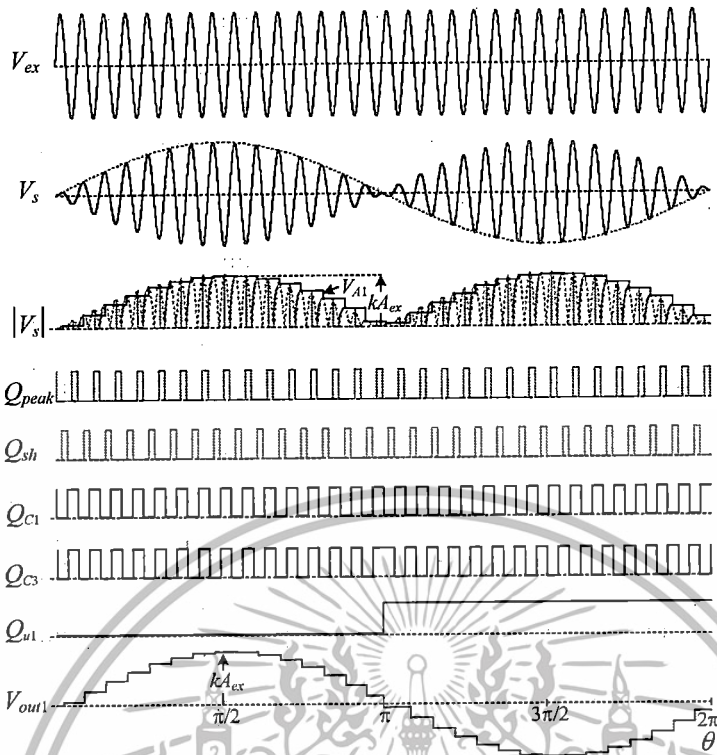
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการแปลงสัญญาณจากรีโวลเวอร์ โดยอาศัยคุณสมบัติการเลื่อนเฟสของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All-pass filter) ซึ่งสร้างจากวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (Second generation current conveyor, CCII) ต่อกับวงจรถอดจิกที่ถูกออกแบบไว้ ตัวแปลงสัญญาณที่นำเสนอนี้สามารถให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตสองสัญญาณซึ่งเป็นส่วนของขดลวดโซ่และขดลวดโคโซ่ภายในตัวรีโวลเวอร์ โดยไม่ต้องใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ซึ่งวงจรที่นำเสนอมีข้อดีคือสามารถทำงานได้ในช่วงเวลา 1 ไซเคิลของสัญญาณอินพุต ซึ่งถือว่ามีความรวดเร็วในการแปลงสัญญาณกว่าวงจรอื่น ๆ ที่ได้มีการนำเสนอซึ่งทำงานในช่วง 2 ไซเคิล

โครงสร้างของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดของสัญญาณจากรีโวลเวอร์แสดงในรูปที่ 2.13 สัญญาณ  $V_s$  ถูกควบคุมด้วยวงจรควบคุมสัญญาณซึ่งวงจรถูกสร้างขึ้นจากวงจรกรองผ่านทุกความถี่โดยมีสัญญาณกระตุ้น  $V_{ex}$  เป็นสัญญาณอินพุต และที่สัญญาณอินพุต  $V_s$  วงจรเรียงสัญญาณแบบเต็มคลื่น (Full wave rectifier) จะถูกนำมาต่อเข้าเพื่อจัดเรียงสัญญาณ  $V_s$  เพื่อป้องกันค่าความผิดพลาดจากการทำงานอย่างต่อเนื่องของสัญญาณในช่วงลบ การทำงานของวงจรในส่วนต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโวลเวอร์โดยใช้วงจรเลื่อนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 สัญญาณที่เกิดจากการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของวงจรในรูปที่ 2.13

จากรูปที่ 2.13 การทำงานของวงจรสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้คือ ขั้นตอนแรกวงจรตรวจจับค่าสูงสุดจะทำการจับค่าสูงสุดของสัญญาณ  $V_s$  ที่ผ่านวงจรเรียงสัญญาณแบบเต็มคลื่น  $|V_s|$  และทำการหน่วงค่าไว้ ต่อมาค่าสูงสุดของสัญญาณจะถูกทำการสุ่มตัวอย่างและส่งไปเป็นสัญญาณเอาต์พุต  $V_A$  จากนั้นค่าสูงสุดของสัญญาณจะถูกหน่วงเอาไว้จนกระทั่งมีการสุ่มตัวอย่างครั้งต่อไป และสุดท้ายสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับค่าสูงสุดจะถูกรีเซ็ตเมื่อทำการตรวจจับสัญญาณเรียบร้อยแล้ว ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 1 ไซเคิลของสัญญาณอินพุต ในส่วนของวงจรควบคุมสัญญาณกระตุ้น  $V_{ex}$  และสัญญาณจากวงจรเลื่อนเฟส  $V_{all}$  จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม  $Q_{c1}$  และ  $Q_{c2}$  ตามลำดับ และถูกแปลงไปเป็นสัญญาณลอจิก เพื่อใช้เป็นสัญญาณควบคุมวงจรตรวจจับค่าสูงสุด  $Q_{peak}$  และสัญญาณควบคุมวงจรสุ่มตัวอย่าง  $Q_{sh}$  โดยจะต้องกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัญญาณ  $Q_{sh}$  และ  $Q_{peak}$  ตามสัญญาณ  $V_{ex}$  ในช่วงเฟส  $\pi/2 - \pi$  และ  $3\pi/2 - 2\pi$  ซึ่งวงจรแปลงสัญญาณที่นำเสนอนี้สามารถแปรค่า  $V_{ex}$  ได้ในช่วง 1kHz ถึง 20kHz

## 2.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้เสนอหลักการพื้นฐานของรีโซลเวอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเร็วและตำแหน่งมุมแกนหมุนของอุปกรณ์ที่มีแกนหมุนต่างๆ หลักการทั่วไปในการตีמודูเลตสัญญาณเชิงขนาด โดยนำเสนอหลักการทั้งหมด 2 หลักการคือ เอนเวโลป ตีמודูเลชัน และ โคฮีเรนท์ ตีמודูเลชัน และวงจรตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ โดยวงจรจะแปลงสัญญาณในรูปของสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งได้นำเสนองานวิจัยที่มีการนำเสนอในอดีตจำนวน 3 งานวิจัย ซึ่งในแต่ละวงจรมีคุณสมบัติการทำงานที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยที่ 1 เป็นวงจรตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยอาศัยหลักการตีמודูเลตแบบซิงโครนัส ส่วนในงานวิจัยที่ 2 เป็นวงจรตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยใช้วงจรเลื่อนเฟส งานวิจัยที่ 3 วงจรตีמודูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยอาศัยวงจรตรวจจับแอมพลิจูดแบบพื้นฐาน จากวงจรที่กล่าวมาข้างต้น วงจรแรกเป็นวงจรที่ต้องอาศัยวงจรรองผ่านความถี่ต่ำในการทำงาน ทั้งสามวงจรต้องอาศัยการปรับแต่งค่าที่มาก อีกทั้งมีความซับซ้อน จึงทำให้ไม่สะดวกเมื่อนำไปใช้งานจริง



141249

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

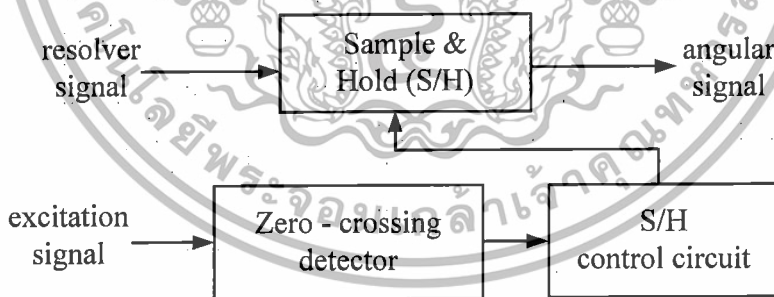
# วงจรมอดูเลตที่นำเสนอ

### 3.1 กล่าวนำ

จากการศึกษาวิจัยที่ได้มีการนำเสนอในอดีต พบว่าการออกแบบวงจรมอดูเลตในอดีตที่ผ่านมามีข้อจำกัดของวงจรมอดูเลตที่ความถี่ต่ำ ซึ่งมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ยุงยาก อีกทั้งวงจรมอดูเลตที่มีขนาดที่ใหญ่ ทำให้ไม่สะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบวงจรมอดูเลตสำหรับสัญญาณจากรีโซลเวอร์ที่ไม่ต้องการวงจรมอดูเลตที่ความถี่ต่ำในการทำงาน ไม่ต้องทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่มาก วงจรมอดูเลตมีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพที่สูง โดยในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรมอดูเลตอย่างง่ายสำหรับสัญญาณจากรีโซลเวอร์ พร้อมทั้งวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร อีกทั้งทำการทดสอบคุณสมบัติการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink และการต่อวงจรจริง

### 3.2 หลักการของวงจรมอดูเลตที่นำเสนอ

หลักการของวงจรมอดูเลตอย่างง่ายสำหรับสัญญาณจากรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หลักการของวงจรมอดูเลตที่นำเสนอ

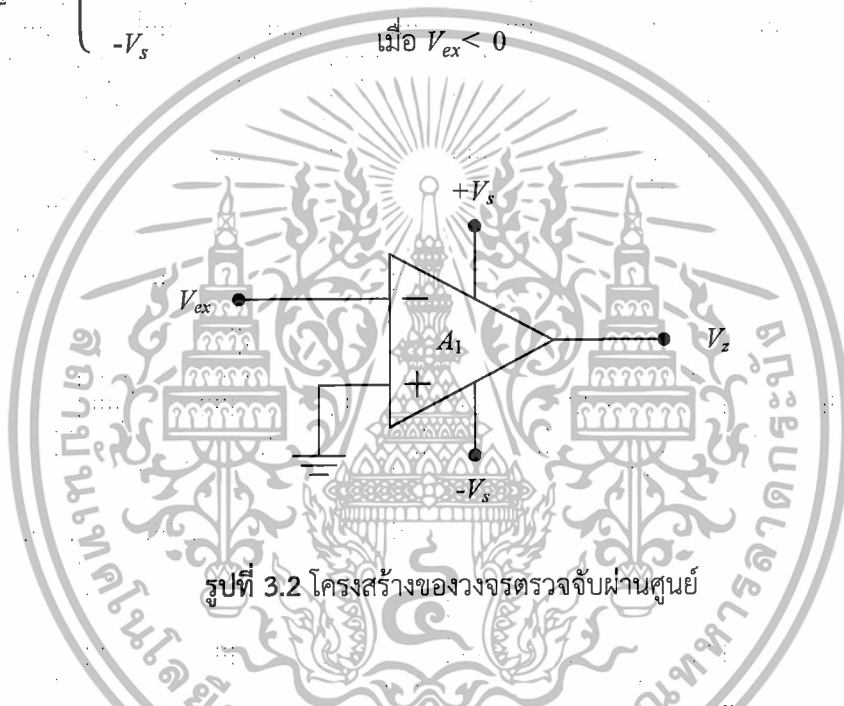
จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าหลักการของวงจรมอดูเลตที่นำเสนอประกอบไปด้วยการทำงานทั้งหมด 3 ส่วน คือวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero-crossing detector) วงจรควบคุมการทำงานของวงจรมอดูเลตและคงค่า (Sample and hold control circuit) และวงจรมอดูเลตและคงค่า (Sample and hold circuit) โดยหลักการทำงานของวงจรในแต่ละส่วนสามารถอธิบายได้ในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์

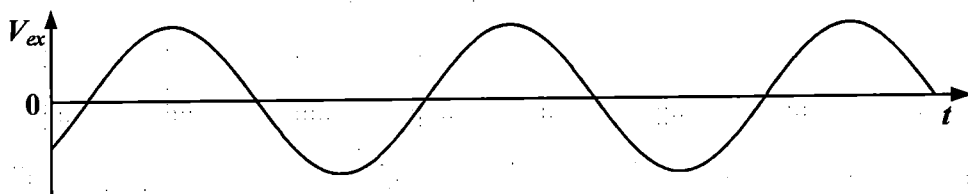
โครงสร้างของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.2 วงจรจะประกอบไปด้วย ออปแอมป์จำนวนหนึ่งตัว ทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับสัญญาณกราวด์ โดยเอาต์พุตของ วงจรจะเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณอินพุต  $V_{ex}$  เมื่อตัดผ่านจุดศูนย์ สามารถ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_z = \begin{cases} +V_s & \text{เมื่อ } V_{ex} > 0 \\ -V_s & \text{เมื่อ } V_{ex} < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

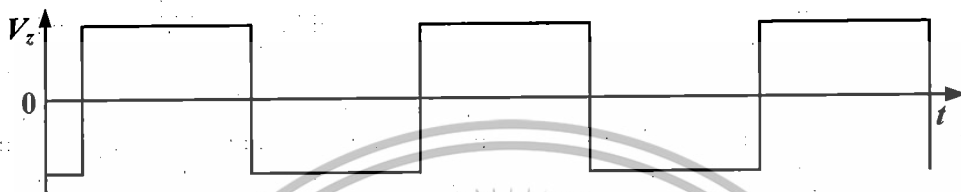


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

การทำงานของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ในหลักการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ วงจรตรวจจับผ่าน ศูนย์จะรับสัญญาณไซน์ซึ่งเป็นสัญญาณกระตุ้น  $V_{ex}$  ให้แก่รีโวลเวอร์ มาทำการเปรียบเทียบกับ สัญญาณกราวด์ ทำให้ได้สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีดีวตีไซเคิล (Duty cycle) เท่ากับ 50% กราฟสัญญาณ ที่เกิดขึ้นในส่วนของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์จะแสดงในรูปที่ 3.3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

(ก) สัญญาณกระตุ้น  $V_{ex}$  ให้แก่วีโกลเวอร์

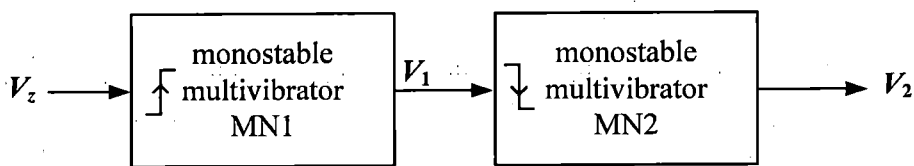
(ข) สัญญาณเอาต์พุต  $V_z$  ที่ได้จากวงจร

สัญญาณ  $V_z$  ที่ได้จากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์จะถูกส่งต่อไปยังวงจรควบคุมการทำงานของวงจรมุมและคงค่าเพื่อทำการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานในส่วนต่อไป

### 3.2.2 วงจรควบคุมการทำงานของวงจรมุมและคงค่า

การทำงานในส่วนของวงจรมุมและคงค่าต้องอาศัยสัญญาณในการควบคุมการทำงาน เพื่อที่สามารถกำหนดระยะเวลาการทำงานในสถานะมุมและคงค่าตามที่ต้องการ วงจรควบคุมการทำงานของวงจรมุมและคงค่าจึงมีหน้าที่ในการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานให้มีความเหมาะสมกับช่วงสัญญาณที่ต้องการใช้งาน หลักการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของวงจรมุมและคงค่าแสดงดังรูปที่

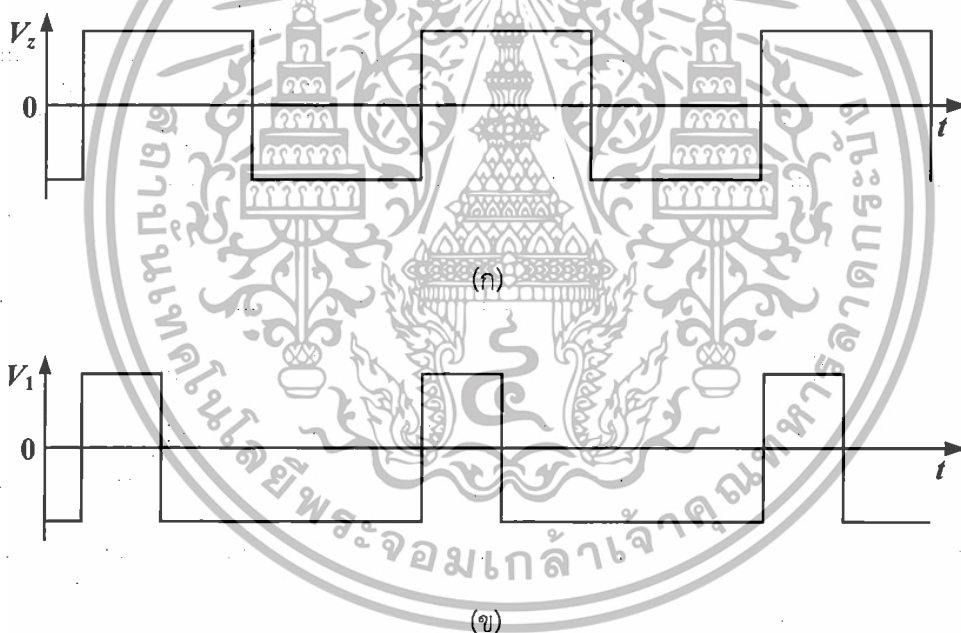
3.4



รูปที่ 3.4 หลักการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของวงจรมุมและคงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าในวงจรควบคุมการทำงานของวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Monostable multivibrator) จำนวนสองตัว (MN1 และ MN2) วงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์จัดได้ว่าเป็นวงจรสวิทช์แบบหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้กำเนิดสัญญาณพัลส์ ความถี่ต่างๆ ออกมาได้ การทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่นำเสนอนี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ วงจรควบคุมการทำงานของวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์จะรับสัญญาณเอาต์พุต  $V_z$  จากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ ซึ่งเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีดิวตีไซเคิลเท่ากับ 50% สัญญาณจะผ่านวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 1 (MN1) โดยที่วงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 1 ทำงานโดยตอบสนองต่อสัญญาณที่ขอบขาขึ้น (Rising edge) และทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีขนาดความกว้างเพียงหนึ่งในสี่ของคาบเวลาของสัญญาณอินพุต ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้างเท่ากับหนึ่งในสี่ของสัญญาณเอาต์พุต  $V_z$  จากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



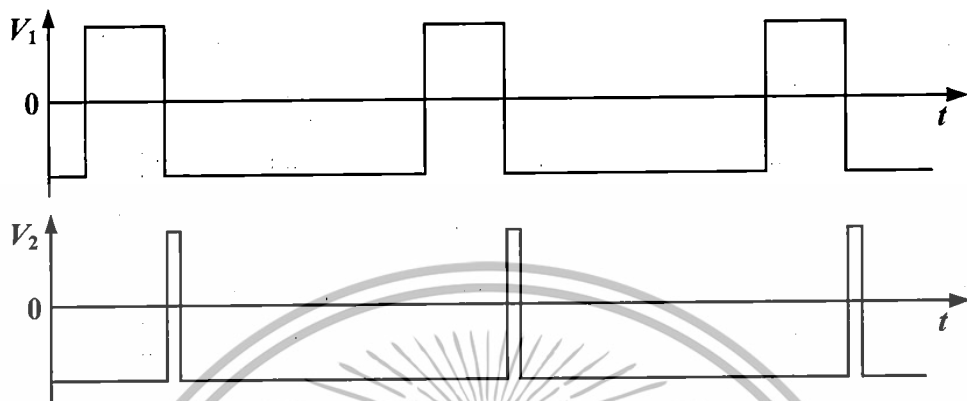
รูปที่ 3.5 กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 1

(ก) สัญญาณอินพุต  $V_z$  ที่ป้อนให้กับวงจร

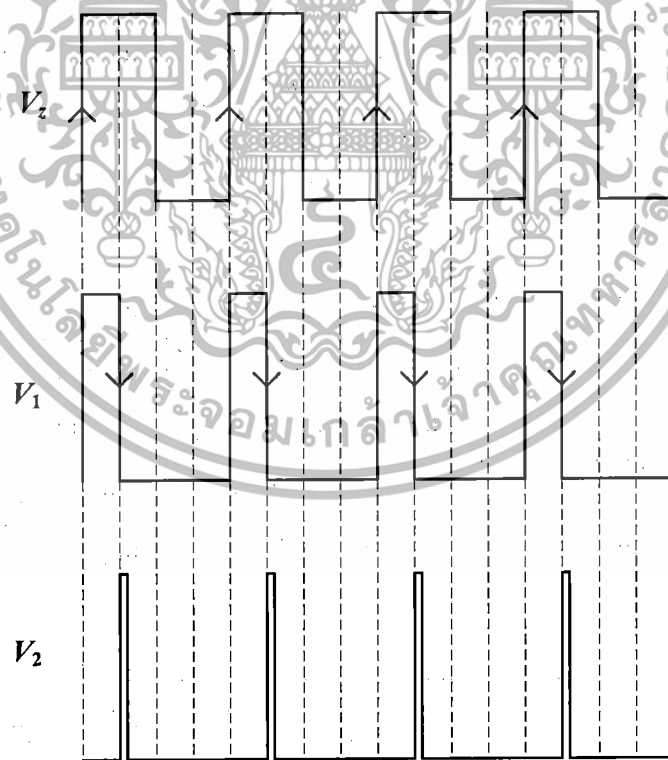
(ข) สัญญาณเอาต์พุต  $V_1$  ที่ได้จากวงจร

สัญญาณเอาต์พุต  $V_1$  ที่ได้จากวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 1 จะถูกป้อนเข้าสู่วงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 2 เพื่อสร้างพัลส์สัญญาณควบคุมที่นำไปใช้งานกับวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 2 นี้จะทำการตอบสนองสัญญาณที่ขอบขาลง (Falling edge) และทำการสร้างพัลส์ที่มีขนาดความกว้างที่เล็กที่สุดที่วงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 2 สามารถสร้างได้ สัญญาณนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองและทำงานได้ สัญญาณเอาต์พุต  $V_2$  ที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรโมโนสเตเบิลมีลต์วีเวเบรเตอร์ตัวที่ 2



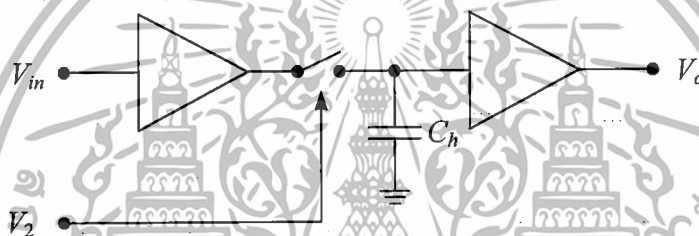
รูปที่ 3.7 กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าที่นำเสนอ จะเห็นว่าเอาต์พุตของวงจรจะมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์เล็กๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการควบคุมวงจรสุ่มและคงค่าต่อไป

### 3.2.3 วงจรสุ่มและคงค่า

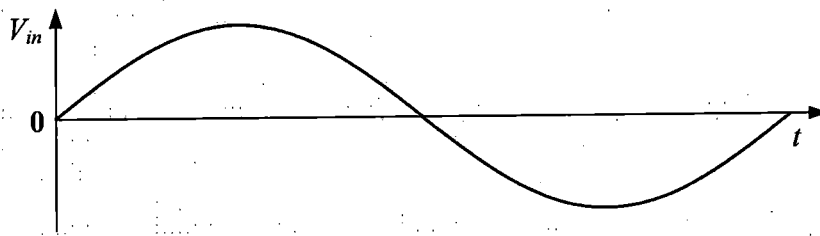
โครงสร้างของวงจรสุ่มและคงค่าสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.8 โดยทั่วไปการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอินพุตจะทำงานตามสัญญาณควบคุม  $V_2$  ที่ถูกป้อนให้กับวงจร ซึ่งสัญญาณควบคุมจะมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ขนาดเล็ก ผลของการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่านั้น เหมือนกับการคูณกันของสัญญาณอินพุตกับสัญญาณควบคุมในเวลานั้นๆ และจะทำการคงค่าไว้จนกว่าจะมีสัญญาณพัลส์ลูกใหม่เข้ามา ถึงจะเริ่มทำการสุ่มค่าสัญญาณถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 3.9



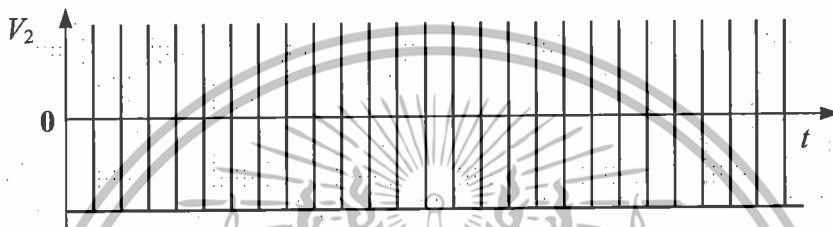
รูปที่ 3.8 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรสุ่มและคงค่า

การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ วงจรสุ่มและคงค่าจะรับสัญญาณเอาต์พุตจากรีโวลเวอร์  $V_1$  และทำงานตามสัญญาณพัลส์  $V_2$  ที่ได้จากวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า เนื่องจากสัญญาณกระตุ้นที่ถูกป้อนให้แก่รีโวลเวอร์และวงจรตรวจจับผ่านศูนย์เป็นสัญญาณที่มีขนาดที่เท่ากัน ทำให้สัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าอยู่กึ่งกลางของสัญญาณพาหะที่อยู่ร่วมกับสัญญาณของรีโวลเวอร์พอดี วงจรสุ่มและคงค่าจะทำการสุ่มค่าสัญญาณจากรีโวลเวอร์ตามสัญญาณพัลส์  $V_2$  ซึ่งจะตรงกับจุดยอดของสัญญาณพาหะของรีโวลเวอร์และทำการคงค่าไว้ ซึ่งจะให้ได้สัญญาณเชิงมุมหรือสัญญาณดิโมดูเลตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการคงค่า กราฟสัญญาณที่ได้ในส่วนของการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าจะแสดงในรูปที่ 3.10

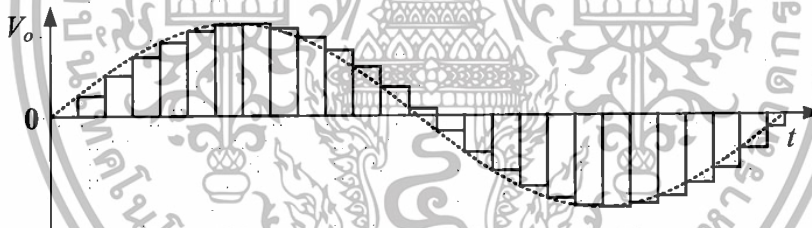
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

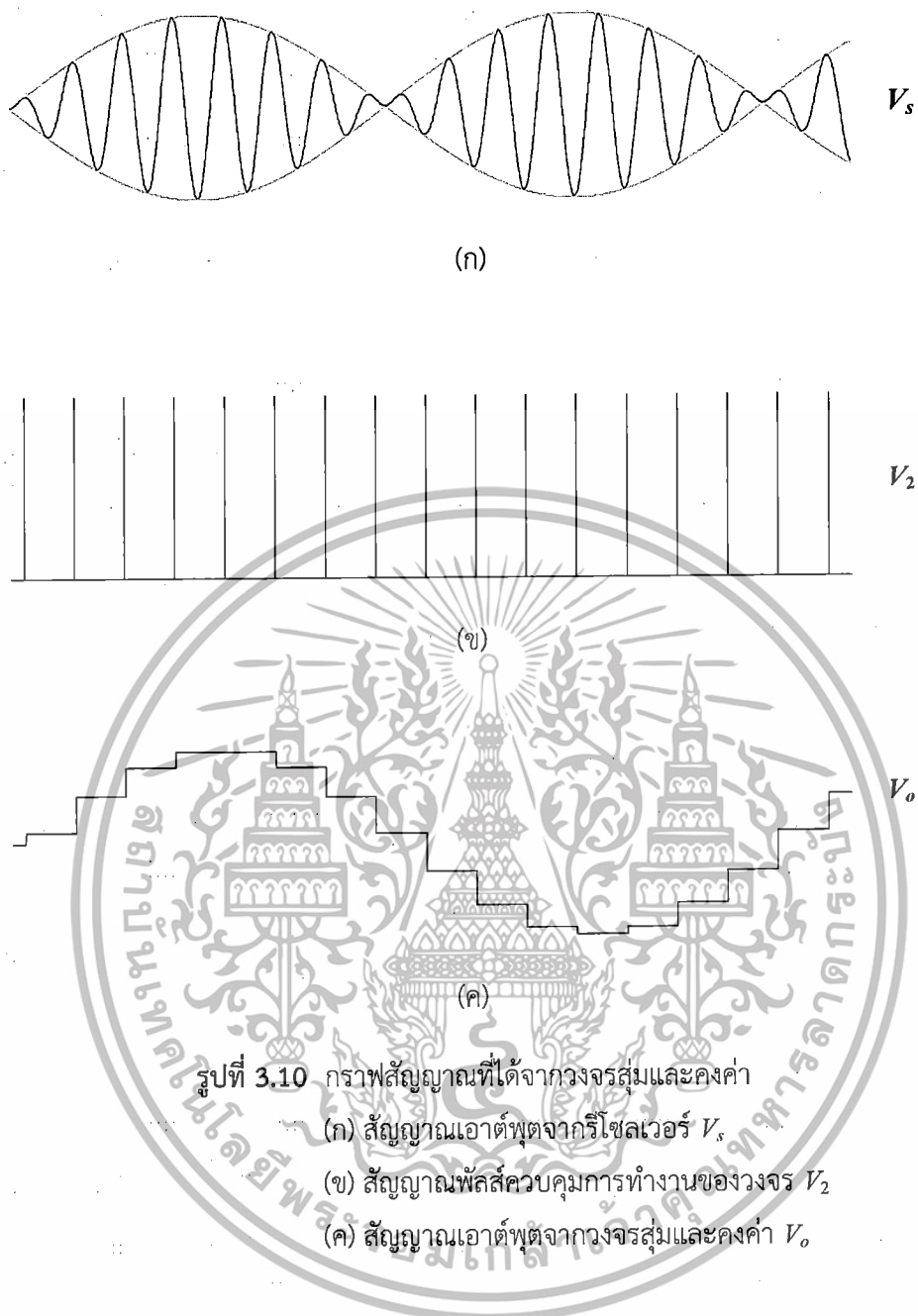
รูปที่ 3.9 กราฟสัญญาณการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า

(ก) สัญญาณอินพุตที่เข้าสู่วงจร

(ข) สัญญาณควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า

(ค) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสุ่มและคงค่า

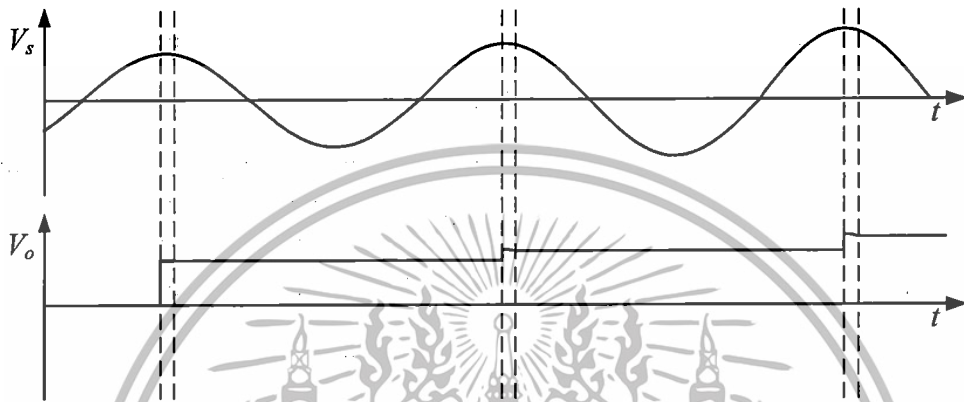
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร

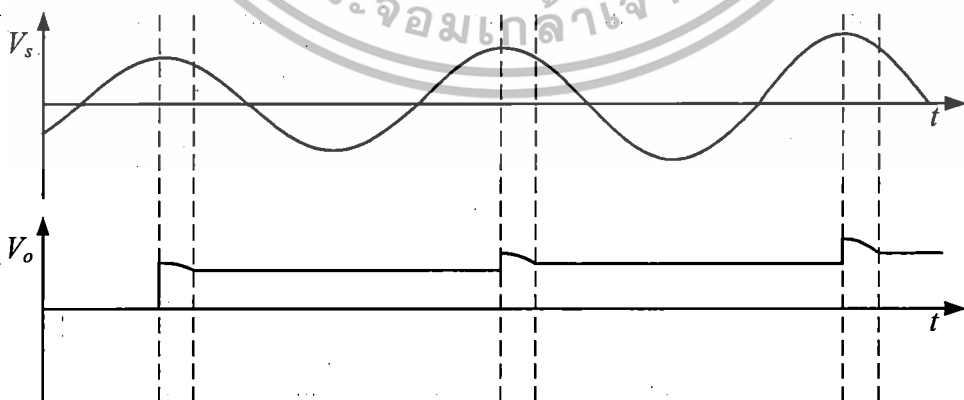
จากหลักการของวงจรตีมอดูเลเตอสำหรับสัญญาณรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่าค่าความผิดพลาดของวงจรมานั้น เกิดขึ้นจากการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า ซึ่งมีหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมการทำงานของแก่วงจรสุ่มและคงค่า วงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าจะประกอบไปด้วยโมโนสเตเบิลมีลติไวเบเรเตอร์จำนวน 2 วงจร จากหลักการทำงานของโมโนสเตเบิลทั้งสองที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้ จะเห็นว่าสิ่งที่ต้องการจากวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าคือสัญญาณพัลส์ที่อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของสัญญาณกระตุ้นพอดี้ ซึ่งจะทำให้การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าที่ทำงานตามสัญญาณพัลส์ที่ได้ ทำการสุ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และคงค่าสัญญาณไว้ที่ตำแหน่งสูงสุดของสัญญาณพาหะภายในรีโวลเวอร์ ซึ่งความแม่นยำของวงจรสุ่มและคงค่าจะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ได้ หากสัญญาณพัลส์มีขนาดที่ใหญ่ จะทำให้สัญญาณที่วงจรสุ่มและคงค่าทำการคงค่าไว้นั้นคลาดเคลื่อนจากสัญญาณ ณ จุดสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า

จากรูปที่ 3.11 พบว่าการทำงานในสภาวะสุ่มของวงจรสุ่มและคงค่าจะทำงานตามขนาดความกว้างของพัลส์สัญญาณที่ได้ (เส้นประ) ทำให้เห็นว่าหากขนาดความกว้างของพัลส์ที่ส่งมามีขนาดที่กว้างเกินไปจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากจุดสูงสุดมากเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดความกว้างสัญญาณพัลส์ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

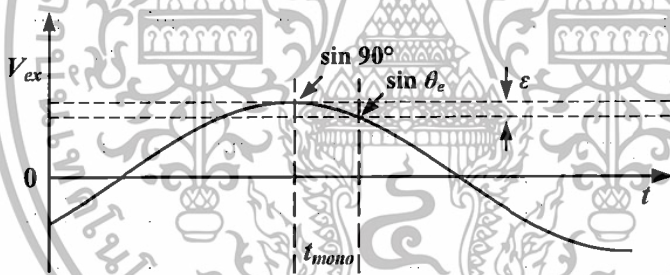
จากรูปที่ 3.12 เมื่อขนาดความกว้างของพัลส์สัญญาณมีขนาดที่กว้างขึ้น สถานะการสุ่มสัญญาณของ วงจรสุ่มและคงค่าก็นานขึ้นตามขนาดความกว้าง ทำให้สถานะการคงค่าของวงจรคงค่าคลาดเคลื่อน จากค่าสูงสุดของสัญญาณที่เข้ามา เมื่อกำหนดค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 1 ค่าความ ผิดพลาดของวงจรดีมอดูเลตที่เกิดจากขนาดความกว้างพัลส์สัญญาณควบคุมการทำงานของวงจรสุ่ม และคงค่า ( $\epsilon$ ) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\epsilon = \frac{\sin 90^\circ - \sin \theta_e}{\sin 90^\circ} \times 100\% \quad (3.2)$$

หรือ

$$\epsilon = (1 - \sin \theta_e) \times 100\% \quad (3.3)$$

โดยกำหนดให้  $\theta_e$  คือตำแหน่งสุดท้ายของการทำงานในสถานะสุ่มของวงจรสุ่มและคงค่า



รูปที่ 3.13 แสดงความผิดพลาดอันเนื่องมาจากขนาดความกว้างของพัลส์ที่ใหญ่เกินไป

จากรูปที่ 3.13 ค่า  $t_{mono}$  คือขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ควบคุม ซึ่งจะเห็นว่าหากค่าความกว้าง ของสัญญาณพัลส์ควบคุมมีขนาดที่ใหญ่เกินไป จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาด  $\epsilon$  มากขึ้น ในการทำการ ทดสอบการทำงานของวงจรที่นำเสนอ จะกำหนดขนาดของสัญญาณ  $V_{ex}$  ให้มีค่าความถี่เท่ากับ 3kHz ขนาดความกว้างของพัลส์ที่ได้จากวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าเท่ากับ  $5\mu s$  ซึ่ง สามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดของวงจรดีมอดูเลตจากขนาดความกว้างพัลส์สัญญาณควบคุม การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า ( $\epsilon$ ) ที่ความถี่ 3kHz จะได้  $\theta_e$  มีค่าเท่ากับ  $95.421^\circ$  ซึ่งเมื่อแทนค่าใน สมการที่ (3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon = (1 - \sin \theta_e) \times 100\%$$

$$\varepsilon = (1 - \sin(95.421^\circ)) \times 100\%$$

$$\varepsilon = (1 - 0.996) \times 100\%$$

$$\varepsilon = (0.004) \times 100\%$$

$$\varepsilon = 0.4\%$$

ดังนั้น ค่าความผิดพลาดของวงจรมอดูเลตจากขนาดความกว้างพัลส์สัญญาณควบคุมการทำงานของ วงจรสุ่มและคงค่า ( $\varepsilon$ ) กรณีที่สัญญาณอินพุตมีค่า 3kHz มีค่าเท่ากับ 0.4%

### 3.4 การจำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB

จากหลักการการทำงานของวงจรมอดูเลตที่สามารถนำไปจำลองการทำงานจากโปรแกรม MATLAB & Simulink โดยในแต่ละส่วนของการทำงานสามารถใช้บล็อกในโปรแกรมตาม ตารางที่ 3.1 และทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.2

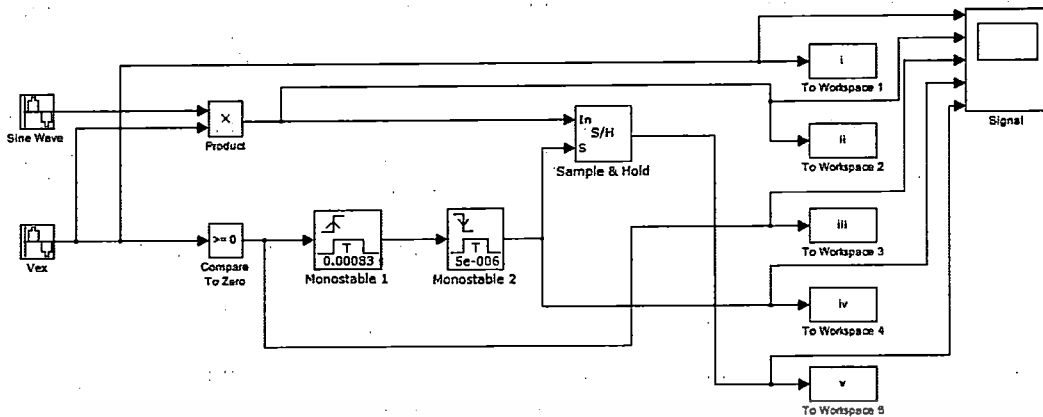
ตารางที่ 3.1 การทำงานบนโปรแกรม MATLAB & Simulink

บล็อกวงจรที่ใช้ในการจำลอง	บล็อกที่ใช้ในโปรแกรม
วงจรตรวจจับผ่านศูนย์	Compare to zero
วงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า	Monostable 1, 2
วงจรสุ่มและคงค่า	Sample & Hold

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

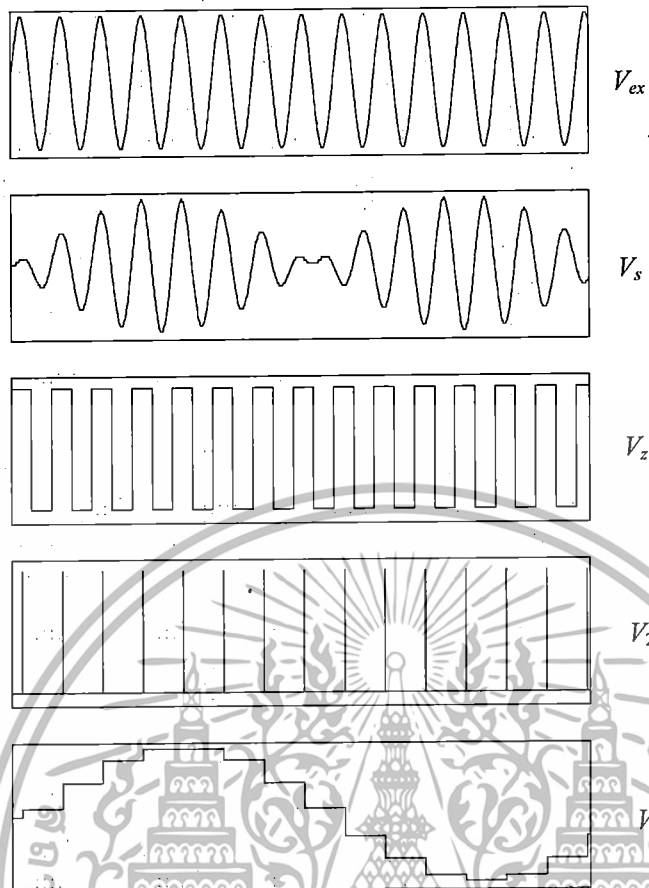
บล็อกที่ใช้ในโปรแกรม	ค่าที่ใช้
$V_{ex}$	3kHz 2V <sub>pp</sub>
Monostable 1	Rising Edge, 83 $\mu$ s
Monostable 2	Falling Edge, 5 $\mu$ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 โครงสร้างการจำลองการทำงานของหลักการที่นำเสนอ  
ด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink

จากรูปที่ 3.14 ตารางที่ 3.1 และ 3.2 สัญญาณเอาต์พุตจากรีโพลเวอร์ซึ่งเป็นสัญญาณมอดูเลตทางขนาดจะใช้สัญญาณจากการคูณกันของบล็อกสัญญาณไซน์สองสัญญาณแทน โดยสัญญาณกระตุ้น  $V_{ex}$  กำหนดค่าความถี่ไว้ที่ 3kHz วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ใช้บล็อก Compare to zero ในการทำงาน วงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าจะใช้บล็อกโมนอสเตเบิล (Monostable 1 และ 2) โดยที่บล็อกแรกตั้งความกว้างของพัลส์ไว้ที่ 83  $\mu$ s ตรวจจับสัญญาณที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณ และบล็อกที่สองตั้งความกว้างของพัลส์ไว้ที่ 5  $\mu$ s ตรวจจับสัญญาณที่ขอบขาลงของสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณควบคุมการทำงานให้แก่วงจรสุ่มและคงค่า บล็อกของวงจรสุ่มและคงค่า ทำการสุ่มและคงค่าตามสัญญาณควบคุมการทำงานที่ได้รับ ผลของการจำลองการทำงานเป็นไปตามรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าการจำลองการทำงานของวงจรเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ



รูปที่ 3.15 กราฟสัญญาณที่จำลองได้ในแต่ละจุดจากรูปที่ 3.14

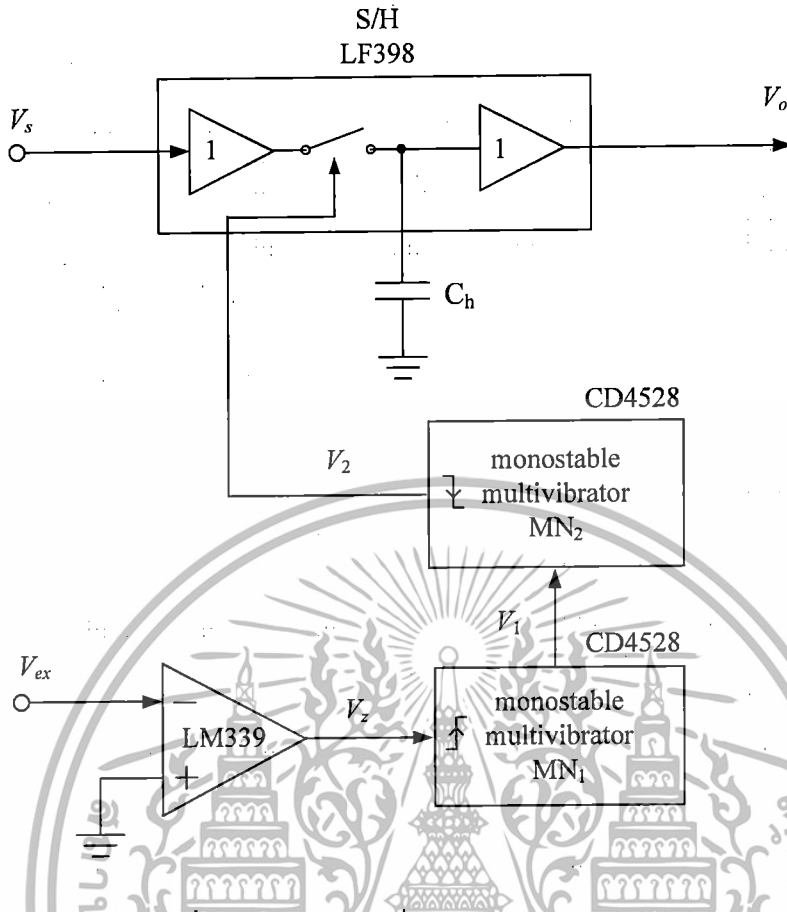
### 3.5 ผลการทดลองจริง

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของวงจรตีมอดูเลตสำหรับสัญญาณจากรีโซลเวอร์ที่นำเสนอ ได้ทำการต่อวงจรโดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

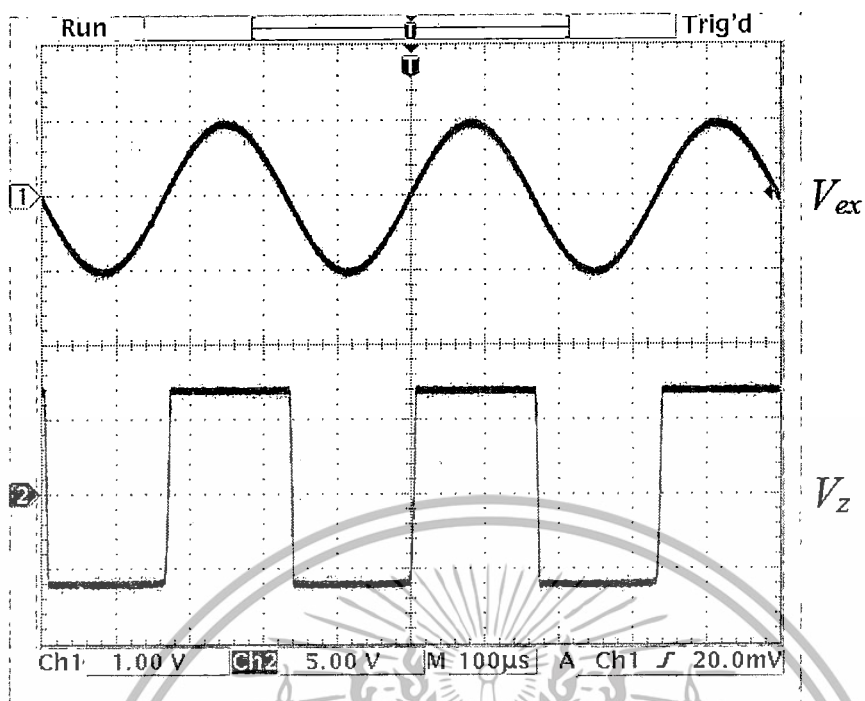
บล็อกวงจรที่ใช้	อุปกรณ์
วงจรตรวจจับผ่านศูนย์	LM339
วงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า	CD4528
วงจรสุ่มและคงค่า	LF398

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 บล็อกวงจรที่ใช้ในการทดลองต่อจริง

สัญญาณกระตุ้นเป็นสัญญาณไซน์  $V_{ex}$  ถูกกำหนดความถี่ไว้ที่ 3kHz ขนาด  $2V_{pp}$  สัญญาณกระตุ้นจะถูกส่งไปยังออปแอมป์ LM339 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ ทำการเปรียบเทียบสัญญาณกระตุ้นกับกราวด์ ได้สัญญาณสี่เหลี่ยม  $V_z$  ที่มีดิวิตีไซเคิลเท่ากับ 50% ดังแสดงในรูปที่ 3.17

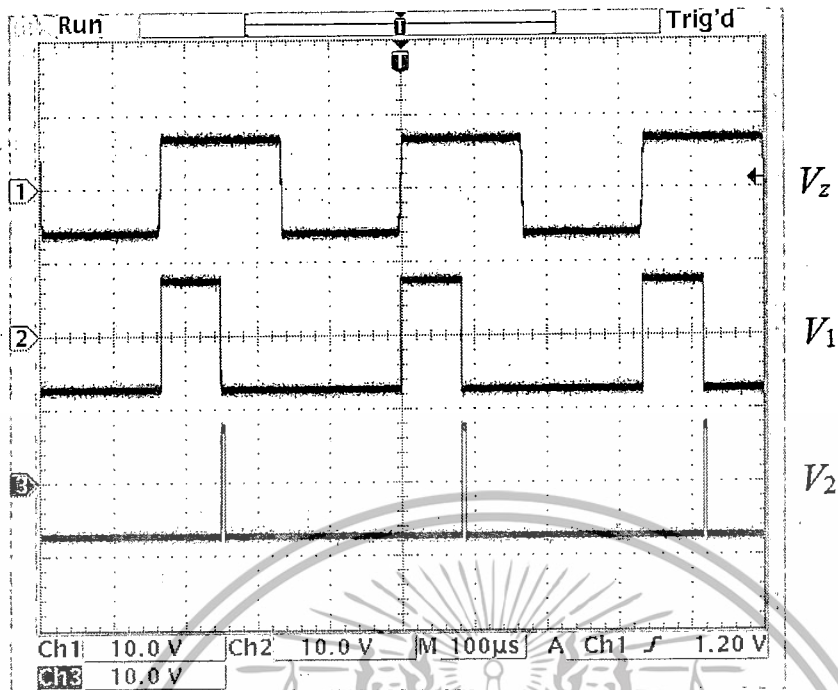


รูปที่ 3.17 สัญญาณกระตุ้น  $V_{ex}$  และสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์  $V_z$

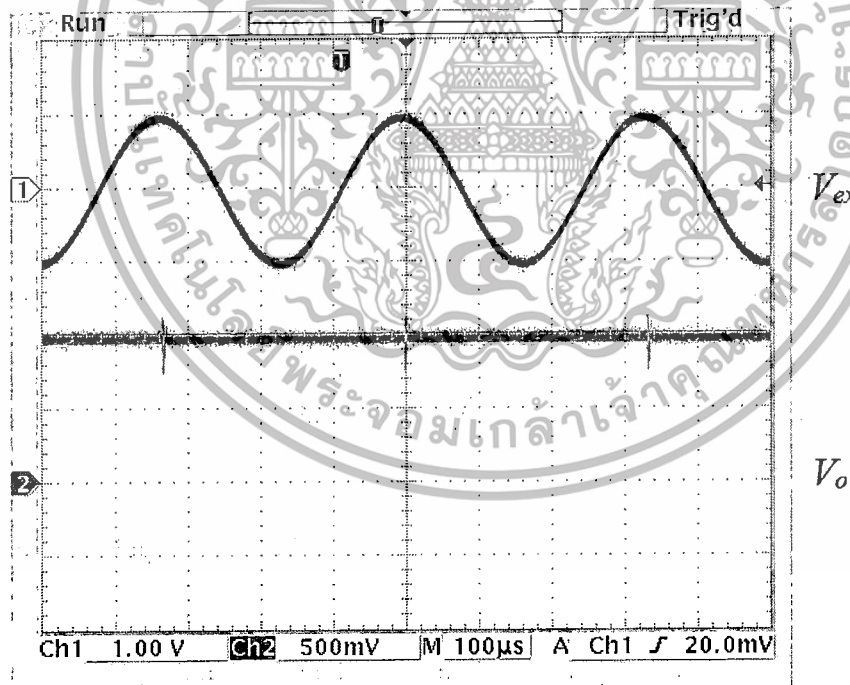
จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังส่วนของวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า โดยในส่วนนี้จะทำหน้าที่สร้างพัลส์เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า เนื่องจากวงจรที่ทำการออกแบบถูกนำมาใช้กับสัญญาณรีโซลเวอ์ที่มีความถี่ของสัญญาณกระตุ้นอยู่ที่ 3kHz สามารถคำนวณหาค่าหนึ่งในสี่ของคาบเวลาได้จากสมการ

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

จากสมการที่ 3.4 เมื่อได้ค่าของคาบเวลาแล้วนำมาหารด้วย 4 ทำให้ได้ค่าเท่ากับ 83.33  $\mu$ s จากนั้นทำการปรับค่าของโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 1 ให้ขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ไว้ที่ 83  $\mu$ s และตอบสนองต่อสัญญาณขอบขาขึ้น และทำการปรับค่าของโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 2 ให้มีขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 5  $\mu$ s ตอบสนองต่อสัญญาณขอบขาลง ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้วงจรมสุ่มและคงค่าทำงานได้ จากการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า เอาต์พุตที่ได้จากวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 2 จะถูกนำไปใช้เพื่อเป็นสัญญาณพัลส์ควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าต่อไป โดยสัญญาณที่ได้จะแสดงในรูปที่ 3.18 ทำการทดสอบการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า โดยป้อนสัญญาณ  $V_{ex}$  เป็นสัญญาณอินพุต สัญญาณเอาต์พุตที่ได้เป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ โดยสัญญาณจากวงจรสุ่มและคงค่าจะแสดงในรูปที่ 3.19



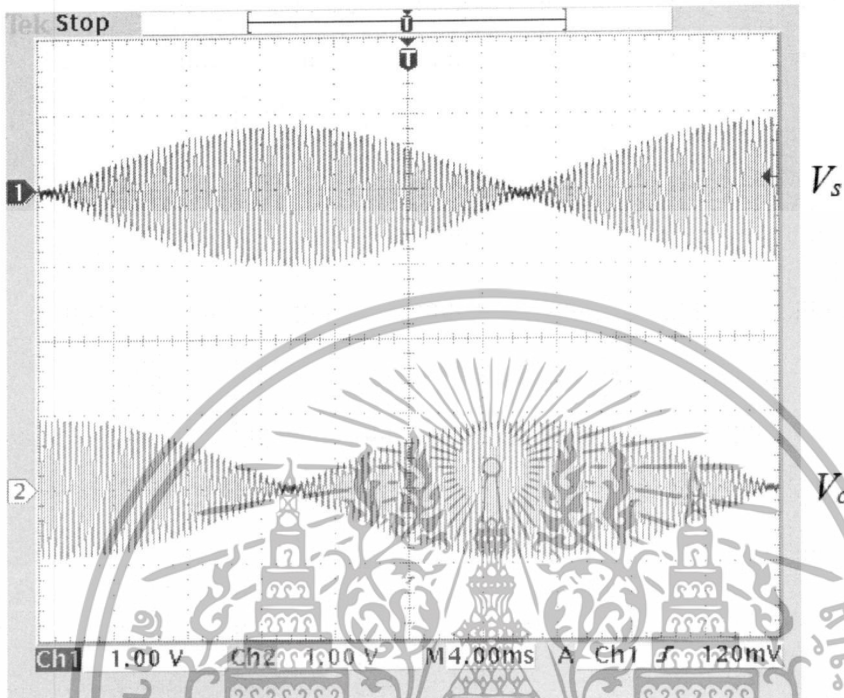
รูปที่ 3.18 สัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า



รูปที่ 3.19 สัญญาณที่ได้จากวงจรสุ่มและคงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

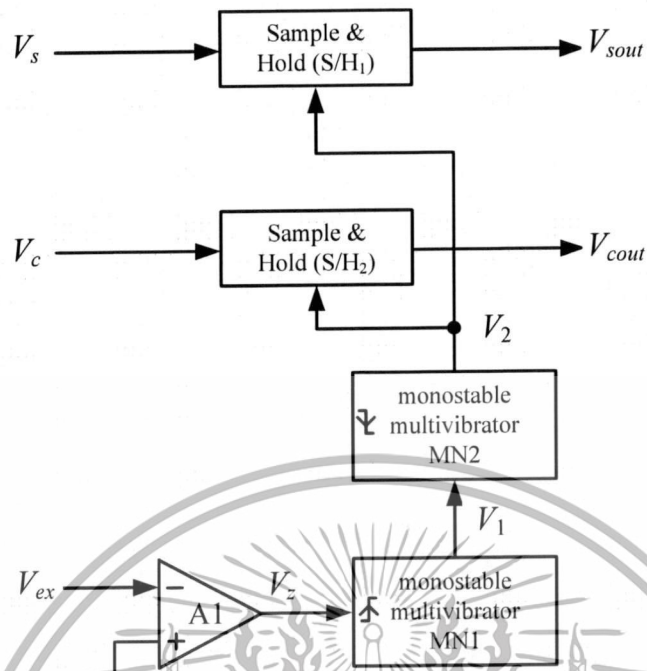
สัญญาณจากรีโพลเวอร์ที่จะนำมาใช้ทดสอบกับวงจรจะถูกสร้างขึ้นจากรีโพลเวอร์ของบริษัท SANYO SENKI เบอร์ 101 – 4100 สัญญาณจากรีโพลเวอร์ทั้งฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.20



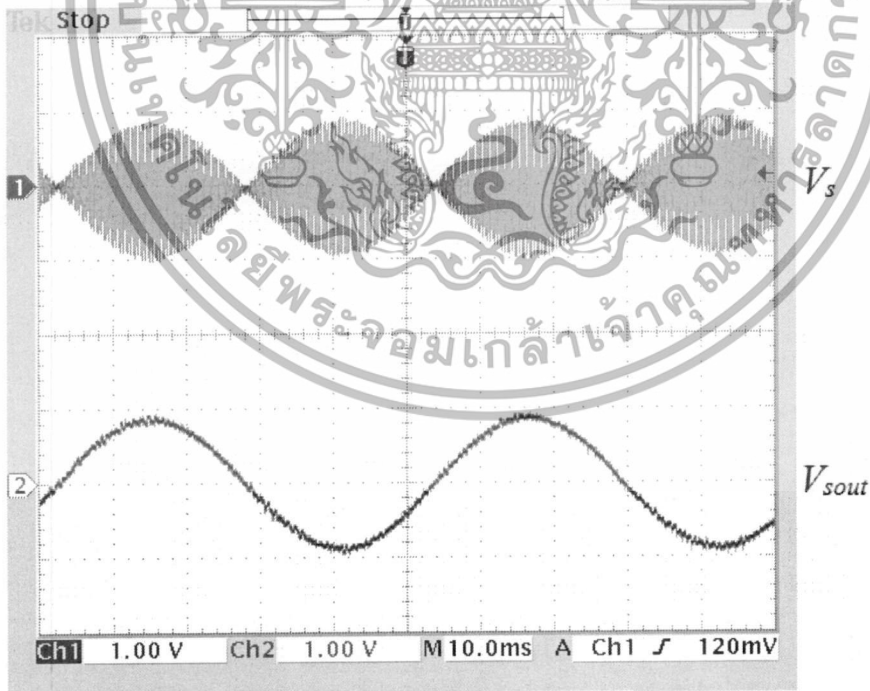
รูปที่ 3.20 สัญญาณจากรีโพลเวอร์

จากรูปที่ 3.20 จะเห็นว่าสัญญาณจากรีโพลเวอร์นั้นจะมีสัญญาณเอาต์พุตสองสัญญาณ ทั้งในรูปของฟังก์ชันไซน์ และฟังก์ชันโคไซน์ วงจรที่นำเสนอสามารถทำการดีมอดูเลตสัญญาณทั้งสองได้ในเวลาเดียวกัน โดยใช้การต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.21 จะเห็นว่าการทำงานของวงจรดีมอดูเลตสำหรับสัญญาณจากรีโพลเวอร์สามารถทำงานได้ดี ผลจากการดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโพลเวอร์ทั้งสองสัญญาณจะแสดงในรูปที่ 3.22 และ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

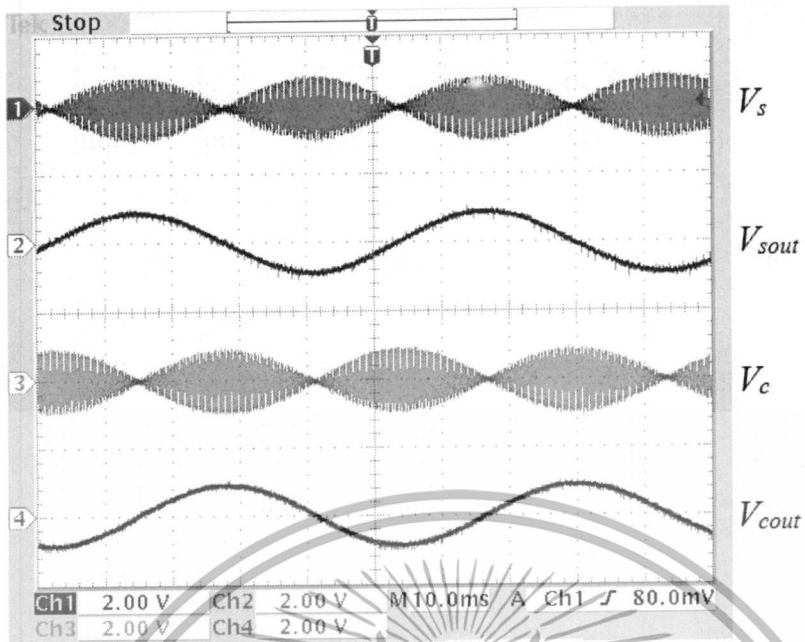


รูปที่ 3.21 วงจรดีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ที่นำเสนอ

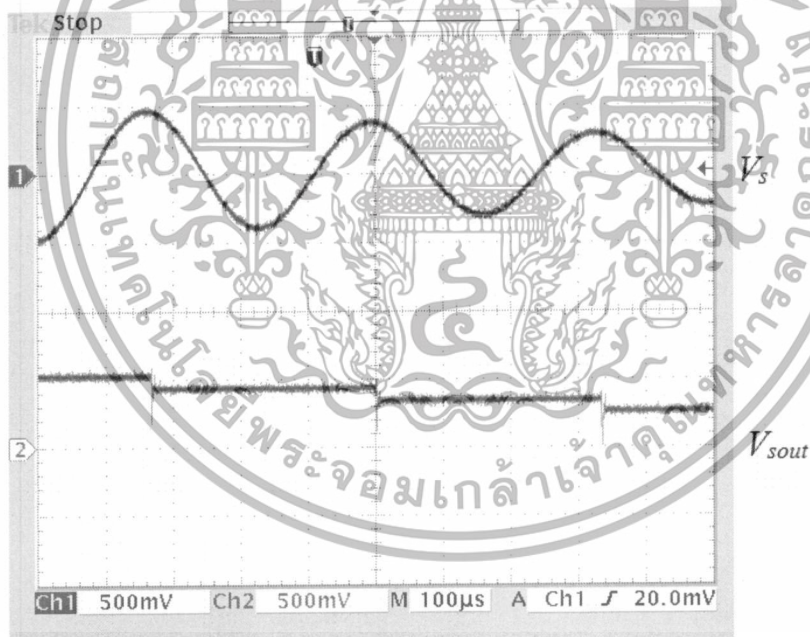


รูปที่ 3.22 สัญญาณมอดูเลตและสัญญาณดีมอดูเลตจากรีโซลเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 สัญญาณจากรีโพลเวอร์ทั้งสองสัญญาณและการตีมอดูเลตสัญญาณทั้งสอง

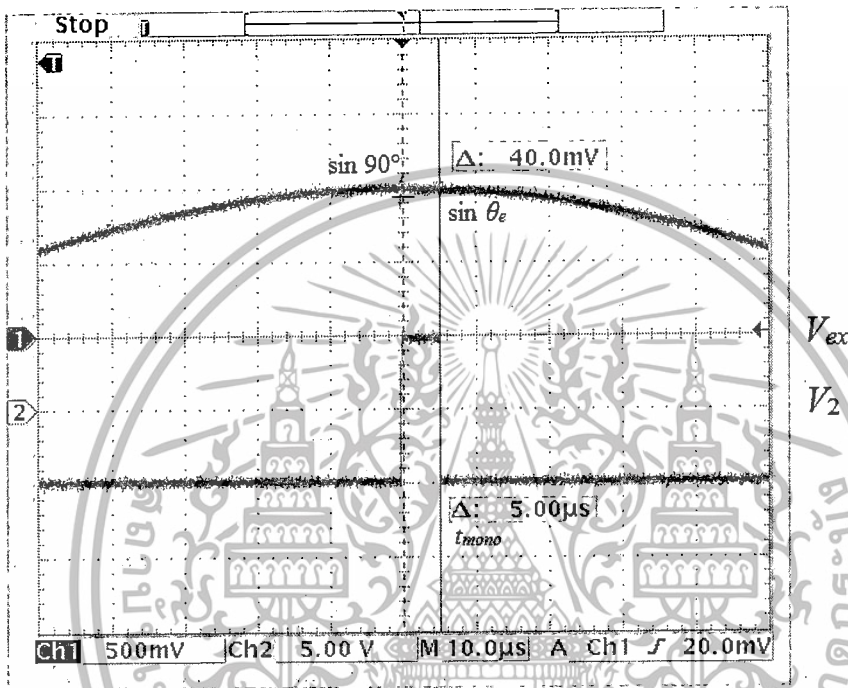


รูปที่ 3.24 การทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าเมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 3.24 เมื่ออินพุตที่เข้าสู่วงจรสุ่มและคงค่ามีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดในแต่ละลูกคลื่น วงจรสุ่มและคงค่าจะทำการสุ่มและคงค่าของสัญญาณที่จุดสูงสุดของแอมพลิจูดของสัญญาณพอดี ซึ่งเป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ

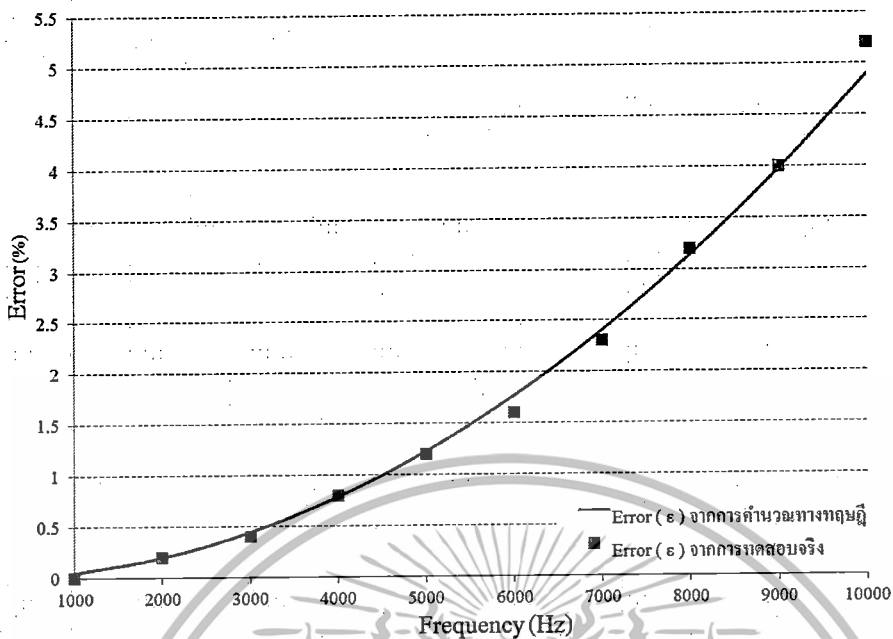
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.25 แสดงผลความผิดพลาดโดยการทดสอบจริง จากรูป  $V_{ex}$  มีความถี่ 3kHz แอมพลิจูด  $2 V_{pp}$  แอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงระหว่างจุด  $\sin 90^\circ$  และ  $\sin \theta_e$  ซึ่งวัดได้เท่ากับ 40 mV ค่าแอมพลิจูดที่จุด  $\theta_e$  มีค่าเท่ากับ 0.996V ที่ขนาดความกว้างของพัลส์  $V_2$  เท่ากับ 5  $\mu s$  เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดจะมีค่าเท่ากับ 0.4% ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าที่คำนวณทางทฤษฎี



รูปที่ 3.25 ผลการทดสอบความผิดพลาดอันเนื่องมาจากขนาดความกว้างของพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 ค่าความผิดพลาดจากขนาดความกว้างของพัลส์ที่ความถี่ต่างกัน

จากรูปที่ 3.26 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์จะเพิ่มมากขึ้นตามความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลง ในช่วงความถี่ 1kHz – 5kHz ค่าความผิดพลาดสูงสุดจะอยู่ที่ 1.2% ที่ความถี่สูงสุดที่ทำการทดสอบ 10kHz ค่าความผิดพลาดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 5.2%

### 3.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรตีโมดูลสัญญาณจากรีโซลเวอร์อย่างง่ายซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สามารถทำได้ตามที่กล่าวถึงไม่ว่าจะเป็นออปแอมป์ โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ และวงจรสุ่มและคงค่า การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจรที่นำเสนอ วงจรที่นำเสนอสามารถปรับแต่งขนาดของสัญญาณควบคุมการทำงานในส่วนของโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ทั้งสองได้ อีกทั้งได้ทดสอบการทำงานของวงจรที่ออกแบบด้วยการเลียนแบบการทำงานของวงจรโปรแกรม MATLAB & Simulink รวมถึงการต่อวงจรจริง จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวงจรที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถทำงานได้จริง และมีความสอดคล้องกับทฤษฎี หลักการที่นำเสนอสามารถเปรียบเทียบกับหลักการที่นำเสนอในอดีตดังแสดงในตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหลักการในอดีตและหลักการที่นำเสนอ

หลักการในการทำงานที่นำเสนอ	จำนวนอุปกรณ์ แอสซีฟ	จำนวนอุปกรณ์ พาสซีฟ	ความเร็วในการ ทำงาน
วงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยอาศัยวงจรตรวจจับแอมพลิจูดแบบพื้นฐาน [2]	23	16	2 ไชเคิลของสัญญาณพาหะ
วงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์โดยใช้วงจรเลื่อนเฟส [3]	24	16	1 ไชเคิลของสัญญาณพาหะ
หลักการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์	4	6	1 ไชเคิลของสัญญาณพาหะ

โดยหลักการทั้งสามไม่ต้องใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำในการทำงาน และสามารถตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ทั้งสัญญาณไซน์และโคไซน์ได้ในเวลาเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

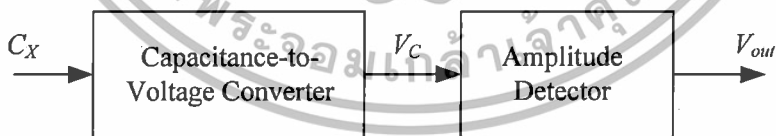
# การประยุกต์ใช้งานวงจรมอดูเลตที่นำเสนอ

### 4.1 กล่าวนำ

จากหลักการมอดูเลตที่นำเสนอในบทที่ 3 จะเห็นว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในส่วนของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดได้ (Amplitude detector) โดยในบทนี้จะนำวงจรมอดูเลตที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้กับวงจรตรวจจับค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive detector) โดยทั่วไปแล้ววงจรตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าจะรับอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณไซน์และให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณไซน์ที่ขนาดของสัญญาณไซน์สัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ต้องนำไปผ่านวงจรตรวจจับแอมพลิจูดถึงจะสามารถนำไปใช้งานได้ [14] หลักการและขั้นตอนการทำงานของวงจรจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

### 4.2 หลักการทำงานของวงจร

วงจรตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าที่นำมาทดสอบการประยุกต์ใช้งานวงจรมอดูเลตในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง (Capacitance-to-voltage converter) และวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูด ในส่วนของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรงประกอบไปด้วยวงจรขยายค่าประจุไฟฟ้า (Charge amplifier) และวงจรขยายแรงดัน (Voltage amplifier) ต่อกัน ส่วนวงจรตรวจจับแอมพลิจูดจะใช้หลักการของวงจรมอดูเลตสัญญาณที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยบล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรแสดงดังรูปที่ 4.1

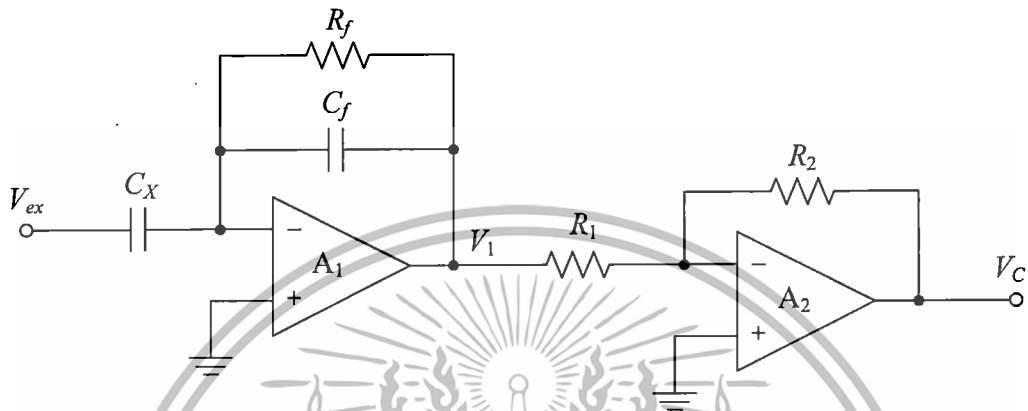


รูปที่ 4.1 หลักการของการประยุกต์ใช้งานวงจรมอดูเลตที่นำเสนอ

ค่าแอมพลิจูดของ  $V_C$  จะขึ้นอยู่กับค่าที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_x$  จึงต้องใช้วงจรตรวจจับแอมพลิจูดเพื่อหาค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะนั้น ทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้จากวงจรตรวจจับแอมพลิจูดเป็นแรงดันไฟตรงที่ค่าเป็นสัดส่วนกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_x$  โดยการทำงานของวงจรในแต่ละส่วนจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

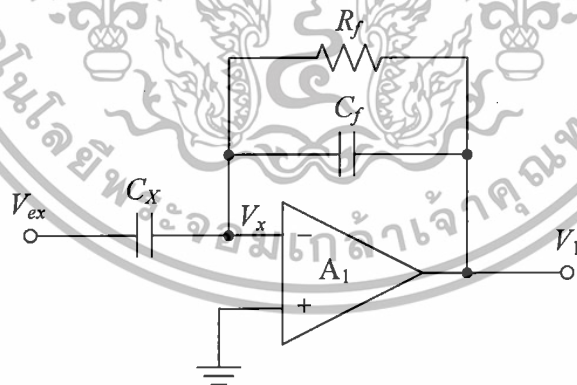
### 4.2.1 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง

วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันตรงที่ใช้ในหลักการที่นำเสนอ จะประกอบด้วยวงจรรย่อยจำนวนสองวงจร ประกอบด้วยวงจรรขยายค่าประจุไฟฟ้าและวงจรรขยายแรงดัน ดังแสดงดังในรูปที่ 4.2 หลักการของวงจรรย่อยทั้งสองวงจรรได้อธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.2 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง

#### 4.2.1.1 วงจรรขยายค่าประจุไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 วงจรรขยายค่าประจุไฟฟ้า

วงจรรขยายค่าประจุไฟฟ้าที่นำมาใช้กับวงจรรที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 4.3 ภายในวงจรรจะประกอบด้วยออปแอมป์  $A_1$  ตัวต้านทาน  $R_f$  และตัวเก็บประจุ  $C_f$  โดยที่  $C_x$  คือค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาจากเซนเซอร์ ส่วนแรงดัน  $V_{ex}$  เป็นสัญญาณไซน์ จากรูปที่ 4.3 สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดัน  $V_{ex}$  กับ  $V_1$  ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_x - V_{ex}}{X_{c_x}} + \frac{V_x - V_1}{X_{c_f}} + \frac{V_x - V_1}{R_f} = 0 \quad (4.1)$$

จากสมการที่ 4.1 สามารถหาแรงดัน  $V_1$  ได้ดังสมการที่ 4.2

$$V_1 = - \left( \frac{X_{c_f} R_f}{R_f + X_{c_f}} \right) \left( \frac{V_{ex}}{X_{c_x}} \right) \quad (4.2)$$

หรือ

$$V_1 = - \left( \frac{R_f}{\frac{R_f}{X_{c_f}} + 1} \right) \left( \frac{V_{ex}}{X_{c_x}} \right) \quad (4.3)$$

เมื่อ  $X_{c_x} = \frac{1}{j\omega C_x}$  และ  $X_{c_f} = \frac{1}{j\omega C_f}$  (ซึ่ง  $\omega$  หมายถึงความถี่เชิงมุมของแรงดัน  $V_{ex}$ ) เมื่อแทนค่า  $X_{c_x}$  และ  $X_{c_f}$  ลงในสมการที่ 4.3 จะได้

$$V_1 = - \left( \frac{j\omega C_x R_f}{j\omega C_f R_f + 1} \right) V_{ex} \quad (4.4)$$

กำหนดให้  $\omega C_f R_f \gg 1$  สมการที่ 4.4 สามารถประมาณค่าได้ดังนี้

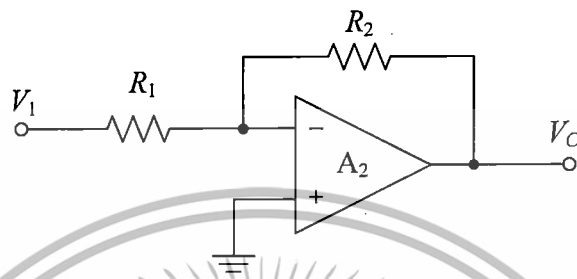
$$V_1 \approx - \left( \frac{C_x}{C_f} \right) V_{ex} \quad (4.5)$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้  $V_{ex}$  และ  $C_f$  เป็นค่าคงที่ แรงดัน  $V_1$  ที่ได้จากวงจรขยายค่าประจุไฟฟ้ามีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_x$  ที่ต้องการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.2 วงจรขยายแรงดัน

เนื่องจากแรงดัน  $V_1$  ที่ได้จากวงจรตรวจจับค่าความจุไฟฟ้ามีขนาดเล็ก จึงต้องทำการขยายแรงดัน  $V_1$  ให้มีค่าที่เหมาะสมสำหรับวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูด โดยใช้วงจรขยายแรงดันดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรขยายแรงดันที่ใช้ในวงจรรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.4 แรงดันเอาต์พุต  $V_C$  ของวงจรขยายแรงดันมีค่าดังสมการ

$$V_C = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) V_1 \quad (4.6)$$

แทนค่า  $V_1$  จากสมการที่ 4.5 ลงในสมการที่ 4.6 จะได้

$$V_C = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{C_X}{C_f}\right) V_{ex} \quad (4.7)$$

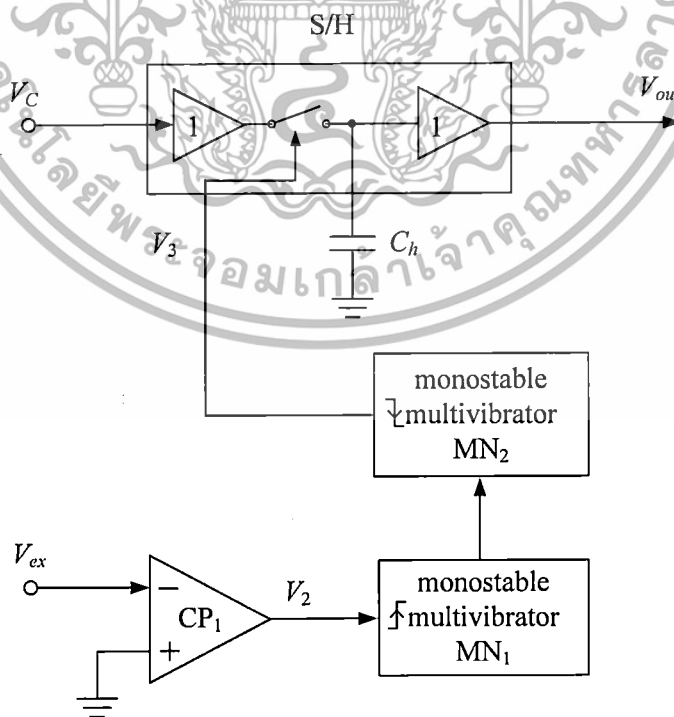
จากสมการที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าแรงดัน  $V_C$  มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_X$  เช่นกัน

จากหัวข้อที่ 4.2.1.1 และ 4.2.1.2 สามารถเขียนวงจรรวมได้ดังรูปที่ 4.2 จากนั้นสัญญาณเอาต์พุต  $V_C$  จะถูกนำไปยังวงจรตรวจจับแอมพลิจูดเพื่อทำการตัดสัญญาณพาหะออกไปและให้สัญญาณไฟตรงตามค่าความจุไฟฟ้า  $C_X$  ที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

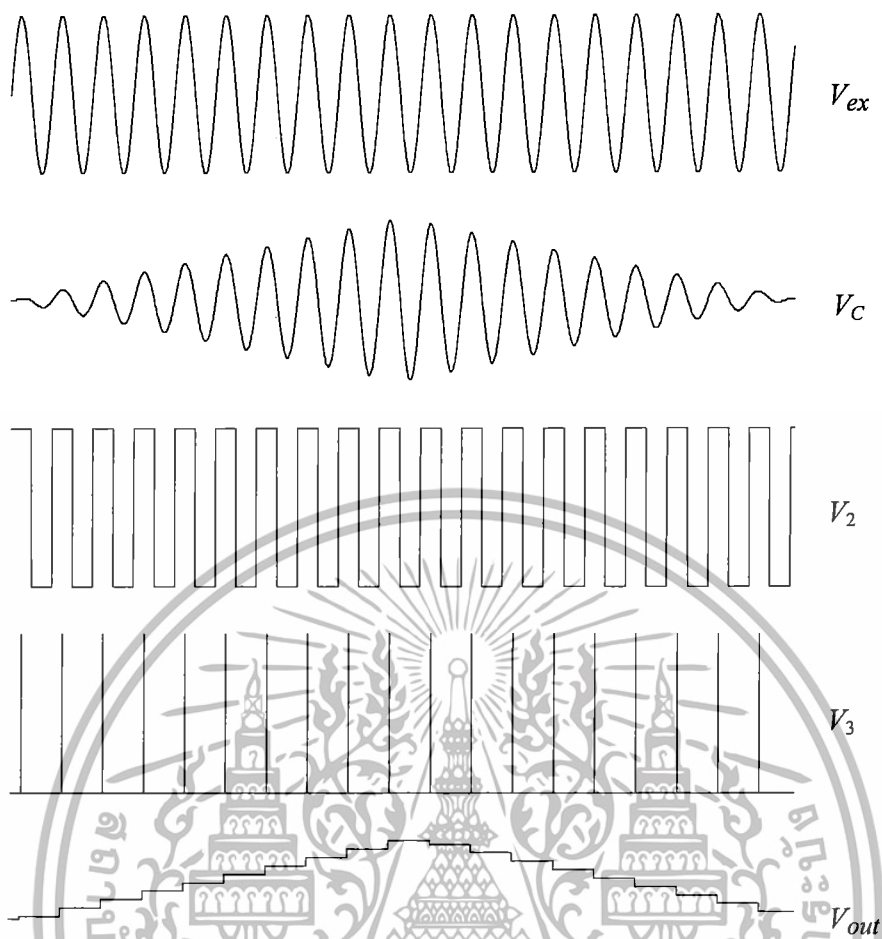
#### 4.2.2 วงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูด

วงจรที่มอดูเลตสัญญาณที่นำเสนอในบทที่ 3 นี้ได้ถูกนำมาใช้เป็นวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดสำหรับวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ วงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ( $MN_1$ - $MN_2$ ) และวงจรสุ่มและคงค่า แสดงดังรูปที่ 4.5 สัญญาณ  $V_C$  คือสัญญาณที่ได้จากวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่าความจุ  $C_x$  ดังสมการที่ (4.7) โดยสัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังวงจรสุ่มและคงค่าโดยตรง วงจรสุ่มและคงค่าทำงานตามสัญญาณ  $V_3$  ที่ได้จากวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า กระบวนการที่ทำให้ได้สัญญาณนี้เริ่มจากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์แปลงสัญญาณ  $V_{ex}$  โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับเข้ามากับสัญญาณกราวด์ ทำให้สัญญาณ  $V_2$  ซึ่งเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวแรก เพื่อทำการสร้างสัญญาณพัลส์ให้มีขนาดความกว้างเท่ากับหนึ่งในสี่ของสัญญาณ โมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ตัวที่สองจะนำสัญญาณที่ได้ไปสร้างพัลส์สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าต่อไป จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้จากวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดจะสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของสัญญาณ  $V_C$  ซึ่งขนาดของสัญญาณ  $V_C$  นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า  $C_x$  ด้วยเช่นกัน กราฟสัญญาณในแต่ละส่วนของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดแสดงดังรูปที่ 4.6 เอาต์พุตที่ได้จากวงจรมีจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของ  $C_x$  ที่ทดสอบ



รูปที่ 4.5 วงจรตรวจจับแอมพลิจูดที่ใช้ในวงจรรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟที่ได้ในแต่ละจุดของวงจรตรวจจับแอมพลิจูด

### 4.3 ผลจากการทดลองจริง

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของวงจรที่ได้ออกมาให้นำเสนอไปประยุกต์ใช้ในส่วนของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดที่ได้นำเสนอ ได้ทำการต่อวงจรตามหลักการในรูปที่ 4.1 โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 และตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

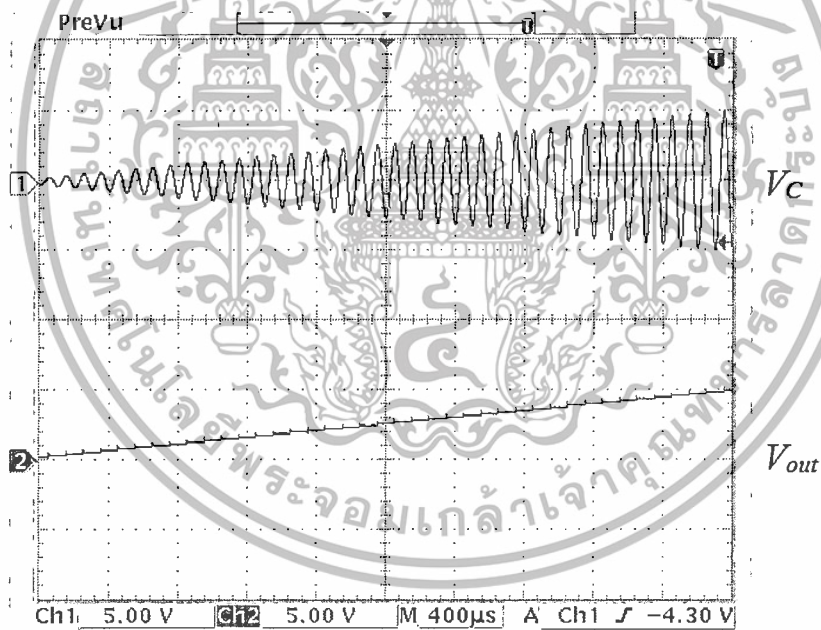
วงจรที่ใช้งาน	อุปกรณ์
วงจรขยายค่าประจุไฟฟ้า	LF351
วงจรขยายแรงดัน	LF351
วงจรตรวจตัดผ่านศูนย์	LM339
วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (MN <sub>1</sub> -MN <sub>2</sub> )	CD4528
วงจรสุ่มและคงค่า	LF398

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดสอบ
$V_{DD}, -V_{SS}$	7.5V
$R_f$	100k $\Omega$
$R_1$	15k $\Omega$
$R_2$	300k $\Omega$
$V_{ex}$	10kHz 2V <sub>pp</sub>

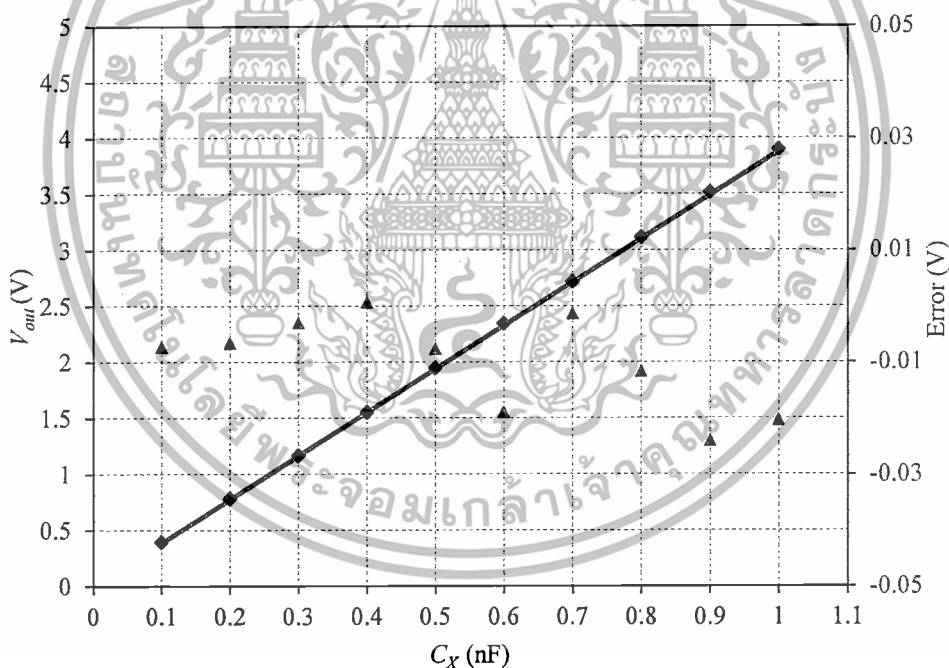
ในการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรงที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบในส่วนของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดก่อน โดยกำหนด  $V_C$  มีขนาด 0V – 5V ซึ่งมีสัญญาณไซน์  $V_{ex}$  ที่เป็นสัญญาณพาหะมีความถี่ที่ 10kHz การทำงานของวงจรเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การทดสอบการทำงานของวงจรตรวจจับแอมพลิจูด

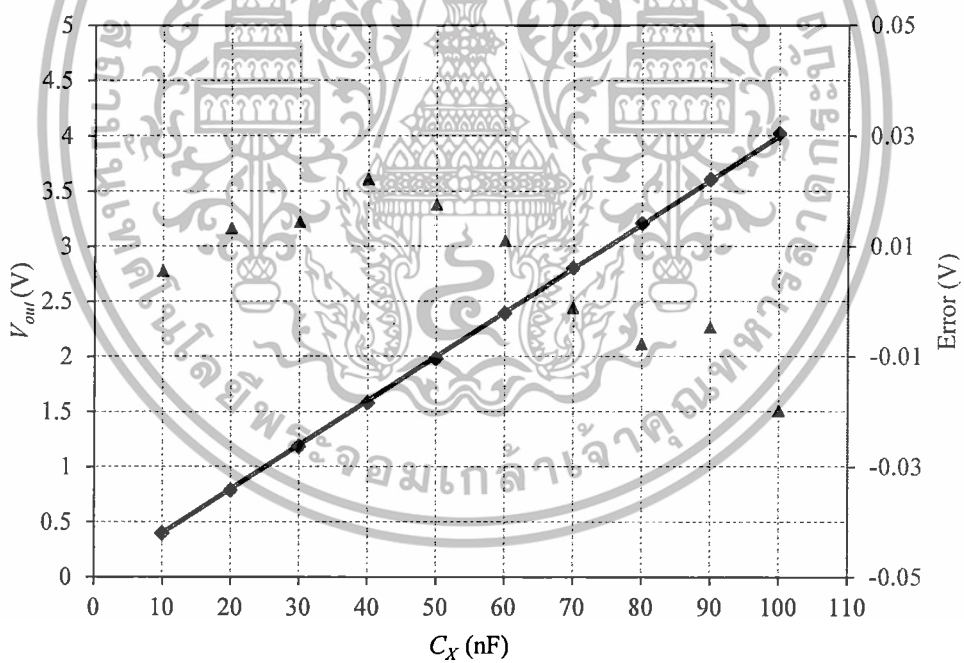
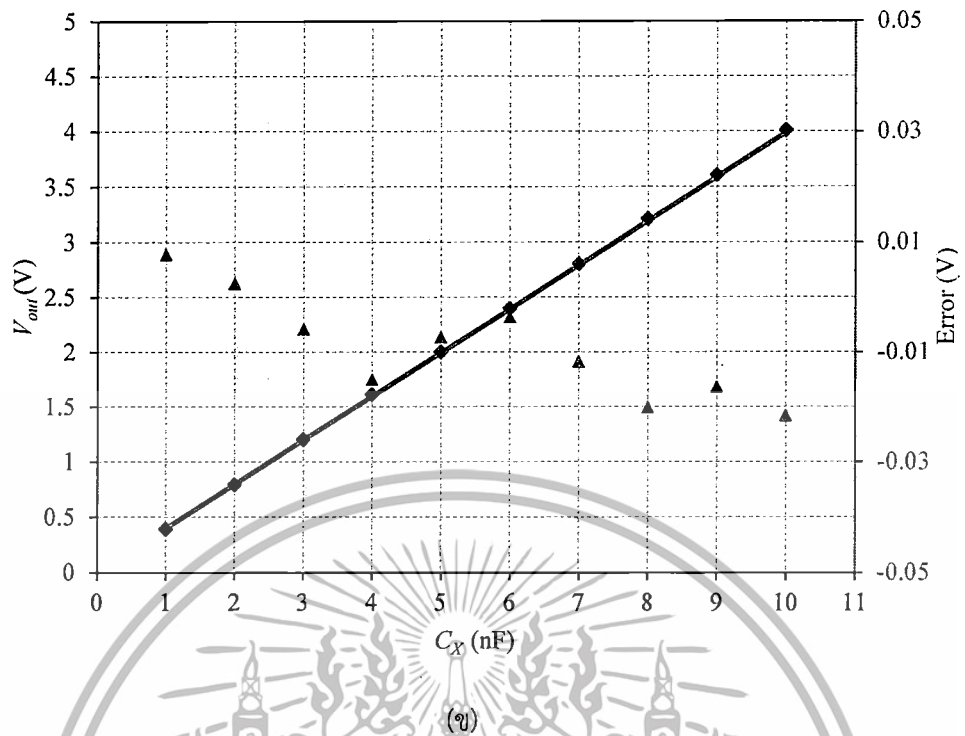
จากรูปที่ 4.7 แรงดัน  $V_C$  คือสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบแอมพลิจูด โดยสัญญาณจะมีสัญญาณพาหะประกอบอยู่ด้วย เมื่อสัญญาณผ่านวงจรตรวจจับแอมพลิจูด จะเห็นว่าการทำงานของวงจรตรวจจับแอมพลิจูดซึ่งใช้วงจรดีมอดูเลตสัญญาณที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี เห็นได้จากสัญญาณ  $V_{out}$  สัญญาณพาหะทั้งหมดถูกตัดไปเหลือเพียงแต่ค่าแอมพลิจูดสูงสุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณเท่านั้น โดยการตั้งค่าขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ของวงจรโมโนสเตเบิลมีลติไวเบเรเตอร์ตัวที่ 1 ให้เท่ากับ  $25 \mu\text{s}$  ซึ่งทำให้ค่าสัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรโมโนสเตเบิลมีลติไวเบเรเตอร์ตัวที่ 2 นั้นอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางของสัญญาณกระตุ้นพอดิ ในการทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จะทำการทดสอบค่าความจุไฟฟ้า  $C_x$  ทั้งหมด 3 ช่วง คือ  $0.1\text{nF} - 1\text{nF}$ ,  $1\text{nF} - 10\text{nF}$  และ  $10\text{nF} - 100\text{nF}$  โดยทำการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าอ้างอิง  $C_f$  ในวงจรตามช่วงที่ทำการทดสอบคือ  $5\text{nF}$ ,  $50\text{nF}$  และ  $500\text{nF}$  ตามลำดับ ผลการทดสอบการทำงานของวงจรจะแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อค่าความจุ  $C_x$  ที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟตรงที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแอมพลิจูดก็เพิ่มขึ้นตามเช่นกัน ค่าที่ได้จากการทดสอบนี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี จะเห็นว่าผลการทดลองจริงมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ทำการคำนวณมากที่สุดน้อยกว่า  $25 \text{ mV}$  และรูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างของกราฟสัญญาณของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง เมื่อทำการทดสอบ  $C_x$  ที่ค่า  $30\text{nF}$ ,  $50\text{nF}$  และ  $70\text{nF}$  โดยใช้  $C_f = 500\text{nF}$  จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  เปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณ  $V_c$



(ก)

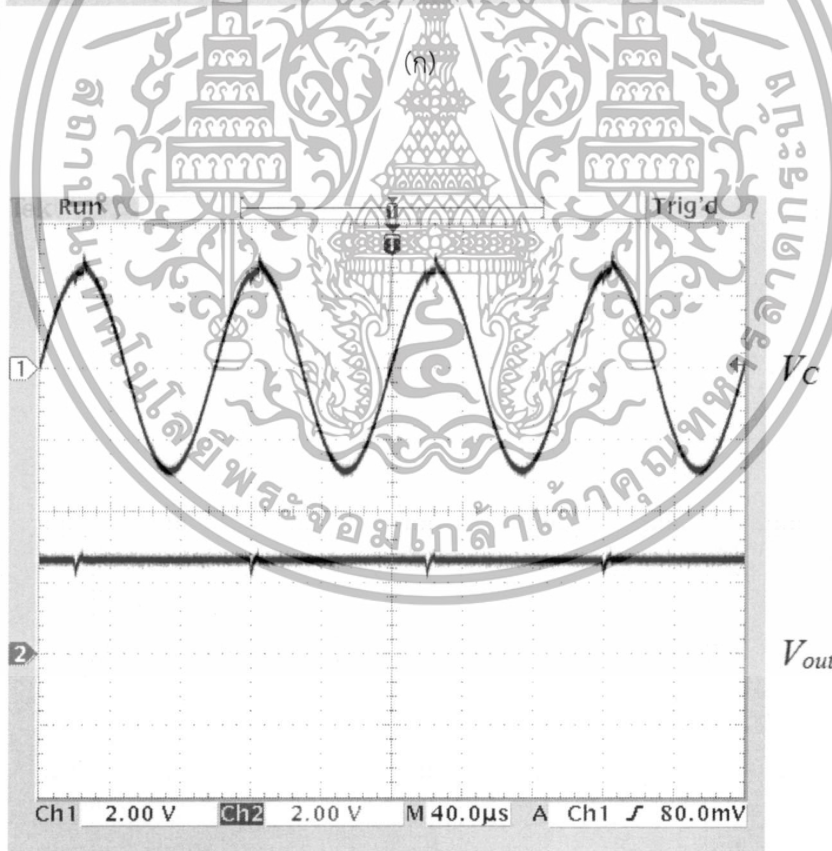
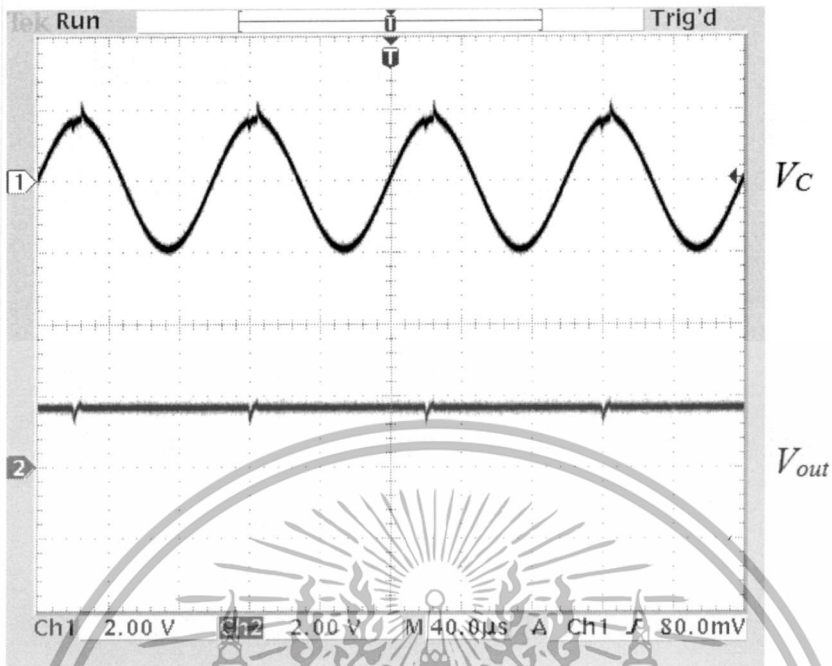
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟตรง

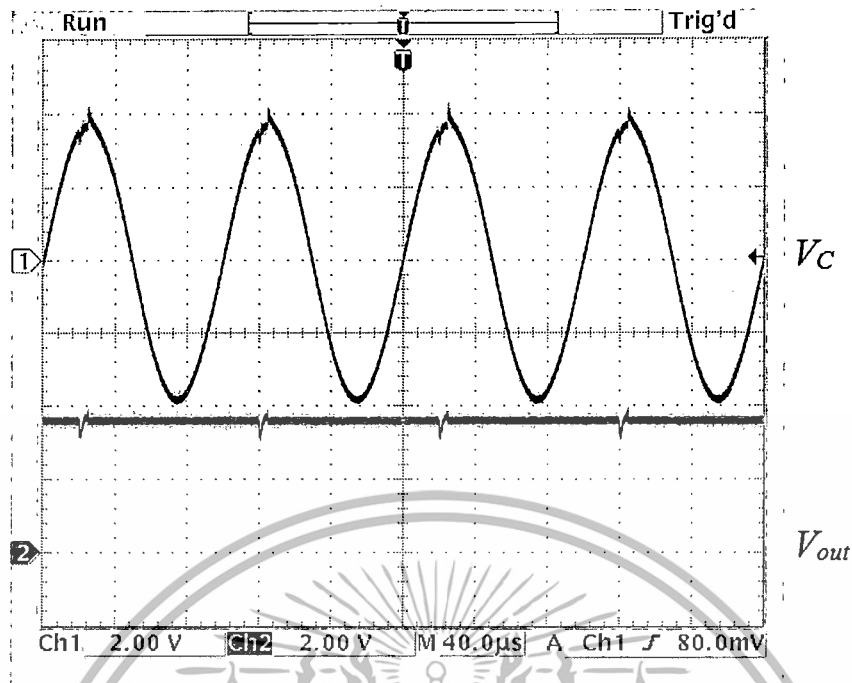
- (ก) ช่วงทดสอบค่า  $C_x$  ที่ 0.1 nF – 1 nF,  $C_f = 5$  nF
- (ข) ช่วงทดสอบค่า  $C_x$  ที่ 1 nF – 10 nF,  $C_f = 50$  nF
- (ค) ช่วงทดสอบค่า  $C_x$  ที่ 10 nF – 100 nF,  $C_f = 500$  nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 4.9 กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้า

(ก) ค่า  $C_x = 30 \text{ nF}$ (ข) ค่า  $C_x = 50 \text{ nF}$ (ค) ค่า  $C_x = 70 \text{ nF}$ 

#### 4.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการนำวงจรดีมอดูเลตสัญญาณไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรอื่น ซึ่งภายในบทนี้ได้นำเสนอการใช้งานร่วมกับวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้า และการนำไปทดสอบด้วยการต่อวงจรจริง ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้ แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่นำมาประยุกต์ใช้งาน มีค่าเป็นเชิงเส้นและเป็นไปในทางเดียวกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งทำให้เห็นว่าวงจรที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรอื่นได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ

### 5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้ทำการวิจัยและพัฒนาวงจรตีมอดูเลตสัญญาณ โดยไม่ใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ โครงสร้างของวงจรประกอบไปด้วยออปแอมป์ซึ่งทำงานในส่วนของการเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรโมนอสเตเบิลมีลติไวเบรเตอร์จำนวนสองวงจรที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ในการควบคุมการทำงาน และวงจรสุ่มและคงค่า วงจรตีมอดูเลตสัญญาณสามารถเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ควบคุมได้จากการปรับแต่งพารามิเตอร์ภายนอกวงจร โดยที่ไม่ต้องยุ่งเกี่ยวกับวงจรภายใน การทำงานของวงจรสามารถให้เอาต์พุตได้หลายค่าโดยใช้วงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าเพียงตัวเดียว อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมดสามารถหาได้ง่ายและมีราคาที่ไม่แพง

สมรรถนะการทำงานของวงจรยืนยันได้ด้วยผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎี และผลทดสอบการทำงานด้วยการต่อวงจรจริง ซึ่งผลการทำงานของวงจรมีความสอดคล้องและเป็นไปในทางเดียวกันกับทฤษฎี

### 5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ

จากวงจรตีมอดูเลตสัญญาณจากรีโซลเวอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังมีประเด็นที่น่าสนใจอันเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาวงจรให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เนื่องจากในส่วนการทำงานของวงจรโมนอสเตเบิลมีลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 1 ภายในวงจรควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่า ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณกระตุ้นที่ผ่านวงจรตรวจตัดผ่านศูนย์ให้มีขนาดเพียงหนึ่งในสี่ของขนาดของสัญญาณกระตุ้น ซึ่งสามารถปรับแต่งค่าจากภายนอกเพื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของพัลส์ เมื่อกำหนดค่าขนาดความกว้างของพัลส์นี้แล้ว จะทำให้วงจรสามารถวัดค่าได้ที่ความถี่ที่กำหนดเท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตที่ต้องการวัด จะต้องปรับขนาดของพัลส์สัญญาณควบคุมใหม่

ดังนั้นแนวทางในการวิจัยต่อที่น่าสนใจคือ การพัฒนาหลักการหรือวงจรอื่นมาแทนในส่วนของโมนอสเตเบิลมีลติไวเบรเตอร์ตัวที่ 1 ที่สามารถแปลงสัญญาณกระตุ้นที่ได้รับให้มีขนาดเพียงหนึ่งในสี่ โดยที่ไม่ต้องกำหนดขนาดความกว้างของพัลส์แต่แรก กล่าวคือหากสัญญาณกระตุ้นมีการเปลี่ยนแปลง การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณก็จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] MOOG Components Group. "Synchro and Resolver Engineering Handbook". [Online]. Available: <http://www.moog.com/literature/MCG/synchrohbook.pdf>. 2015.
- [2] A. Kaewpoonsuk, R. Katman, T. Kamsri, A. Rerhratn and V. Riewruja, "A simple amplitude detector-based demodulator for resolver," 10<sup>th</sup> **International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)**, Kintex, gyeonggi-do, Korea, October 27-30, 2010.
- [3] A. Kaewpoonsuk, R. Katman, A. Rerkratn and V. Riewruja, "Resolver-signal Demodulator Using Phase Shifter", **International Technical Conference on Circuit/Systems, Computers and Communications 2011 (ITC-CSCC)**, Gyeongju, Korea, June 19-22, 2011.
- [4] M. Benammar, L. Ben-Brahim and M. A. Alhamadi, "A High Precision Resolver-to-DC Converter", **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 54, no. 6, pp. 2289–2295, December 2005.
- [5] M. Benammar, L. Ben-Brahim and M. A. Alhamadi, "A Novel Resolver-to-360° Linearized Converter", **IEEE Sensors Journal**, vol. 4, no. 1, pp. 96–101, February 2004.
- [6] L. Ben-Brahim, M. Benammar, M. A. Alhamadi, N. Alemadi and M. Alhitmi, "A New Low Cost Linear Resolver Converter", **IEEE Sensors Journal**, vol. 8, no. 10, pp. 1620-1627, 2008.
- [7] S. Sarma, V. K. Agrawal, and S. Udupa, "Software-Based Resolver-to-Digital Conversion Using a DSP", **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, vol. 55, no. 1, pp. 371–378, January 2008.
- [8] S. Chandra Mohan Reddy and K. Nagabhushan Raju, "Inverse Tangent based Resolver to Digital Converter – A Software Approach," **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, vol. 4, Issue 2, pp. 228-235, 2012.
- [9] L. Ben-Brahim, M. Benammar and M. A. Alhamadi, "A Resolver Angle Estimator Based on Its Excitation Signal", **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, vol. 56, no. 2, pp. 574-580, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] J. O. Krah, H. Schmirgel and M. Albers, “FPGA Based Resolver to Digital Converter Using Delta-Sigma Technology”, **Power Conversion and Intelligent Motion 2006 (PCIM Europe)**, pp. 931-936, 2006.
- [11] D. Jouve and D. Bui, “Influence of the Motor Feedback Sensor on AC Brushless Servo Drive Performances”, **Power Conversion and Intelligent Motion 2003 (PCIM Europe)**, Nurnberg, May 20-22, 2003.
- [12] C. M. R. Sivappagari and N. R. Konduru, “Modified ATO Algorithm based High Accuracy RDC using Pulse Excitation”, **First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems 2014 (ACES)**, Hooghy, India, February 1–2, 2014.
- [13] อนุชา แก้วพูลสุข, “การสังเคราะห์วงจรแปลงสัญญาณรีโซลเวอร์เป็นสัญญาณดีซี” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [14] Larry K. Baxter. 1997. **Capacitive Sensors Design and Applications**. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

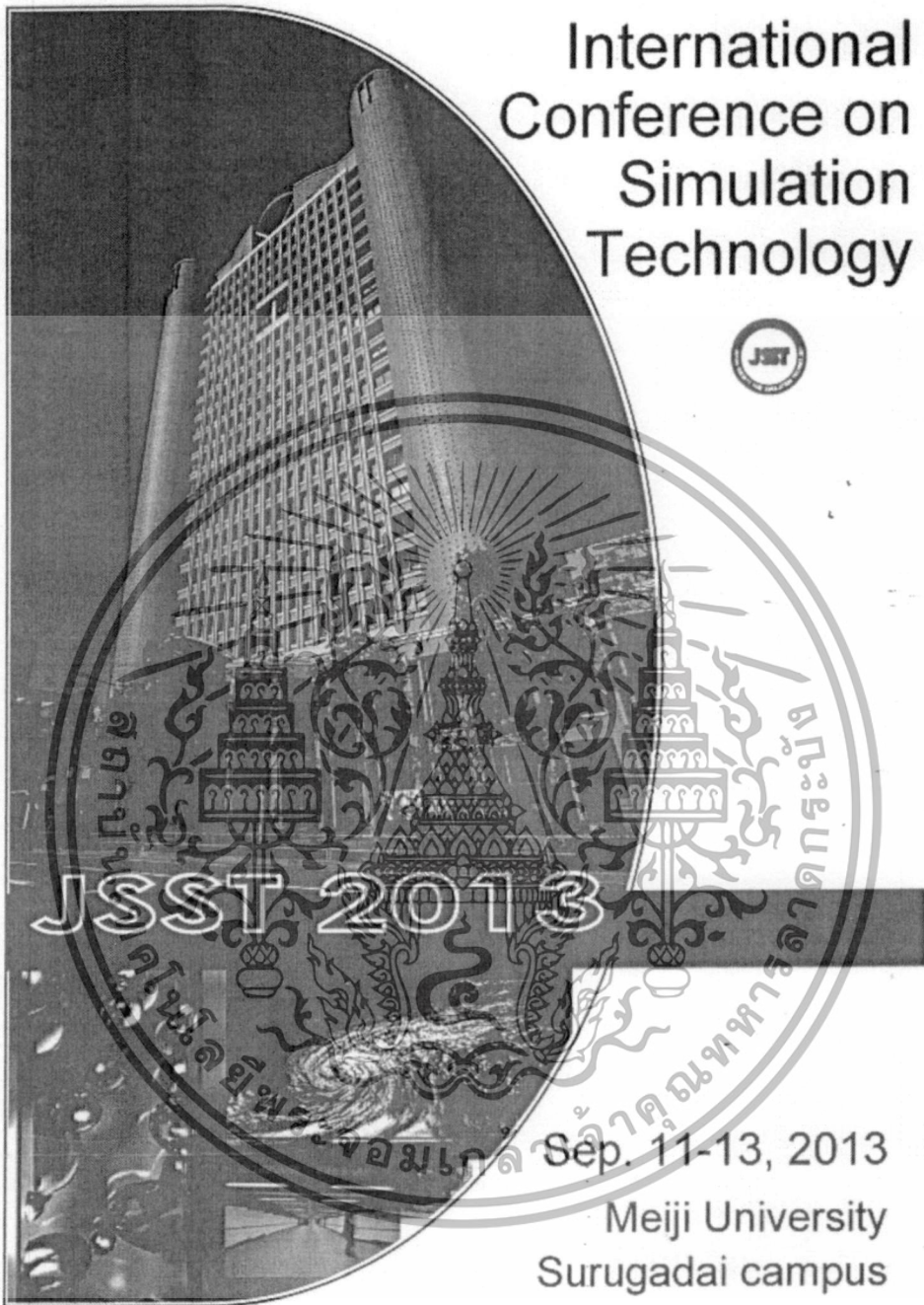
บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารวิชาการและการประชุมวิชาการระดับนานาชาติในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีรายละเอียดดังนี้

- [1] A. Ota, W. Petchmaneelumka, A. Rerkratn and V. Riewruja, "Simple Resolver Demodulation" JSST 2013 International Conference on Simulation Technology, Meiji Univ. Suguradai Campus, Japan, September 11–13, 2013.
- [2] A. Ota, W. Petchmaneelumka, T. Cheypoca, A. Rerkratn and V. Riewruja, "Front-End Interfacing Circuit for Capacitive Sensor", 7<sup>th</sup> International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), pp. 313-316, Chiang Mai, Thailand, October 29–30, 2015.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# International Conference on Simulation Technology



Co-Sponsored by Meiji Institute for Advanced Study of Mathematical Sciences (MIMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายชื่อวารสารและการประชุมวิชาการสำหรับการศึกษาบัณฑิตศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ตามมติที่ประชุมคณะกรรมการประจำสำนักงานวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ ๘/2557 เมื่อวันที่ 18 สิงหาคม พ.ศ. 2557

187. International Workshop Agricultural Engineering and Agro-Products Processing Toward Mechanization and Modernization in Agriculture and Rural Areas	
188. IEEE International Workshop on High Performance Computational Biology (HICOMB) <a href="http://www.hicomb.org/">www.hicomb.org/</a>	
189. International Workshop on ITS Telecommunication (ITST) <a href="http://www.ilcc.com/ITST">www.ilcc.com/ITST</a>	
190. International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV)	
191. Journal of Power Sources	
192. Journal of WSCG	
193. JSST Annual Conference (JSST) International Conference on Modeling and Simulation Technology	
194. Malaysia-Japan International Symposium on Advanced Technology (MJISAT)	
195. MJIT-JUC Joint International Symposium	7/2556
196. Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology (PSIVT) <a href="http://www.psivt.org">www.psivt.org</a>	
197. Photonics Asia	
198. Proceedings of KMUTT International Conference on Science and Applied Science	
199. Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET)	
200. Proceedings The Seventh Triennial AEESEAP Conference	
201. National Computer Science and Engineering Conference (NCSEC) <a href="http://www.mut.ac.th">www.mut.ac.th</a>	
202. Regional Conference on Computer and Information Engineering (RCCIE)	7/2556
203. Regional Conference on Energy Engineering	7/2557
204. Regional Conference on Energy Towards a Clean Environment <a href="http://www.jgsee.kmutt.ac.th">http://www.jgsee.kmutt.ac.th</a>	
205. Regional Symposium on Chemical Engineering	
206. Resource and Energy Economics	
207. Robotics, Vision and Parallel Processing for Industrial Automation (ROVPIA)	
208. Science Asia – The Journal of Science Society of Thailand	
209. Self-Organizing Architectures (SOAR)	
210. Student Conference on Research and Development (SCORED)	
211. SubOptic International Convention	
212. Technical Digest of The Ninth Microoptics Conference	
213. Thai Journal of Agricultural Science	
214. The Asia Pacific International Symposium on Information Technology (APIS)	
215. The Asian Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ASAEM)	
216. The Asian Conference on Remote Sensing & International Symposium on Remote Sensing	
217. The First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control	
218. The IASTED International Conference on Communication Systems (ACIT-CS)	
219. The IASTED International Conference on Energy and Power Systems	
220. The IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)	

\*การศึกษาและวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นรากฐานของการพัฒนาประเทศ

บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

\*\*หมายเหตุ 1. หลักสูตร วศ.บ. ให้อำนาจรับรองเฉพาะ วารสาร ที่มีค่า Impact Factor ของ ISI เท่านั้น  
2. ให้ตรวจสอบรายชื่อวารสาร และค่า Impact Factor ใต้ที่ส่วนบริหารวิชาการและวิจัย

หน้า 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Simple Resolver Demodulation

Akira Ota, Wandee Petchmancelumka, Apinai Rerkratn,  
and Vanchai Riewruja

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

## Abstract

A simple method to demodulate the resolver signal is introduced in this article. The proposed method can provide the demodulated resolver quadrature signals, sine and cosine, without requiring the resolver excitation signal as the carrier signal. Therefore, the phase delay between the stator winding and the rotor winding is avoided. The configuration of this approach consists of commercial available circuit building blocks such as comparator, simple and hold (S/H) and monostable multivibrators. Thus, the proposed approach is obtained to the economical attraction. The operation of the proposed demodulator and its performances are confirmed by simulation and experimental results.

**Keywords** – resolver, demodulation, suppressed carrier, sample and hold

## 1 Introduction

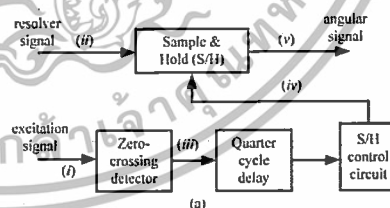
Resolver is an importance transducer in measurement and control systems. Its applications are in the form of angular position measurement such as robot, aircraft, CNC and satellite tracking antenna [1]-[3]. The interesting for using resolver in these applications is due to the fact that resolver provides the benefit in term of high reliability, robustness and maintenance free [4]. The configuration of resolver is a kind of rotary transformer where rotor winding is a primary and two stator windings placed on right angle are secondaries. The resolver operating requires an excitation signal for rotor winding. The output signals from two secondaries are produced by the modulation of excitation signal at primary and the rotor shaft angle. The modulated signals from resolver are results in function of sine and cosine. These output signals are generated in form of amplitude modulated signals with double side-band suppressed carrier. Traditionally, a synchronous demodulator is used to remove the carrier or excitation signal and produce the angular of the rotor shaft. The use of synchronous demodulator requires a low-pass filter, which is phase sensitive device to reject high frequency component. To determine the rotor shaft angular, both output signals of resolver are used [3]-[5]. However, the inaccuracy of the shaft angular readout is due to the mismatch of synchronous demodulators used to detect angular signals from secondaries. In general, a low-pass filter provides phase shift of output signal. Therefore, low-pass filters used for two synchronous demodulators of resolver secondaries must be perfectly matched for high accuracy. Unfortunately, two perfectly matched low-pass filters are improbable for implementation. In addition, the inaccuracy of traditional synchronous demodulator is also disturbed by phase shift between the excitation signal and carrier presented in secondaries of the resolver. This is due to that the synchronous demodulator requires an excitation signal to remove the carrier presented in the secondaries. There are several techniques to demodulate the resolver signals with more accurately results [6], [7]. Nevertheless, these techniques provide large configuration and inconvenience for implementation. In this article, a simple technique to demodulate the resolver signals is presented. The excitation signal is used to provide the time-sequence control signal. Therefore, the inaccuracy due to the phase shift between excitation signal and carries is avoided. The output signals can be produced without low-pass filter. Thus, the phase errors of

the resulting signals from secondaries are eliminated. The proposed resolver demodulator circuit shows the benefits in the terms of small in size, high performance and low cost.

## 2 Circuit description

### 2.1 Principle

Principle of the proposed resolver demodulator is shown in Fig. 1(a). The configuration of proposed principle comprises four-circuit building blocks i.e. sample and hold (S/H) circuit, zero-crossing detector, quarter cycle delay circuit and S/H control circuit. The operation of the principle in Fig. 1(a) can be explained as follow. From Figs. 1(a) and 1(b), zero-crossing detector converts the excitation signal (curve *i*) to square wave (curve *iii*), which is used to generate time sequence for control the operations of each circuit building blocks. The quarter cycle delay circuit delays the obtained square wave signal to one fourth of time period of the excitation signal. The output signal of the quarter cycle delay circuit is sent to S/H control circuit to control the operation mode of S/H (curve *iv*) where logic level "1" means sampling and logic level "0" means hold. The resolver signal (curve *ii*) and S/H control signal (curve *iv*) are simultaneously applied to S/H in Fig. 1(a). The S/H is controlled by S/H control signal to produce demodulation of resolver signal to the angular signal (curve *v*). It can be seen that the proposed technique can detect angular signal from resolver signal without using phase sensitive device that requires in the traditional resolver demodulator.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

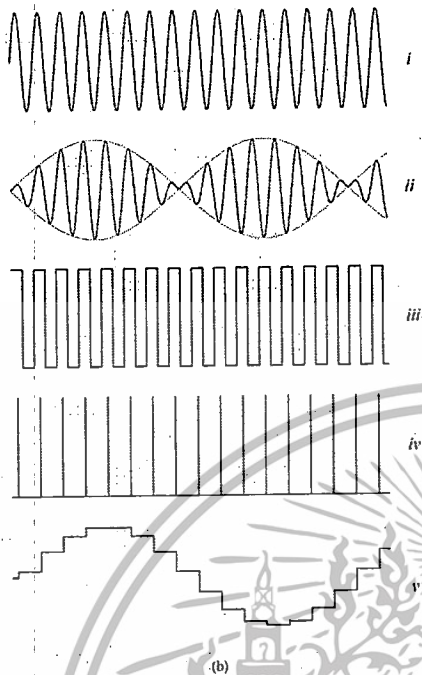


Fig. 1. Proposed resolver demodulation technique.  
 (a) Basic principle  
 (b) Signal waveforms of each point

2.2 Proposed circuit

The proposed technique for Fig. 1(a) is depicted in Fig. 2. All devices used are commercial available components. Therefore, the circuit is easily setting up and low cost. From circuit in Fig. 2, opamp A1 functions a comparator to compare the excitation signal with ground potential. The excitation signal in the form of sinusoidal wave is converted to square waveform with 50% duty cycle. The positive going edge of square wave is passed to trig the monostable multivibrator MN1 to generate a positive single pulse. The pulse width of the output pulse from MN1 is assigned to the quarter of the excitation signal time period. The falling edge of the output pulse from MN1 will transfer to trig the S/H control circuit formed by the monostable multivibrator MN2 to provide sample signal for S/H. The time period of sample signal is set to minimum time requirement for ability of sampling to hold of S/H. Consequently, the S/H will sample the resolver signal at the peak amplitude of carrier signal and hold. The angular signal or demodulation signal is occurred in the hold stage. It should be noted that the operation of the circuit in Fig. 2 is agreed with the proposed principle in Fig. 1.

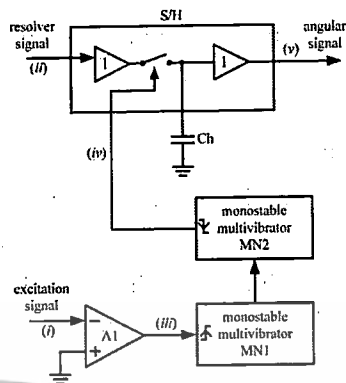


Fig. 2. Block diagram of the proposed resolver demodulation.

3 Simulation and experimental results

To demonstrate the principle of Fig. 1(a), MATLAB SIMULINK program was used. The results of each stage can be shown in Fig. 3.

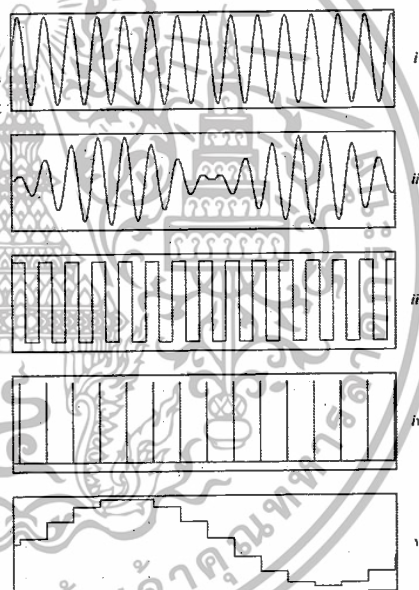


Fig. 3. Simulation results from MATLAB.

The performance of the proposed circuit in Fig. 2 was confirmed by experimental implementation. All devices used in the proposed circuit are commercially available. The devices of LF398, LM339 and CD4528 are used as S/H, comparator and monostable multivibrator, respectively. The excitation signal was set to 3 kHz sinusoidal wave with  $5V_{pp}$ . The resolver signal is provided from SANYO DENKI 101-4100 resolver. The pulse width of the monostable multivibrator MN1 is set to quarter of the excitation signal time period as  $83\mu s$ . The S/H control pulse width is assigned to  $5\mu s$  for S/H (LF398). The sequential curves from excitation signal to S/H control signal are shown in Fig. 4(a). It can be seen that the output curves of each building block are similar to the curves in Fig. 1(b). The resolver was driven to the speed of 1,800 rpm. The resolver signal was applied to the input of S/H. The results of the angular signal of resolver are shown in Fig. 4(b). In addition, the sine and cosine signals of resolver can also be achieved by including another S/H as shown in Fig. 5(a). Fig. 5(b) shows two demodulated signals obtained from secondaries of resolver.

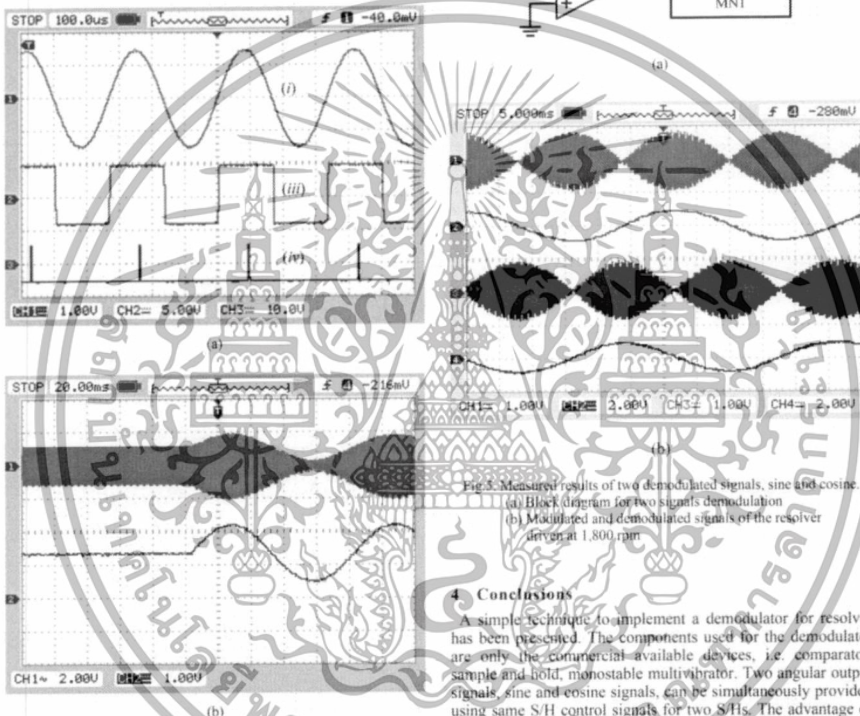
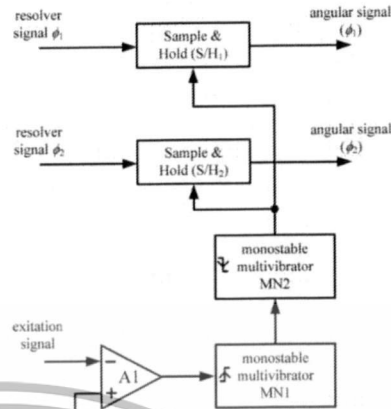


Fig. 4. Measured results of the proposed demodulation.  
 (a) Signals of each building block  
 (b) The obtained angular signal from resolver

4. Conclusions

A simple technique to implement a demodulator for resolver has been presented. The components used for the demodulator are only the commercial available devices, i.e. comparator, sample and hold, monostable multivibrator. Two angular output signals, sine and cosine signals, can be simultaneously provided using same S/H control signals for two S/Hs. The advantage of the proposed demodulator is that the phase sensitive devices are without requirement. Simulation and experimental results demonstrated the circuit performances are included.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## References

- [1] A. Kaewpoonsuk, R. Katman, A. Rehhratn and V. Riewruja, "Resolver-signal demodulator using phase shifter," ITC-CSCC 2011, Gyeongju, Korea, June 19-22, 2011
- [2] A. Kaewpoonsuk, R. Katman, T. Kumsri, A. Rehhratn and V. Riewruja, "A simple amplitude detector-based demodulator for resolver," ICCAS 2010, Kintex, gyeonggi-do, Korea, Oct. 27-30, 2010
- [3] L. Ben-Brahim, M. Benammar, M. A. Alhamadi, N. Alemadi and M. Alhitmi, "A new low cost linear resolver converter," IEEE Sensors J., vol. 8, no. 10, pp. 1620-1627, 2008
- [4] S. Chandra Mohan Reddy and K. Nagabhushan Raju, "Inverse tangent based resolver to digital converter – a software approach," International Journal of Advances in Engineering & Technology, vol. 4, Issue 2, pp. 228-235, 2012
- [5] L. Ben-Brahim, M. Benammar and M. A. Alhamadi, "A resolver angle estimator based on its excitation signal," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 2, pp. 574-580, 2009
- [6] J. O. Kraih, H. Schmirgel and M. Albers, "FPGA based resolver to digital converter using delta-sigma technology," PCIM EUROPE 2006, pp. 931-936, 2006
- [7] D. Jouve and D. Bui, "Influence of the motor feedback sensor on ac brushless servo drive performances," PCIM 2003, Nurnberg, May 20-22, 2003



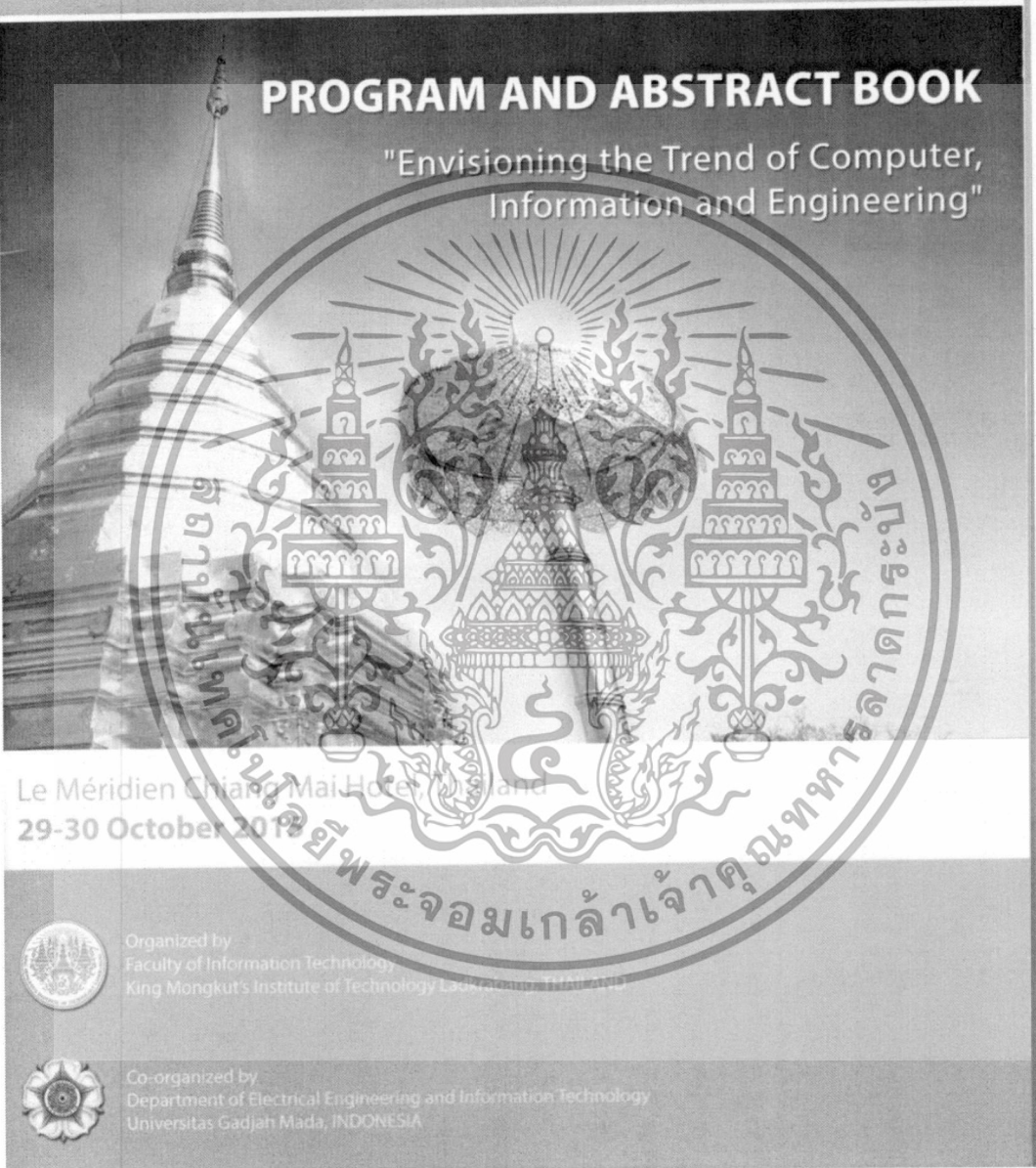
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ICITEE2015

The 7<sup>th</sup> International Conference on  
 Information Technology and Electrical Engineering

## PROGRAM AND ABSTRACT BOOK

"Envisioning the Trend of Computer,  
 Information and Engineering"



Le Méridien Chiang Mai Hotel Thailand  
 29-30 October 2015



Organized by  
 Faculty of Information Technology  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, THAILAND



Co-organized by  
 Department of Electrical Engineering and Information Technology  
 Universitas Gadjah Mada, INDONESIA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Front-End Interfacing Circuit for Capacitive Sensor

Akira Ota, Wandee Petchmaneelumka, Thepjit Cheypoca,

Apinai Rerkratn, and Vanchai Riewruja

Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, KMITL

Bangkok, Thailand

ota3000@hotmail.com, {kpwandee, kethepji, krapinai and kvanchai}@kmitl.ac.th

**Abstract**—This paper presents an interfacing circuit for capacitive sensor using charge amplifier formed a capacitance-to-voltage converter. The proposed circuit is suitable for the front-end analog-to-digital converter (ADC) and wide variable range of sensing capacitance. The achieved output voltage provides a linear transfer characteristic and fast response. The circuit configuration is implemented using only commercially available devices. The performances of proposed circuit are confirmed by experimental results.

**Keywords**—capacitive sensor; interfacing circuit; capacitance-to-voltage converter; sample-and-hold circuit

## I. INTRODUCTION

The detection of physical quantities using capacitance property is widely applied in industrial process control, measurement and instrumentation systems. The capacitance variation of capacitive sensor is depended on the change of physical quantities such as displacement, pressure, weight, humidity, flow and liquid level [1-4]. The achieved capacitance from capacitive sensor converted to electrical signal can be found in many techniques [2, 5-10]. The method for converting capacitance to frequency or interval time has been proposed in literature [6-9]. Unfortunately, the specific circuit building blocks are required for these approaches. The circuit design technique to interface capacitive sensor based on the use of capacitance-to-voltage converter has been introduced [2, 5, 10]. Two earlier approaches [2, 5] are suitable in the term of integrated circuit. Therefore, an inconvenient will occur during implementing of these approaches. Interfacing circuit design for capacitive sensor using commercial available devices has been introduced [10]. This approach is suitable for being the front end circuit of ADC due to the obtained output of this technique as the sample-and-hold signal. The charge amplifier and amplitude detector is employed for this technique. Nevertheless, detecting the voltage amplitude from charge amplifier requires twice of the period of the sinusoidal excitation signal. Therefore, time response to varying capacitance of this approach is quite low. If detecting time is reduced, the response time will be faster. The aim of this paper is to propose the interfacing circuit, which improves the response of the literature [10], for capacitive sensor. The proposed scheme is suitable as the front end circuit of ADC. Detecting time for capacitance change is used only a period of sinusoidal excitation signal. The circuit configuration implements using only commercial available devices.

Experimental results showing the performance of proposed converter are also included.

## II. CIRCUIT DESCRIPTION

Block diagram of the proposed technique to realize interfacing circuit for capacitive sensor is shown in Fig. 1. The configuration of proposed converter comprises of capacitance-to-voltage converter function from charge amplifier and amplitude detector based on sample-and-hold circuit. The amplitude of voltage  $V_C$  is depended on the capacitance  $C_X$  from sensor. Then amplitude detector is used to find out the voltage amplitude  $V_C$  which is the output signal of proposed interfacing circuit.

### A. Capacitance-to-Voltage Converter

Capacitance-to-voltage converter in Fig. 1 is based on the use of charge amplifier as shown in Fig. 2. Operational amplifier (opamp)  $A_1$ , resistor  $R_f$ , and capacitors  $C_X$  and  $C_f$  function the charge detector. The voltage  $V_{in}$  with sinusoidal waveform is the excitation signal applied into charge detector. Thus, the relation between voltage  $V_{in}$  and output voltage  $V_1$  of charge detector can be given by

$$V_1 = -\frac{j\omega C_X R_f}{j\omega C_f R_f + 1} V_{in} \quad (1)$$

where  $\omega$  denotes the angular frequency of the excitation voltage generated from sinusoidal signal generator.  $C_X$  defines the sensing capacitance from capacitive sensor.

It can be seen that the output voltage of charge detector  $V_1$  is in form of sinusoidal wave with amplitude depending on the value of capacitance  $C_X$ . Due to the voltage  $V_1$  is quite small, the voltage amplifier formed by opamp  $A_2$  and resistors  $R_1$  and  $R_2$  is employed to gain for the suitable voltage. Thus the output voltage  $V_C$  of capacitance-to-voltage converter can be expressed as

$$V_C = \frac{R_2}{R_1} \left( \frac{j\omega C_X R_f}{j\omega C_f R_f + 1} \right) V_{in} \quad (2)$$

If  $j\omega C_f R_f \gg 1$  is set, then the voltage  $V_C$  can be approximated as

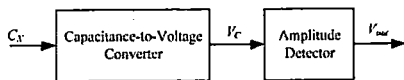


Fig. 1. Block diagram of the proposed interfacing circuit technique.

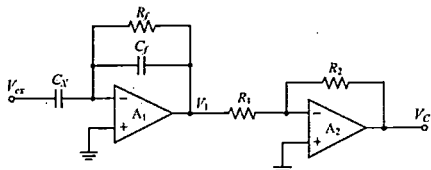


Fig. 2. Capacitance-to-voltage converter based on charge amplifier.

$$V_c = \frac{R_2 C_x}{R_1 C_f} V_{ex} \quad (3)$$

From (3), it is clearly seen that the amplitude of voltage  $V_c$  depends on the capacitance  $C_x$  while resistors  $R_1$  and  $R_2$ , capacitor  $C_f$  and voltage  $V_{ex}$  are fixed. Then the voltage  $V_c$  is transferred to amplitude detector to remove sinusoidal signal and produce the dc voltage related to the sensing capacitance  $C_x$ .

**B. Amplitude Detector**

The configuration of amplitude detector used [14] consists of sample-and-hold circuit S/H, two monostable multivibrators  $MN_1 - MN_2$  and comparator  $CP_1$ , as shown in Fig. 3. The voltage  $V_c$  with amplitude related the capacitance  $C_x$  and existing excitation signal  $V_{ex}$  in form of sinusoidal wave is applied into S/H controlled by S/H control signal  $V_3$  to produce the output voltage  $V_{out}$  of proposed interfacing circuit. Comparator  $CP_1$  is used to compare the sinusoidal excitation signal  $V_{ex}$  with ground potential for generating the square wave  $V_2$  with 50% duty cycle. The rising edge of square wave signal  $V_2$  is exploited to trig  $MN_1$  for produce the positive single pulse. The pulse width of obtained output signal from  $MN_1$  is one-fourth of excitation time period. The falling edge of single pulse is used to trig  $MN_2$  for generating the S/H control signal  $V_3$  for hold the peak amplitude of excitation signal. The dc voltage  $V_{out}$  related capacitance  $C_x$  is obtained at the output of S/H. The operating waveform sketches of each node ( $V_{ex}$ ,  $V_c$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  and  $V_{out}$ ) in Fig. 3 are shown in Fig. 4. It should be noted that the output voltage  $V_{out}$  of the proposed converter relating with the value of capacitance  $C_x$  from sensor.

**III. EXPERIMENTAL RESULTS**

To verify the proposed principle, the converter including charge amplifier in Fig. 2 and amplitude detector in Fig. 3 was experimentally implemented using commercial available devices and circuit parameters as summarized in Table 1 and Table 2, respectively. Voltage gain of  $A_2$  was set to 20 times. The performance of amplitude detector is shown in Fig. 5 where  $V_c$  and  $V_{ex}$  are 10kHz sinusoidal with amplitude varied

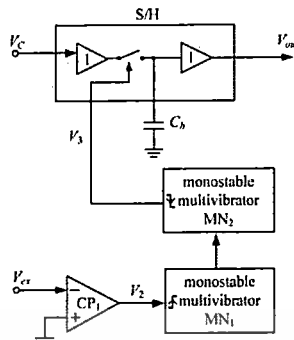


Fig. 3. Amplitude detector.

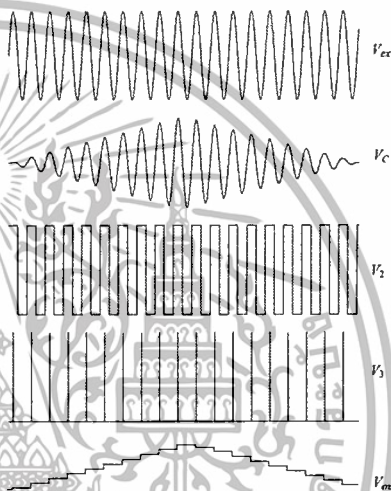


Fig. 4. Operating waveform sketches of each point in Fig. 3.

0V to 5V<sub>pp</sub> and 2V<sub>pp</sub> amplitude of 10kHz sinusoidal signal, respectively. From Fig. 5, the upper and lower traces demonstrate voltage  $V_c$  and output voltage  $V_{out}$  of amplitude detector, respectively. It can be seen that amplitude detector used in this paper spend a period of excitation signal for detecting time of capacitance  $C_x$  change. From (2), Capacitances  $C_f = 0.0005\mu F$ ,  $0.005\mu F$  and  $0.05\mu F$  were selected for suitable range of capacitance  $C_x$  from sensor. The 10kHz sinusoidal excitation signal  $V_{ex}$  of 2V<sub>pp</sub> amplitude was applied into the circuit. Figs. 6(a) – 6(c) demonstrate the plots of output voltage  $V_{out}$  against sensing capacitance  $C_x$  varied in ranges of 0.1nF – 1nF, 1nF – 10nF and 10nF – 100nF, respectively.

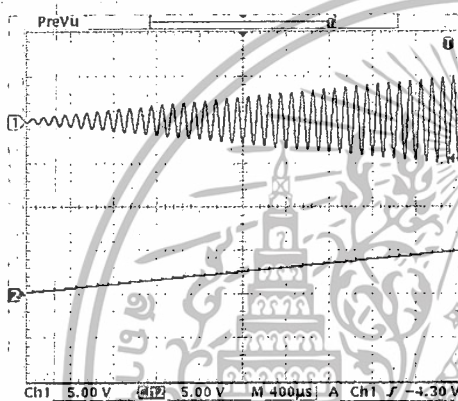
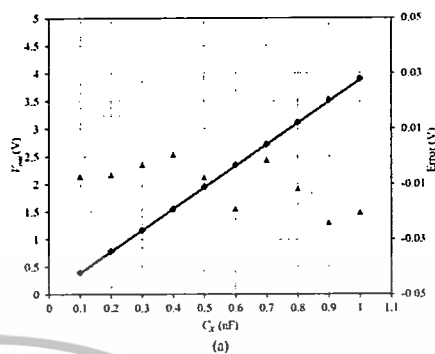
TABLE I. DEVICES USED FOR IMPLEMENTATION OF THE PROPOSED INTERFACING CIRCUIT

Device	Part Number
Opamp ( $A_1 - A_2$ )	LF351
Sample and hold (S/H)	LF398
Comparator ( $CP_1$ )	LM339
Monostable multivibrator ( $MN_1 - MN_2$ )	CD4528

TABLE II. PARAMETERS SET FOR IMPLEMENTATION OF THE PROPOSED INTERFACING CIRCUIT

Parameter	Value
$V_{DD} - V_{SS}$	7.5V
$R_f$	100k $\Omega$
$R_1$	15k $\Omega$
$R_2$	300k $\Omega$

signal. Experimental results verifying the performance of the proposed circuit are agreed with the expected values.

Fig.5. Measured signals ( $V_c$  and  $V_{out}$ ) of amplitude detector.

The error of obtained output voltage  $V_{out}$  from the expected value is also illustrated in Fig. 6. It should be noted that the worst-case error is less than 25mV. It is evident that the proposed interfacing circuit can convert correctly the capacitance from capacitive sensor to dc voltage. Moreover, response time of this proposed scheme can be reduced to 50% from the literature [10].

#### IV. CONCLUSION

Interfacing circuit for capacitive sensor has been introduced in this paper. The proposed circuit using only commercial devices provides simple configuration and low cost. The obtained output voltage is proportional to the sensing capacitance. The response time to the change of sensing capacitance from sensor is used only a period of the excitation

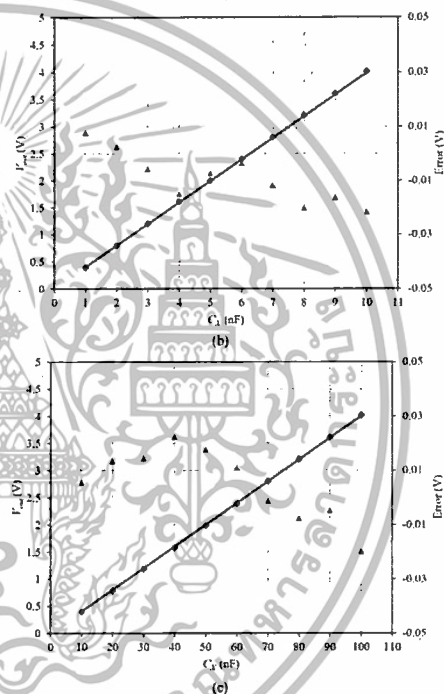


Fig.6. Plots of the output voltage versus varied sensing capacitance  $C_x$   
 (a) 0.1nF - 1nF range  
 (b) 1nF - 10nF range  
 (c) 10nF - 100nF range.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the support by a grant No. KREF115701 from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang of Thailand.

## REFERENCES

- [1] W.C. Heerens, 1986, Application of capacitance techniques in sensor design, *Phys. E: Sci. Instrum.*, 19, 897-906.
- [2] Shao Lichun, Moorthi Palaniapan, and Tan Woei Wan, 2006, A continuous-time capacitance to voltage converter for microcapacitive pressure sensors, *Journal of Physics: Conference Series*, 34, 1014-1019.
- [3] Ferran Reverter, Xijun Li, and Gerard C.M. Meijer, 2007, Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, 138 (1), 1-8.
- [4] N.B. Yusof, N. Soin, and S.Z. Md. Dawal, 2009, Capacitive interfacing for MEMS humidity and accelerometer sensors, *2009 International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS)*, 82-86.
- [5] Shuyu Lei, Christian A. Zoman, and Steven L. Garverick, 2005, An oversampled capacitance-to-voltage converter IC with application to time-domain characterization of MEMS resonators, *IEEE Sensors Journal*, 5 (6), 1353-1361.
- [6] C.T. Chiang, C.S. Wang, and Y.C. Huang, 2007, A CMOS integrated capacitance-to-frequency converter with digital compensation circuit designed for sensor interface applications, *IEEE Sensors 2007 Conference*, 954-957.
- [7] Yucui Wang and Chodavarapu, V.P., 2013, Design of CMOS capacitance to frequency converter for high-temperature MEMS sensors, *IEEE sensors 2013 Conference*, 1-4.
- [8] Paolo B., Nicolo N. and Massimo P., 2007, A Current-Mode, Dual Slope, Integrated Capacitance-to-Pulse Duration Converter, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 42 (9), 1884-1891.
- [9] Julia H.L.L., Mac I., Sanghoon J., Jong K.K. and Byunghoo J., 2011, A Low-Power, Wide-Dynamic-Range Semi-Digital Universal Sensor Readout Circuit Using Pulsewidth Modulation, *IEEE sensors Journal*, 11 (5), 1134-1144.
- [10] J. Khogaphirak, T. Cheypoca, W. Petchmaneeumka, A. Rerkraat and V. Riewruja "Small capacitance to dc converter for capacitive sensor" *International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2010)*, Pattaya, Thailand, pp. 863-866, July 4-7, 2010.
- [11] A. Ota, W. Petchmaneeumka, A. Rerkraat, and Vanchai Riewruja, "Simple Resolver Demodulation" *JSSIT 2013*, Tokyo, Japan, Sep. 11-13, 2013.



## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ – นามสกุล นายอศิระ โอตะ
- วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 15 พฤศจิกายน 2532
- ที่อยู่ 3/107 หมู่ 6 ซอยรามคำแหง 184 ถนนรามคำแหง มีนบุรี กรุงเทพฯ 10510
- ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ – เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรม จากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2554 และในปีการศึกษา 2555 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้