

การควบคุมขนาดสัญญาณของวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณจดีนรูปไซน์  
โดยอาศัยผลตอบสนองเชิงบังคับ

SINUSOIDAL OSCILLATOR AMPLITUDE CONTROLLED  
BY FORCE RESPONSE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-700-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมขนาดสัญญาณของวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์  
โดยอาศัยผลตอบสนองเชิงบังคับ

SINUSOIDAL OSCILLATOR AMPLITUDE CONTROLLED  
BY FORCE RESPONSE



ปานวิทย์ ฐะหุติ  
PANWIT TUWANUT

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 47615  
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2548

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-700-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SINUSOIDAL OSCILLATOR AMPLITUDE CONTROLLED  
BY FORCE RESPONSE**



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

**2003**

**ISBN 974-324-700-9**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมขนาดสัญญาณของวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยอาศัยผลตอบสนองเชิงบังคับ
นักศึกษา	นาย ปานวิทย์ ชูระนุติ
รหัสประจำตัว	42061086
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.วิภา แสงพิสิทธิ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอวิธีการควบคุมขนาดสัญญาณ ของวงจรไขนุชอยคอด ออสซิลเลเตอร์ โดยใช้ผลตอบสนองเชิงบังคับ ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะอาศัยการป้อนสัญญาณไฟตรง เข้ากับวงจร ในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดผลตอบสนองเชิงบังคับ จึงทำให้ วงจรกำเนิดสัญญาณไขนุชอยคอดดังกล่าว มีทั้ง ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ รวมกัน ดังนั้น การควบคุมขนาดของสัญญาณไขนุชอยคอด จึงสามารถทำได้โดยการควบคุมสัญญาณไฟตรง ดังกล่าว

นอกจากนี้แล้ว จากหลักการดังกล่าว จะไม่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขของการ การออสซิลเลต และ ความถี่ที่ออสซิลเลต โดยผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีและ การทดลองให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

<b>Thesis Title</b>	Sinusoidal oscillator amplitude controlled by force response
<b>Student</b>	Mr. Panwit Tuwanut
<b>Student ID</b>	42061086
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2003
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Pramote Wadkien
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assist.Prof. Wipa Sangpisit

### ABSTRACT

This thesis presents the method of amplitude control of sinusoidal oscillator by force response. This proposed method, the dc voltage is fed into suitable position. The result of this technique, oscillator circuits have both natural response and force response, so the sinusoidal signal's amplitude is controlled by the dc voltage.

In addition, the proposed method is independent to condition of oscillation and frequency of oscillation. The theoretical result and experimental result are agreed.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน เป็นอย่างสูง ที่ท่านได้ ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ให้แก่ศิษย์ ด้วยความรักและความบริสุทธิ์ใจ โดยมีได้หวังสิ่งใดตอบแทน ตลอดจนให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยแก้ปัญหาต่างๆ โดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ และผู้เขียนยังได้รับความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภา แสงพิสิทธิ์ ซึ่งเป็นอีกท่านหนึ่ง ที่ได้คอยให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบเท้าขอบคุณพระคุณบิดา มารดา ที่ได้คอยเป็นกำลังใจ ให้ความรัก ความอบอุ่น และให้การสนับสนุนต่อผู้เขียนในทุกๆ ด้านโดยสม่ำเสมอโดยตลอด และขอขอบคุณทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้

ปานวิทย์ ฐะนุติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและ วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	1
1.4 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์.....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 สมการอนุพันธ์.....	3
2.3 การวิเคราะห์ระบบเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยอาศัยสมการอนุพันธ์.....	5
2.3.1 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง.....	8
2.3.2 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง ที่มีผลเนื่องจากสัญญาณอินพุต.....	10
2.3.3 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สาม.....	13
2.3.4 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สาม ที่มีผลเนื่องจากสัญญาณอินพุต.....	17
2.4 สรุป.....	23
บทที่ 3 การวิเคราะห์ วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์.....	24
3.1 กล่าวนำ.....	24
3.2 วงจรเวเนบรีคจ์ออสซิลเลเตอร์.....	24
3.3 วงจรควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

3.4 วงจรเฟสชิพท์ออสซิลเลเตอร์.....	37
3.5 วงจรควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส.....	46
3.6 วงจรโคลพิคต์ออสซิลเลเตอร์โดยใช้ เจเพท.....	52
3.7 สรุป.....	60
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง การควบคุมขนาดสัญญาณ ของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์.....</b>	<b>61</b>
4.1 กล่าวนำ.....	61
4.2 การเขียนแบบการทำงานของวงจร โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	61
4.2.1 ผลการเขียนแบบ วงจรเวเนบริคจ์ ออสซิลเลเตอร์.....	61
4.2.2 ผลการเขียนแบบ วงจรควอทคราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์.....	64
4.2.3 ผลการเขียนแบบ วงจรเฟสชิพท์ออสซิลเลเตอร์.....	66
4.2.4 ผลการเขียนแบบ วงจรควอทคราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส.....	69
4.3 การทดลองโดยการต่อวงจรจริง.....	71
4.3.1 ผลการทดลอง วงจรเวเนบริคจ์ ออสซิลเลเตอร์.....	71
4.3.2 ผลการทดลอง วงจรควอทคราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์.....	73
4.2.3 ผลการทดลอง วงจรเฟสชิพท์ ออสซิลเลเตอร์.....	74
4.3.4 ผลการทดลอง วงจรควอทคราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส.....	75
4.4 ผลการเขียนแบบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณขั้นบันได และ สัญญาณฟันเลื่อย.....	76
4.4.1 ผลการเขียนแบบ วงจรเวเนบริคจ์ออสซิลเลเตอร์.....	76
4.4.2 ผลการเขียนแบบ วงจรควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์.....	78
4.5 ผลการเขียนแบบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่.....	80
4.5.1 ผลการเขียนแบบ วงจรเวเนบริคจ์ออสซิลเลเตอร์.....	80
4.4 เปรียบเทียบ ผลการทดลองการเขียนแบบการทำงานของวงจร โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ , ผลการทดลองการต่อวงจรจริง และ ผลจากทางทฤษฎี.....	81
4.4.1 วงจรเวเนบริคจ์ออสซิลเลเตอร์.....	81
4.4.2 วงจรควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์.....	82
4.4.3 วงจรเฟสชิพท์ออสซิลเลเตอร์.....	82
4.4.4 วงจรควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ในโหมดกระแส.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

4.5 สรุป.....	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	85
เอกสารอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก.....	88
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และในระหว่างที่ทำการศึกษา ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	94



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางการคาดเดารูปแบบ $g(t)$ จากลักษณะของ $f(t)$ .....	5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนผังของระบบ.....	3
2.2 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง.....	5
2.3 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง ที่มีผลเนื่องมาจากสัญญาณอินพุต.....	8
2.4 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สาม.....	13
2.5 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สาม ที่มีผลเนื่องมาจากสัญญาณอินพุต.....	17
3.1 วงจร เวนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์.....	24
3.2 วงจรควอทราจอร์ออสซิลเลเตอร์.....	31
3.3 วงจรเฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์.....	37
3.4 วงจรควอทราจอร์ออสซิลเลเตอร์ในโหมดกระแส.....	46
3.5 วงจรโคลพิทท์ ออสซิลเลเตอร์ โดยใช้ เจเฟด.....	52
3.6 วงจรสมมูลทาง AC ของวงจรโคลพิทท์ ออสซิลเลเตอร์ โดยใช้ เจเฟด.....	53
4.1 วงจรเวนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ ที่ทำการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE.....	61
4.2 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.1 เมื่อสัญญาณอินพุต มีค่าบวก.....	62
4.3 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.1 ที่ ตำแหน่ง $V_{out1}$ .....	62
4.4 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.1 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าลบ.....	63
4.5 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.1 ที่ ตำแหน่ง $V_{out1}$ .....	63
4.6 วงจรควอทราจอร์ออสซิลเลเตอร์ ที่ทำการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE.....	64
4.7 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.6 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าบวก.....	64
4.8 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.6 ที่ ตำแหน่ง $V_{out1}$ .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.9 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.6 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าลบ.....	65
4.10 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.6 ที่ ตำแหน่ง $V_{out1}$ .....	66
4.11 วงจรเฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์ ที่ทำการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE.....	66
4.12 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.11 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าบวก.....	67
4.13 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.11 ที่ ตำแหน่ง $V_{out1}$ .....	67
4.14 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.11 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าลบ.....	68
4.15 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.11 ที่ ตำแหน่ง $V_{out1}$ .....	68
4.16 วงจรควอดราราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส ที่ทำการเขียนแบบ โดยโปรแกรม PSPICE.....	69
4.17 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.16 เมื่อกระแสอินพุตมีค่าบวก.....	69
4.18 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.16 ที่ตำแหน่ง $I_{O1}$ .....	70
4.19 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.16 เมื่อกระแสอินพุตมีค่าลบ.....	70
4.20 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.16 ที่ตำแหน่ง $I_{O1}$ .....	71
4.21 สัญญาณเอาท์พุท เมื่อป้อนสัญญาณอินพุท เป็น ไฟตรงมีค่า 0 โวลท์.....	72

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.22 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงบวก ก. ป้อนค่า 2 โวลต์ ข. ป้อนค่า 4 โวลต์ .....	72
4.23 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงลบ ก. ป้อนค่า -2 โวลต์ ข. ป้อนค่า -4 โวลต์ .....	72
4.24 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงมีค่า 0 โวลต์.....	73
4.25 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงบวก ก. ป้อนค่า 4 โวลต์ ข. ป้อนค่า 8 โวลต์ .....	73
4.26 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงลบ ก. ป้อนค่า -4 โวลต์ ข. ป้อนค่า -8 โวลต์ .....	73
4.27 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงมีค่า 0 โวลต์.....	74
4.28 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงบวก ก. ป้อนค่า 4 โวลต์ ข. ป้อนค่า 8 โวลต์ .....	74
4.29 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงลบ ก. ป้อนค่า -4 โวลต์ ข. ป้อนค่า -8 โวลต์ .....	74
4.30 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นกระแสไฟตรงมีค่า 0 มิลลิแอมป์.....	75
4.31 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นกระแสไฟตรงบวก ก. ป้อนค่า 1.5 มิลลิแอมป์ ข. ป้อนค่า 2.5 มิลลิแอมป์.....	75
4.32 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นกระแสไฟตรงลบ ก. ป้อนค่า -1 มิลลิแอมป์ ข. ป้อนค่า -2 มิลลิแอมป์.....	75
4.33 สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณขั้นบันได.....	76
4.34 สัญญาณเอาต์พุต ที่ปราศจากผลของไฟตรง เทียบกับสัญญาณอินพุต .....	76
4.35 สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณฟันเลื่อย.....	77
4.36 สัญญาณเอาต์พุต ที่ปราศจากผลของไฟตรง เทียบกับสัญญาณอินพุต.....	77
4.37 สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณขั้นบันได.....	78
4.38 สัญญาณเอาต์พุต ที่ปราศจากผลของไฟตรง เทียบกับสัญญาณอินพุต.....	78
4.39 สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณฟันเลื่อย.....	79
4.40 สัญญาณเอาต์พุต ที่ปราศจากผลของไฟตรง เทียบกับสัญญาณอินพุต.....	79

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.41 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรวอร์เรนบริคซ์ออสซิลเลเตอร์.....	80
4.42 กราฟ ผลการทดลองจริง เปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จากทางทฤษฎี และ ผลจากการเลียนแบบ โดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรวอร์เรนบริคซ์ ออสซิลเลเตอร์ โดยแกนตั้งเป็นขนาดสัญญาณ เอาต์พุต และแกนนอนเป็นขนาดสัญญาณอินพุตไฟตรง.....	81
4.43 กราฟ ผลการทดลองจริง เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี และ ผลจากการเลียนแบบ โดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรวอทรานเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ โดยแกนตั้งเป็นขนาด สัญญาณเอาต์พุต และแกนนอนเป็นขนาดสัญญาณอินพุตไฟตรง.....	82
4.44 กราฟ ผลการทดลองจริง เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี และ ผลจากการเลียนแบบ โดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรมัลติทริกซ์ออสซิลเลเตอร์ โดยแกนตั้งเป็นขนาดสัญญาณ เอาต์พุต และแกนนอนเป็นขนาดสัญญาณอินพุตไฟตรง.....	83
4.45 กราฟ ผลการทดลองจริง เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี และ ผลจากการเลียนแบบ โดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรวอทรานเจอร์ออสซิลเลเตอร์ในโหมดกระแส โดยแกนตั้ง เป็นขนาดสัญญาณเอาต์พุต และแกนนอนเป็นขนาดสัญญาณอินพุตไฟตรง.....	84

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในกระบวนการของการสื่อสาร, การควบคุม และ การประมวลผลสัญญาณ วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ นับเป็นวงจรที่สำคัญมาก โดยมีการพัฒนาและออกแบบกันอย่างกว้างขวาง โดยมุ่งเน้นการพัฒนาและวิจัย ไปที่การออกแบบวงจร ให้มีเสถียรภาพ มีการปรับเปลี่ยนความถี่ได้ และ การลดจำนวนอุปกรณ์ ของวงจรกิจกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์

แต่ ในการประยุกต์การใช้งาน ของวงจรกิจกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์นั้น นอกจากจะมีความจำเป็นในการปรับความถี่ของสัญญาณแล้ว ยังมีความจำเป็น จะต้องมีการปรับเปลี่ยนขนาดของสัญญาณได้อีกด้วย ซึ่งเทคนิคในการปรับเปลี่ยนขนาด ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ นั้น มีอยู่ด้วยการหลายเทคนิค อาทิ การใช้เทคนิคของการ Restoration [ 1,2 ] ซึ่งจะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น ให้กับสัญญาณทุกๆ ไซเคิล หรือ การใช้เทคนิคของ วงจรคูณสัญญาณ [ 3,4 ] ซึ่งจะทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ และมีความคิดเห็นทางฮาร์โมนิกเกิดขึ้น เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น ของวงจรถูกคูณสัญญาณ เป็นต้น

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงเป็นการศึกษาและวิจัหาเทคนิค ในการควบคุมขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยการป้อนสัญญาณควบคุม เป็นสัญญาณไฟตรง ซึ่งสัญญาณไฟตรงดังกล่าว จะไปกำหนด ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยมีข้อดีกว่าวิธีการอื่นคือ ไม่ต้องต่อวงจรใดๆ เพิ่มเติม ทำให้ระบบมีขนาดกระทัดรัด และมีโครงสร้างที่เรียบง่าย จึงนับว่า การค้นคว้าพัฒนาในเรื่องนี้ จึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

### 1.2 จุดมุ่งหมายและ วัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีจุดมุ่งหมายที่จะนำเสนอ เทคนิคในการควบคุมขนาดของ สัญญาณคลื่นรูปไซน์ ให้มีค่าตามต้องการ ในรูปแบบใหม่ โดยมุ่งเน้นให้ระบบมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ไม่ต้องต่อวงจรใดๆ เพิ่มเติม และ นอกจากนี้แล้ว เทคนิคดังกล่าว ยังไม่ส่งผลกระทบต่อ ค่าเงื่อนไขของการ การออสซิลเลต และ ความถี่ของการออสซิลเลต

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัยนี้อาศัย สมการอนุพันธ์ [ 10-12 ] ในการอธิบายพฤติกรรม ของระบบกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยในระบบที่สามารถเขียนสมการ ของระบบ ให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ที่มีลำดับมากกว่า 2 แล้ว คำตอบของสมการอนุพันธ์ จะประกอบไปด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ และ ถ้าหาก สมการอนุพันธ์ ดังกล่าวให้ คำตอบของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ หรือกล่าวได้ว่า เกิดการออสซิลเลต ดังนั้น ระบบดังกล่าว ประพฤติตัวเป็น วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์

เมื่อทำ การป้อนสัญญาณควบคุม ที่เป็นสัญญาณไฟตรง เข้าไปยังตำแหน่งที่เหมาะสม ใน วงจร จะทำให้สัญญาณไฟตรงดังกล่าว เป็นตัวที่ไปกำหนด ให้เกิดผลตอบสนองเชิงบังคับของวงจร ทำให้วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ดังกล่าว มีทั้งผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ รวมกัน ซึ่งผลตอบสนองเชิงบังคับของวงจรมันจะมีผลต่อ ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ดังนั้น การควบคุมขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ จึงสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าสัญญาณไฟตรง ที่ป้อนให้กับวงจร

#### 1.4 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในบทที่ 1 นั้น จะเป็นการกล่าวนำ และจุดมุ่งหมาย และ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ และในบทอื่นๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง สมการอนุพันธ์ , การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ และ การวิเคราะห์ระบบในแกนเวลา โดยการใช้สมการอนุพันธ์ อธิบายถึงระบบของเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ และยังได้เปรียบเทียบคำตอบของระบบที่มีการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นค่าคงที่ และ ระบบที่ไม่มีการป้อนสัญญาณอินพุตเป็น ค่าคงที่

บทที่ 3 กล่าวถึง การวิเคราะห์ วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ แบบต่างๆ เมื่อมีการป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณไฟตรง โดยประกอบไปด้วยวงจรเวเนบริดจ์ ออสซิลเลเตอร์ , วงจรควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ , วงจรเฟสชิฟท์ ออสซิลเลเตอร์ , วงจรควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส และ วงจรโคลพิตต์ออสซิลเลเตอร์โดยใช้เจเฟด ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ชี้ชัดเป็นอย่างดีว่า เมื่อมีการป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง จะมีผลต่อขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการเขียนแบบโดยใช้โปรแกรม PSPICE และ ผลการทดลองจากการต่อวงจรจริง ซึ่งจากการเขียนแบบโดยใช้โปรแกรม PSPICE และ จากการต่อวงจรจริง ให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี

บทที่ 5 เป็นการสรุปเรื่องราวต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้โดยรวม

นอกจากนี้ยังมีภาคผนวก ที่กล่าวถึง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ ระหว่างการศึกษา

## บทที่ 2

# เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์

### 2.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 2 นี้ จะกล่าวถึง การวิเคราะห์ในโดเมนเวลา โดยใช้สมการอนุพันธ์ ซึ่งการวิเคราะห์ในโดเมนเวลานั้น ให้ข่าวสารทุกอย่างครบถ้วนและง่าย โดยอาศัยการแก้สมการอนุพันธ์ ของระบบดังกล่าว โดยในบทนี้จะกล่าวถึง สมการอนุพันธ์ , คำตอบของสมการอนุพันธ์ และ การวิเคราะห์วิเคราะห์ระบบเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์โดยใช้สมการอนุพันธ์

### 2.2 สมการอนุพันธ์

โดยทั่วไปแล้ว ถ้าเรามีระบบใดๆ ซึ่งเป็นกลุ่มของอุปกรณ์ ที่ถูกจัดขึ้น ให้ทำงานร่วมกัน ตามผลลัพธ์ที่ได้หวังไว้ [10] โดยมีปริมาณทางกายภาพบางอย่างป้อนเข้าสู่ระบบ ที่เรียกว่า สัญญาณเข้า หรือ สัญญาณอินพุต ( Input Signal ) และระบบก็จะมีปริมาณทางกายภาพ บางอย่างออกมาจากระบบซึ่งเรียกว่า สัญญาณออก หรือ สัญญาณเอาต์พุต ( Output Signal ) ซึ่งความสัมพันธ์ของระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังของระบบ

โดยที่  $f(t)$  คือสัญญาณอินพุต และ  $g(t)$  คือสัญญาณเอาต์พุต ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต และ สัญญาณเอาต์พุตในทางคณิตศาสตร์ แสดงด้วยการอาศัยตัวปฏิบัติการ ดังสมการ

$$g(t) = a\{f(t)\} \quad (2.1)$$

โดยที่  $a\{ \}$  เป็นสัญลักษณ์ตัวปฏิบัติการ ซึ่งจะเป็นฟังก์ชัน ของสัญญาณอินพุต และ สัญญาณเอาต์พุต ของระบบ

ถ้าเรามีระบบใดๆ ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต และ สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ อันดับใดๆ แสดงดังสมการ

$$a_n \frac{d^n g(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} g(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dg(t)}{dt} + a_0 g(t) = f(t) \quad (2.2)$$

เรียก  $n$  ว่าเป็นอันดับของสมการอนุพันธ์

ในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์นั้น จะประกอบไปด้วย ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ( Natural Response ) และผลตอบสนองเชิงบังคับ ( Force Response ) [12]

การหาผลตอบสนองเชิงธรรมชาตินั้น สามารถหาได้จากสมการเอกพันธ์ ( Homogenous Equation ) แสดงดังสมการ

$$a_n \frac{d^n g(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} g(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dg(t)}{dt} + a_0 g(t) = 0 \quad (2.3)$$

ในการหาคำตอบของ สมการเอกพันธ์ เราจะสมมติให้  $g(t) = e^{mt}$  เป็นคำตอบของสมการ และแทนลงในสมการที่ ( 2.3 ) จะได้ว่า

$$e^{mt} (a_n m^n + a_{n-1} m^{n-1} + \dots + a_1 m + a_0) = 0 \quad (2.4)$$

เนื่องจาก  $e^{mt}$  มีค่ามากกว่าศูนย์ ทุกๆ ค่าของ  $m$  ดังนั้น

$$a_n m^n + a_{n-1} m^{n-1} + \dots + a_1 m + a_0 = 0 \quad (2.5)$$

เรียกสมการที่ ( 2.5 ) ว่า สมการคุณลักษณะ ( Characteristic Equation )

จากสมการที่ ( 2.5 ) ค่า  $m$  ที่หาได้ จะมีอยู่ 3 ลักษณะด้วยกัน คือ

( 1 ) ค่า  $m$  จากสมการคุณลักษณะ เป็นจำนวนจริงที่ต่างกันทั้งหมด เป็น  $m_1, m_2, \dots, m_n$  ดังนั้นเราจะได้คำตอบของสมการที่ ( 2.3 ) แสดงดังสมการ

$$g(t) = C_1 e^{m_1 t} + C_2 e^{m_2 t} + \dots + C_n e^{m_n t} \quad (2.6)$$

( 2 ) ค่า  $m$  จากสมการคุณลักษณะ เป็นจำนวนจริงที่ซ้ำกัน  $k$  ตัว คือ  $m_1 = m_2 = \dots = m_k$  โดยที่  $k < n$  และค่า  $m$  ที่เหลือมีค่าต่างกัน ดังนั้นเราจะได้คำตอบของสมการที่ ( 2.3 ) ในส่วนที่ซ้ำกันแสดงดังสมการ

$$g(t) = (C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + \dots + C_k t^{k-1}) e^{m t} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ค่า  $m$  ที่ได้จากการคูณลักษณะ เป็นจำนวนเชิงซ้อน คือ  $m = a \pm jb$  ดังนั้น เราจะได้คำตอบของสมการที่ (2.3) แสดงดังสมการ

$$g(t) = C_1 e^{(a+jb)t} + C_2 e^{(a-jb)t} \quad (2.8)$$

การหาผลตอบสนองเชิงบังคับนั้น มีอยู่หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึง การหาผลตอบสนองเชิงบังคับ โดยวิธีเทียบสัมประสิทธิ์ โดยทำการคาดเดารูปแบบของผลตอบสนองเชิงบังคับ โดยสังเกตจากลักษณะของฟังก์ชัน  $f(t)$  ซึ่งอาจเป็นฟังก์ชันใดๆ เช่น ฟังก์ชันพหุนาม, ฟังก์ชันตรีโกณ หรือ ฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล โดยมีรูปแบบของการคาดเดาดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางการคาดเดารูปแบบ  $g(t)$  จากลักษณะของ  $f(t)$

$f(t)$	$g(t)$
$k$	$A$
$t$	$At + B$
$t^2$	$At^2 + Bt + C$
$e^{\alpha t}$	$Ae^{\alpha t}$
$\cos(bt), \sin(bt)$	$A \cos(bt) + B \sin(bt)$

2.3 การวิเคราะห์ระบบเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยอาศัยสมการอนุพันธ์

2.3.1 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง

ถ้าเรามีระบบ ที่สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง ดังรูปที่ 2.2

$$a \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + b \frac{dV_o(t)}{dt} + cV_o(t) = 0 \quad \bullet \longrightarrow V_o(t)$$

รูปที่ 2.2 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง

ถ้าเราสามารถหาเงื่อนไข ที่ทำให้  $b = 0$  จะทำให้สมการของระบบ เป็นดังสมการที่ (2.9)

$$a \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} = -cV_o(t) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราแทนสมการอนุพันธ์ ด้วยสมการคุณลักษณะ ( Characteristic Equation ) จะได้

$$m^2 = -\frac{c}{a} \quad (2.10)$$

หรือ

$$m = \pm j\sqrt{\frac{c}{a}} \quad (2.11)$$

$$m_1 = +j\sqrt{\frac{c}{a}} \quad ; \quad m_2 = -j\sqrt{\frac{c}{a}}$$

ดังนั้น ผลเฉลยของสมการที่ ( 2.9 ) แสดงดังสมการที่ ( 2.12 )

$$V_o(t) = C_1 e^{j\sqrt{\frac{c}{a}}t} + C_2 e^{-j\sqrt{\frac{c}{a}}t} \quad (2.12)$$

หาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$

จากสมการที่ ( 2.12 ) พบว่า ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ มีพจน์ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ซึ่งไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องดำเนินการหาค่า  $C_1$  และ  $C_2$  โดยอาศัยสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  กำหนดให้

$$V_o(0) = V_{INT} \quad (2.13)$$

และ หาสมการช่วย อีกหนึ่งสมการ เพื่อช่วยในการแก้สมการหาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  โดยการหาปริพันธ์ ของ สมการที่ ( 2.9 ) ตั้งแต่ ที่เวลา  $t=0$  ถึง ที่เวลาใดๆ [13] จะได้

$$a \frac{dV_o(t)}{dt} = -c \int_0^t V_o(t) dt \quad (2.14)$$

จากสมการที่ ( 2.14 ) ที่สภาวะ ที่เวลา  $t=0$  พบว่า

$$a \frac{dV_o(0)}{dt} = -c \int_0^0 V_o(0) dt \quad (2.15)$$

ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dV_o(0)}{dt} = 0 \quad (2.16)$$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (2.13) และ (2.16) ใช้ในการหาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ดังนี้

ก.) แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  ลงไปในสมการที่ (2.12) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ จะได้ว่า

$$V_o(0) = C_1 e^{j\sqrt{\frac{c}{a}} \cdot 0} + C_2 e^{-j\sqrt{\frac{c}{a}} \cdot 0} \quad (2.17)$$

ดังนั้น

$$V_{NT} = C_1 + C_2 \quad (2.18)$$

ข.) จากสมการที่ (2.12) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 1 จะได้

$$V_o'(t) = j\sqrt{\frac{c}{a}} C_1 e^{j\sqrt{\frac{c}{a}} t} - j\sqrt{\frac{c}{a}} C_2 e^{-j\sqrt{\frac{c}{a}} t} \quad (2.19)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (2.16) แทนค่าอนุพันธ์ ที่เวลา  $t=0$  ลงไปในสมการที่ (2.19) พบว่า

$$0 = j\sqrt{\frac{c}{a}} C_1 - j\sqrt{\frac{c}{a}} C_2 \quad (2.20)$$

ดังนั้น

$$C_1 = C_2 \quad (2.21)$$

กำหนดให้

$$C_1 = C_2 = C \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) แทนค่าลงในสมการที่ (2.18) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{V_{INT}}{2} \quad (2.23)$$

แทนค่า  $C_1$  และ  $C_2$  ลงในสมการที่ (2.12) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ จะได้ว่า

$$V_o(t) = \frac{V_{INT}}{2} e^{j\sqrt{\frac{c}{a}}t} + \frac{V_{INT}}{2} e^{-j\sqrt{\frac{c}{a}}t} \quad (2.24)$$

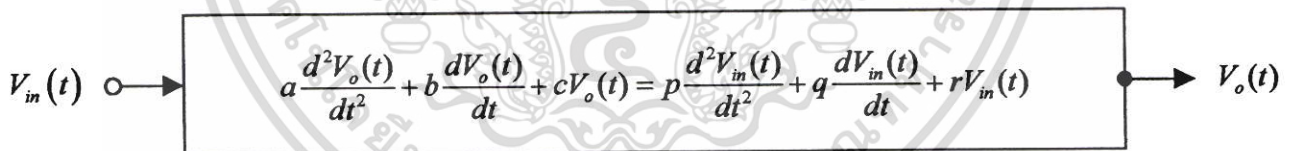
เขียนสมการที่ (2.24) ใหม่ ได้ดังนี้

$$V_o(t) = V_{INT} \cos\left(\sqrt{\frac{c}{a}}t\right) \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.25) พบว่าสัญญาณเอาต์พุต  $V_o(t)$  คือ สัญญาณคลื่นรูปไซน์ นั่นเอง โดยมีขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์เท่ากับ สภาวะเริ่มต้นของระบบที่ เวลา  $t=0$

### 2.3.2 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง ที่มีผลเนื่องจากสัญญาณอินพุต

ถ้าเรามีระบบ ที่เอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ อันดับที่สอง ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง ที่มีผลเนื่องจากสัญญาณอินพุต

ถ้าเราสามารถหาเงื่อนไข ที่ ทำให้  $b = 0$  จะทำให้สมการของระบบ เป็นดังสมการที่ (2.26)

$$a \frac{d^2V_o(t)}{dt^2} + cV_o(t) = p \frac{d^2V_{in}(t)}{dt^2} + q \frac{dV_{in}(t)}{dt} + rV_{in}(t) \quad (2.26)$$

จะเห็นว่า สมการที่ (2.26) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่ 2 และ มีผลเฉลย ของสมการ อยู่ 2 ส่วนคือ

ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ( Natural Response ) และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ ( Force Response )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ

การหาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ทำได้โดยกำหนดให้  $V_{in}(t) = 0$  จะเขียนสมการที่ (2.26) ได้เป็น

$$a \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} = -c V_o(t) \quad (2.27)$$

เมื่อเราแทนสมการอนุพันธ์ ด้วยสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) จะได้

$$m^2 = -\frac{c}{a} \quad (2.28)$$

หรือ

$$m = \pm j \sqrt{\frac{c}{a}}$$

$$m_1 = +j \sqrt{\frac{c}{a}} ; m_2 = -j \sqrt{\frac{c}{a}} \quad (2.29)$$

ดังนั้น ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ แสดงดังสมการที่ (2.30)

$$V_{on}(t) = C_1 e^{j\sqrt{\frac{c}{a}}t} + C_2 e^{-j\sqrt{\frac{c}{a}}t} \quad (2.30)$$

### หาผลตอบสนองเชิงบังคับ

ถ้าเรากำหนดให้  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ โดยที่

$$V_{in}(t) = V_{in} \quad (2.31)$$

ดังนั้น จากวิธีการคาดเดารูปแบบของผลตอบสนองเชิงบังคับ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 จึงกำหนดให้ ผลตอบสนองเชิงบังคับ มีค่า

$$V_{of}(t) = K \quad (2.32)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.31) และ (2.32) ลงไปในสมการที่ (2.26) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a \frac{d^2 K}{dt^2} + cK = p \frac{d^2 V_{in}}{dt^2} + q \frac{dV_{in}}{dt} + rV_{in} \quad (2.33)$$

เนื่องจาก

$$\frac{d^2 K}{dt^2}, \frac{d^2 V_{in}}{dt^2}, \frac{dV_{in}}{dt} = 0 \quad (2.34)$$

จัดรูปสมการที่ (2.33) ได้เป็น

$$cK = rV_{in} \quad (2.35)$$

ดังนั้น ผลตอบสนองเชิงบังคับ แสดงดังสมการที่ (2.36)

$$V_{of}(t) = K = \frac{r}{c} V_{in} \quad (2.36)$$

หาผลตอบสนองทั้งหมด

ผลตอบสนองทั้งหมด ของระบบ หาได้จากผลรวมของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ

$$V_o(t) = V_{on}(t) + V_{of}(t) \quad (2.37)$$

แทนค่าผลตอบสนองเชิงธรรมชาติจากสมการที่ (2.30) และ ผลตอบสนองเชิงบังคับจากสมการที่ (2.36) ลงในสมการที่ (2.37) จะได้

$$V_o(t) = C_1 e^{j\sqrt{\frac{c}{a}}t} + C_2 e^{-j\sqrt{\frac{c}{a}}t} + \frac{r}{c} V_{in} \quad (2.38)$$

หาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$

จากสมการที่ (2.38) พบว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีพจน์ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ซึ่งไม่ทราบค่า จึงต้องดำเนินการหาค่า  $C_1$  และ  $C_2$  โดยอาศัยสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  โดยกำหนดให้

$$V_o(0) = V_{INT} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำการหาสมการช่วย อีกหนึ่งสมการ เพื่อช่วยในการแก้สมการหาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  โดยหาปริพันธ์ ของสมการที่ (2.26) ซึ่งเป็นสมการของระบบ ตั้งแต่ ที่เวลา  $t=0$  ถึงที่เวลาใดๆ จะได้ว่า

$$a \frac{dV_o(t)}{dt} + c \int_0^t V_o(t) dt = p \frac{dV_{in}(t)}{dt} + qV_{in}(t) + r \int_0^t V_{in}(t) dt \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.40) พิจารณาสถานะ ที่เวลา  $t=0$  จะได้

$$a \frac{dV_o(0)}{dt} + c \int_0^0 V_o(0) dt = p \frac{dV_{in}(0)}{dt} + qV_{in}(0) + r \int_0^0 V_{in}(0) dt \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.41) จะเห็นว่า พจน์  $c \int_0^0 V_o(0) dt$ , พจน์  $r \int_0^0 V_{in}(0) dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และเนื่อง

จาก  $V_{in}(t)$  มีค่าคงที่ ดังนั้น  $\frac{dV_{in}(0)}{dt}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น จักรุปสมการที่ (2.41) ใหม่ได้เป็น

$$a \frac{dV_o(0)}{dt} = qV_{in}(0) \quad (2.42)$$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (2.39) และ (2.42) ในการหาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ดังนี้

ก. แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่ เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ (2.38) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสองทั้งหมดของระบบ จะได้ว่า

$$V_o(0) = C_1 e^{j\sqrt{\frac{c}{a}} \cdot 0} + C_2 e^{-j\sqrt{\frac{c}{a}} \cdot 0} + \frac{r}{c} V_{in} \quad (2.43)$$

ดังนั้น

$$V_{INT} = C_1 + C_2 + \frac{r}{c} V_{in} \quad (2.44)$$

ข. จากสมการที่ (2.38) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสองทั้งหมดของระบบ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 1 จะได้ว่า

$$V_o'(t) = jC_1 \sqrt{\frac{c}{a}} e^{j\sqrt{\frac{c}{a}} t} - jC_2 \sqrt{\frac{c}{a}} e^{-j\sqrt{\frac{c}{a}} t} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแทนค่าการหาอนุพันธ์ที่เวลา  $t=0$  ลงไปในสมการที่ (2.45) จะได้ว่า

$$V_o'(0) = j\sqrt{\frac{c}{a}}C_1 - j\sqrt{\frac{c}{a}}C_2 \quad (2.46)$$

แทนเงื่อนไขจากสมการที่ (2.42) ลงไปในสมการที่ (2.46) จะได้ว่า

$$V_o'(0) = j\sqrt{\frac{c}{a}}C_1 - j\sqrt{\frac{c}{a}}C_2 = \frac{q}{a}V_{in}(0) \quad (2.47)$$

จากสมการที่ (2.47) ใช้คุณสมบัติ การเท่ากัน ของจำนวนเชิงซ้อน พบว่า

$$j\sqrt{\frac{c}{a}}C_1 - j\sqrt{\frac{c}{a}}C_2 = 0 \quad (2.48)$$

จัดรูปสมการที่ (2.48) ใหม่ได้เป็น

$$C_1 = C_2 \quad (2.49)$$

กำหนดให้

$$C_1 = C_2 = C \quad (2.50)$$

แทนค่าสมการที่ (2.50) ลงในสมการที่ (2.44) จะได้ว่า

$$C = \frac{V_{INT} - \frac{r}{c}V_{IN}}{2} \quad (2.51)$$

จากสมการที่ (2.50) และ (2.51) แทนค่า  $C$  ลงในสมการที่ (2.43) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนอง ทั้งหมดของระบบ มีค่า

$$V_o(t) = \left( V_{INT} - \frac{r}{c}V_{IN} \right) \left( \cos\left( \sqrt{\frac{c}{a}}t \right) \right) + \frac{r}{c}V_{IN} \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ ( 2.52 ) พบว่าสัญญาณที่ได้จากระบบนั้น เป็น สัญญาณคลื่นรูปไซน์ รวมกับ สัญญาณไฟตรงค่าหนึ่ง โดยที่ ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ขึ้นกับ สภาวะเริ่มต้นของระบบที่ เวลา  $t=0$  และค่าแรงดันไฟตรงที่ป้อนเข้าไปในระบบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ จากสมการที่ ( 2.25 ) ในกรณีที่ ไม่มีการป้อน สัญญาณอินพุต กับ สมการที่ ( 2.52 ) เมื่อมีการป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณไฟตรง พบว่า ค่าแรงดัน สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ ยังคงเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ และ ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต มีค่าเท่าเดิม

แต่เมื่อพิจารณาในเรื่อง ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะพบว่า ในระบบที่ไม่มีการป้อน สัญญาณควบคุม นั้น ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะขึ้นกับ สภาวะเริ่มต้นของระบบที่ เวลา  $t=0$  เพียงอย่างเดียว ทำให้การปรับขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ สามารถทำได้โดยการปรับค่า สภาวะ เริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  เช่น การปรับไฟเลี้ยงวงจร เป็นต้น ในขณะที่ ระบบที่มีการป้อน สัญญาณอินพุตนั้น ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต มีค่าแปรผันตามสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไฟ ตรง ที่ป้อนเข้าไปในวงจร ทำให้สามารถปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุต ได้สะดวกกว่า และง่าย กว่า โดยไม่ต้องค่อวงจรใดๆ เพิ่มเติม

### 2.3.3 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สาม

ถ้าเรามีระบบที่ สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สาม ดังในรูปที่ 2.4

$$A \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} + B \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + C \frac{dV_o(t)}{dt} + DV_o(t) = 0 \quad \rightarrow V_o(t)$$

รูปที่ 2.4 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สาม

รูปทั่วไปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 แสดงดังสมการ

$$A \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} + B \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + C \frac{dV_o(t)}{dt} + DV_o(t) = 0 \quad (2.53)$$

แทนสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 ด้วยสมการคุณลักษณะ ( Characteristic Equation ) แสดงดังสมการ

$$Am^3 + Bm^2 + Cm + D = 0 \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากต้องการให้คำตอบของสมการเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ต้องกำหนดผลเฉลย ของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = C_1 e^{m_1 t} + C_2 e^{m_2 t} + C_3 e^{m_3 t} \quad (2.55)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} m_1 &= j\omega \\ m_2 &= -j\omega \\ m_3 &= -k_1 \end{aligned} \quad (2.56)$$

ดังนั้นสมการคุณลักษณะ ( Characteristic Equation ) จะอยู่ในรูป

$$(m - j\omega)(m + j\omega)(m + k_1) = 0 \quad (2.57)$$

$$m^3 + k_1 m^2 - \omega^2 m - k_1 \omega^2 = 0 \quad (2.58)$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ ( 2.54 ) กับสมการที่ ( 2.58 ) พบว่า

$$\begin{aligned} k_1 &= B/A \\ \omega^2 &= -C/A \\ k_1 \omega^2 &= -D/A \end{aligned} \quad (2.59)$$

ดังนั้น ผลตอบสนองทั้งหมด ของสมการที่ ( 2.53 ) แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = C_1 e^{j\frac{C}{A}t} + C_2 e^{-j\frac{C}{A}t} + C_3 e^{\frac{B}{A}t} \quad (2.60)$$

หาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$

จากสมการที่ ( 2.60 ) จะเห็นว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีพจน์ค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ซึ่งไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องดำเนินการหาค่า  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  โดยอาศัยสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  โดยกำหนดให้

$$V_o(0) = V_{INT} \quad (2.61)$$

และทำการหาสมการช่วย อีกหนึ่งสมการ เพื่อช่วยในการแก้สมการหาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  โดยทำการหาปริพันธ์ ของ สมการที่ (2.53) ซึ่งเป็นสมการของระบบทั้งหมด ตั้งแต่ ที่เวลา  $t=0$  ถึง ที่เวลาใดๆ [13] จะได้ว่า

$$A \int_0^t \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} dt + B \int_0^t \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} dt + C \int_0^t \frac{dV_o(t)}{dt} dt + D \int_0^t V_o(t) dt = 0 \quad (2.62)$$

จากสมการที่ (2.62) พิจารณาสถานะ ที่เวลา  $t=0$  จะได้ว่า

$$A \frac{d^2 V_o(0)}{dt^2} + B \frac{dV_o(0)}{dt} + C V_o(0) + D \int_0^0 V_o(0) dt = 0 \quad (2.63)$$

จากสมการที่ (2.63) จะเห็นว่า พจน์  $\int_0^0 V_o(0) dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.63)

ได้เป็น

$$A \frac{d^2 V_o(0)}{dt^2} + B \frac{dV_o(0)}{dt} + C V_o(0) = 0 \quad (2.64)$$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (2.61) และ (2.64) ในการหาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ดังนี้

ก. แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ (2.60) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนอง ของระบบ ดังนั้นจะได้ว่า ในสภาวะเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  สัญญาณ เอาท์พุท จะมีค่าเท่ากับ เงื่อนไขเริ่มต้น ของระบบ ดังนั้น

$$V_o(0) = V_{INT} = C_1 e^{j\frac{C}{A}0} + C_2 e^{-j\frac{C}{A}0} + C_3 e^{\frac{B}{A}0} \quad (2.65)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (2.65) แสดงดังสมการ

$$V_{INT} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.66)$$

ข. จากสมการที่ (2.60) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 1 จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o'(t) = j\frac{C}{A}C_1e^{j\frac{C}{A}t} - j\frac{C}{A}C_2e^{-j\frac{C}{A}t} + \frac{B}{A}C_3e^{\frac{B}{A}t} \quad (2.67)$$

และ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 2 จะได้ว่า

$$V_o''(t) = -\frac{C^2}{A^2}C_1e^{j\frac{C}{A}t} + \frac{C^2}{A^2}C_2e^{-j\frac{C}{A}t} + \frac{B^2}{A^2}C_3e^{\frac{B}{A}t} \quad (2.68)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (2.64) แทนค่าเงื่อนไข ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าวลงไป ในสมการที่ (2.60), (2.67) และ (2.68) จะได้ว่า

$$V_o(0) = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.69)$$

$$V_o'(0) = j\frac{C}{A}C_1 - j\frac{C}{A}C_2 + \frac{B}{A}C_3 \quad (2.70)$$

$$V_o''(0) = -\frac{C^2}{A^2}C_1 + \frac{C^2}{A^2}C_2 + \frac{B^2}{A^2}C_3 \quad (2.71)$$

แทนค่า สมการที่ (2.69), (2.70) และ (2.71) ลงไปในสมการที่ (2.64) จะได้ว่า

$$\left[ \left( -\frac{C^2}{A} + C \right) C_1 + \left( \frac{C^2}{A} + C \right) C_2 + \left( \frac{2B^2}{A} + C \right) C_3 \right] + j \left[ \frac{BC}{A} C_1 - \frac{BC}{A} C_2 \right] = 0 \quad (2.72)$$

จากสมการที่ (2.72) ใช้คุณสมบัติ การเท่ากัน ของจำนวนเชิงซ้อน พบว่า

$$\left( -\frac{C^2}{A} + C \right) C_1 + \left( \frac{C^2}{A} + C \right) C_2 + \left( \frac{2B^2}{A} + C \right) C_3 = 0 \quad (2.73)$$

$$\frac{BC}{A} C_1 - \frac{BC}{A} C_2 = 0 \quad (2.74)$$

จากสมการที่ (2.66), (2.73) และ (2.74) ทำการแก้สมการ หาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ดังนั้น

$$C_1 = C_2 = \left( \frac{1}{2} + \frac{AC}{4B^2} \right) V_{INT} \quad (2.75)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_3 = \frac{2BC^2}{A} V_{INT} \quad (2.76)$$

แทนค่าคงที่  $C_1, C_2$  และ  $C_3$  ลงในสมการที่ (2.60) ดังนั้นจะได้ว่าผลตอบสนองทั้งหมดของระบบมีค่า

$$V_o(t) = \left( \frac{1}{2} + \frac{AC}{4B^2} \right) V_{INT} e^{j\frac{C}{A}t} + \left( \frac{1}{2} + \frac{AC}{4B^2} \right) V_{INT} e^{-j\frac{C}{A}t} + \frac{2BC^2}{A} V_{INT} e^{\frac{B}{A}t} \quad (2.77)$$

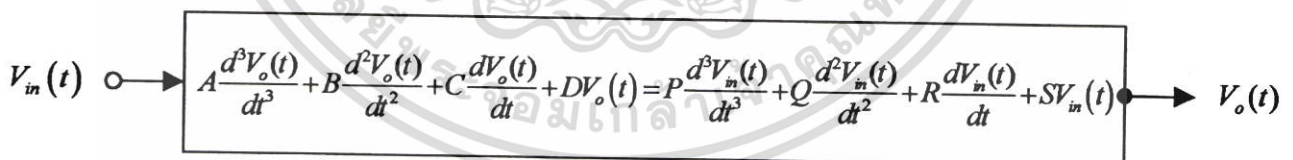
จัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = \left( 1 + \frac{AC}{2B^2} \right) V_{INT} \cos\left(\frac{C}{A}t\right) + \frac{2BC^2}{A} V_{INT} e^{\frac{B}{A}t} \quad (2.78)$$

จากสมการที่ (2.78) จะได้ว่าสัญญาณเอาต์พุต  $V_o(t)$  คือ สัญญาณคลื่นรูปไซน์ รวมอยู่ กับ ผลของ ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ที่มีค่าลดลงสู่ศูนย์ แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เมื่อเวลาผ่านไป และขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ได้ ขึ้นกับสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$

### 2.3.4 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สาม ที่มีผลเนื่องจากสัญญาณอินพุต

ถ้าเรามีระบบ ที่เอาต์พุต อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ อันดับที่สาม ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบที่สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สาม ที่มีผลเนื่องจากสัญญาณอินพุต

รูปทั่วไปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 แสดงดังสมการ

$$A \frac{d^3V_o(t)}{dt^3} + B \frac{d^2V_o(t)}{dt^2} + C \frac{dV_o(t)}{dt} + DV_o(t) = P \frac{d^3V_{in}(t)}{dt^3} + Q \frac{d^2V_{in}(t)}{dt^2} + R \frac{dV_{in}(t)}{dt} + SV_{in}(t) \quad (2.79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า สมการที่ ( 2.79 ) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่ 2 และมีผลเฉลย ของสมการ อยู่ 2 ส่วนคือ ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ( Natural Response ) และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ ( Force Response )

การหาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ทำได้โดยกำหนดให้  $V_{in}(t) = 0$  จะเขียนสมการที่ ( 2.79 ) ได้เป็น

$$A \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} + B \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + C \frac{dV_o(t)}{dt} + D V_o(t) = 0 \quad (2.80)$$

แทนสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 ด้วยสมการคุณลักษณะ ( Characteristic Equation ) ดังสมการ

$$Am^3 + Bm^2 + Cm + D = 0 \quad (2.81)$$

หากต้องการให้คำตอบของสมการเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ต้องกำหนดผลเฉลย ของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = C_1 e^{m_1 t} + C_2 e^{m_2 t} + C_3 e^{m_3 t} \quad (2.82)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} m_1 &= j\omega \\ m_2 &= -j\omega \\ m_3 &= -k_1 \end{aligned} \quad (2.83)$$

ดังนั้นสมการคุณลักษณะ ( Characteristic Equation ) จะอยู่ในรูป

$$(m - j\omega)(m + j\omega)(m + k_1) = 0 \quad (2.84)$$

$$m^3 + k_1 m^2 - \omega^2 m - k_1 \omega^2 = 0 \quad (2.85)$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ ( 2.81 ) กับสมการที่ ( 2.85 ) พบว่า

$$\begin{aligned}k_1 &= B/A \\ \omega^2 &= -C/A \\ k_1\omega^2 &= -D/A\end{aligned}\quad (2.86)$$

ดังนั้น ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ของสมการที่ (2.86) แสดงดังสมการ

$$V_{on}(t) = C_1 e^{j\frac{C}{A}t} + C_2 e^{-j\frac{C}{A}t} + C_3 e^{\frac{B}{A}t} \quad (2.87)$$

หาผลตอบสนองเชิงบังคับ

ถ้าเรากำหนดให้  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ โดยที่

$$V_{in}(t) = V_{in} \quad (2.88)$$

จากวิธีการคาดเดารูปแบบของผลตอบสนองเชิงบังคับ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 จึงกำหนดให้ ผลตอบสนองเชิงบังคับ มีค่า

$$V_{of}(t) = K \quad (2.89)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.88) และ (2.89) ลงไปในสมการที่ (2.79) ซึ่งเป็นสมการของระบบทั้งหมด จะได้

$$A \frac{d^3 K}{dt^3} + B \frac{d^2 K}{dt^2} + C \frac{dK}{dt} + DK = P \frac{d^3 V_{in}}{dt^3} + Q \frac{d^2 V_{in}}{dt^2} + R \frac{dV_{in}}{dt} + SV_{in} \quad (2.90)$$

เนื่องจาก

$$\frac{d^3 K}{dt^3}, \frac{d^2 K}{dt^2}, \frac{dK}{dt}, \frac{d^3 V_{in}}{dt^3}, \frac{d^2 V_{in}}{dt^2}, \frac{dV_{in}}{dt} = 0 \quad (2.91)$$

จัดรูปสมการที่ (2.91) ได้เป็น

$$DK = SV_{in} \quad (2.92)$$

ดังนั้นผลตอบสนองเชิงบังคับ แสดงดังสมการที่ (2.93)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{of}(t) = K = \frac{S}{D} V_{in} \quad (2.93)$$

หาผลตอบสนองทั้งหมด

ผลตอบสนองทั้งหมด ของระบบ หาได้จากผลรวมของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ

$$V_o(t) = V_{on}(t) + V_{of}(t) \quad (2.94)$$

แทนค่าผลตอบสนองเชิงธรรมชาติจากสมการที่ (2.87) และ ผลตอบสนองเชิงบังคับจากสมการที่ (2.93) ลงในสมการที่ (2.94) ดังนี้

$$V_o(t) = C_1 e^{j\frac{C}{A}t} + C_2 e^{-j\frac{C}{A}t} + C_3 e^{\frac{B}{A}t} + \frac{S}{D} V_{in} \quad (2.95)$$

หาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$

จากสมการที่ (2.95) พบว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีพจน์ค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ซึ่งไม่ทราบค่า จึงต้องดำเนินการหาค่า  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  โดยอาศัยสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  โดยกำหนดให้

$$V_o(0) = V_{INT} \quad (2.96)$$

ทำการหาสมการช่วย อีกสองสมการ เพื่อช่วยในการแก้สมการหาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  โดยการหาปริพันธ์ ของ สมการที่ (2.79) ซึ่งเป็นสมการของระบบทั้งหมด ตั้งแต่ ที่เวลา  $t=0$  ถึงที่เวลาใดๆ [13] จะได้

$$\begin{aligned} & A \int_0^t \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} dt + B \int_0^t \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} dt + C \int_0^t \frac{dV_o(t)}{dt} dt + D \int_0^t V_o(t) dt \\ & = P \int_0^t \frac{d^3 V_{in}(t)}{dt^3} dt + Q \int_0^t \frac{d^2 V_{in}(t)}{dt^2} dt + R \int_0^t \frac{dV_{in}(t)}{dt} dt + S \int_0^t V_{in}(t) dt \end{aligned} \quad (2.97)$$

จากสมการที่ (2.97) พิจารณาสภาวะ ที่เวลา  $t=0$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A \frac{d^2 V_o(0)}{dt^2} + B \frac{dV_o(0)}{dt} + CV_o(0) + D \int_0^0 V_o(0) dt = P \frac{d^2 V_{in}(0)}{dt^2} t + Q \frac{dV_{in}(0)}{dt} t + RV_{in}(0) + S \int_0^0 V_{in}(0) dt \quad (2.98)$$

จากสมการที่ (2.98) จะเห็นว่า พจน์  $\int_0^0 V_o(0) dt$ , พจน์  $\int_0^0 V_{in}(0) dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และเนื่อง  
จาก  $V_{in}(t)$  มีค่าคงที่ ดังนั้น  $\frac{d^2 V_{in}(0)}{dt^2}$ ,  $\frac{dV_{in}(0)}{dt}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น จักรูปสมการที่ (2.98)  
ได้เป็น

$$A \frac{d^2 V_o(0)}{dt^2} + B \frac{dV_o(0)}{dt} + CV_o(0) = RV_{in}(0) \quad (2.99)$$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (2.96) และ (2.99) ในการหาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ดังนี้

ก. แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ (2.95) ซึ่งเป็นสมการ  
ผลตอบสนอง ของระบบ ดังนั้นจะได้ว่า ในสภาวะเริ่มต้น ณ.ที่เวลา  $t=0$  สัญญาณ เอาท์พุท จะมี  
ค่าเท่ากับเงื่อนไขเริ่มต้น ของระบบ ดังนั้น

$$V_o(0) = V_{INT} = C_1 e^{j\frac{C}{A}0} + C_2 e^{-j\frac{C}{A}0} + C_3 e^{\frac{B}{A}0} + \frac{S}{D} V_{in}(0) \quad (2.100)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (2.100) แสดงดังสมการ

$$V_{INT} = C_1 + C_2 + C_3 + \frac{S}{D} V_{in}(0) \quad (2.101)$$

ข. จากสมการที่ (2.95) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ทำการหาอนุพันธ์  
ครั้งที่ 1 จะได้ว่า

$$V_o'(t) = j \frac{C}{A} C_1 e^{j\frac{C}{A}t} - j \frac{C}{A} C_2 e^{-j\frac{C}{A}t} + \frac{B}{A} C_3 e^{\frac{B}{A}t} \quad (2.102)$$

และ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 2 จะได้ว่า

$$V_o''(t) = -\frac{C^2}{A^2} C_1 e^{j\frac{C}{A}t} + \frac{C^2}{A^2} C_2 e^{-j\frac{C}{A}t} + \frac{B^2}{A^2} C_3 e^{\frac{B}{A}t} \quad (2.103)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเงื่อนไขในสมการที่ ( 2.99 ) แทนค่าเงื่อนไข ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าวลงไปในสมการที่ ( 2.95 ) , ( 2.102 ) และ ( 2.103 ) จะได้ว่า

$$V_o(0) = C_1 + C_2 + C_3 + \frac{S}{D} V_{in}(0) \quad (2.104)$$

$$V_o'(0) = j\frac{C}{A}C_1 - j\frac{C}{A}C_2 + \frac{B}{A}C_3 \quad (2.105)$$

$$V_o''(0) = -\frac{C^2}{A^2}C_1 + \frac{C^2}{A^2}C_2 + \frac{B^2}{A^2}C_3 \quad (2.106)$$

แทนค่า สมการที่ ( 2.104 ) , ( 2.105 ) และ ( 2.106 ) ลงไปในสมการที่ ( 2.99 ) จะได้ว่า

$$\left[ \left( -\frac{C^2}{A} + C \right) C_1 + \left( \frac{C^2}{A} + C \right) C_2 + \left( \frac{2B^2}{A} + C \right) C_3 \right] + j \left[ \frac{BC}{A} C_1 - \frac{BC}{A} C_2 \right] = \left( R - \frac{SC}{D} \right) V_{in}(0) \quad (2.107)$$

จากสมการที่ ( 2.107 ) ใช้คุณสมบัติ การเท่ากัน ของจำนวนเชิงซ้อน พบว่า

$$\left( -\frac{C^2}{A} + C \right) C_1 + \left( \frac{C^2}{A} + C \right) C_2 + \left( \frac{2B^2}{A} + C \right) C_3 = \left( R - \frac{SC}{D} \right) V_{in}(0) \quad (2.107)$$

$$\frac{BC}{A} C_1 - \frac{BC}{A} C_2 = 0 \quad (2.108)$$

จากสมการที่ ( 2.101 ) , ( 2.107 ) และ ( 2.108 ) ทำการแก้สมการ หาค่าคงที่  $C_1$  ,  $C_2$  และ  $C_3$  และเนื่องจาก สัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ซึ่ง  $V_{in}(t) = V_{in}(0) = V_{in}$  ดังนั้น

$$C_1 = C_2 = \left( \frac{1}{2} + \frac{AC}{4B} \right) V_{INT} - \left( \frac{S}{2D} + \frac{AR}{4B^2} \right) V_{in} \quad (2.109)$$

$$C_3 = \frac{2A}{B^2} [RV_{in} - CV_{INT}] \quad (2.110)$$

แทนค่าคงที่  $C_1$  ,  $C_2$  และ  $C_3$  ลงในสมการที่ ( 2.95 ) ดังนั้นผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o(t) = \left\{ \left( \frac{1}{2} + \frac{AC}{4B} \right) V_{INT} - \left( \frac{S}{2D} + \frac{AR}{4B^2} \right) V_{in} \right\} e^{j\frac{C}{A}t} + \left\{ \left( \frac{1}{2} + \frac{AC}{4B} \right) V_{INT} - \left( \frac{S}{2D} + \frac{AR}{4B^2} \right) V_{in} \right\} e^{-j\frac{C}{A}t} + \left\{ \frac{2A}{B^2} [RV_{in} - CV_{INT}] \right\} e^{\frac{B}{A}t} + \frac{S}{D} V_{in} \quad (2.111)$$

หรือจัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = \left\{ \left( 1 + \frac{AC}{2B} \right) V_{INT} - \left( \frac{S}{D} + \frac{AR}{2B^2} \right) V_{in} \right\} \cos\left(\frac{C}{A}t\right) + \left\{ \frac{2A}{B^2} [RV_{in} - CV_{INT}] \right\} e^{\frac{B}{A}t} + \frac{S}{D} V_{in} \quad (2.112)$$

จากสมการที่ (2.112) พบว่าสัญญาณที่ได้จากระบบนั้น เป็น สัญญาณคลื่นรูปไซน์ และ สัญญาณไฟตรงค่าหนึ่ง และ รวมกับ ผลของ ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ที่มีค่าลดลงสู่ศูนย์ แบบ เอ็กซ์โปเนนเชียล เมื่อเวลาผ่านไป โดยที่ ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ขึ้นกับ สภาวะเริ่มต้นของ ระบบที่ เวลา  $t=0$  และค่าแรงดันไฟตรงที่ป้อนเข้าไปในระบบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ จากสมการที่ (2.78) ในกรณีที่ ไม่มีการป้อน สัญญาณอินพุต กับ สมการที่ (2.112) เมื่อมีการป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณไฟตรง พบว่า ค่าแรงดัน สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ยังคงเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ และ ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต มีค่าเท่าเดิม

แต่เมื่อพิจารณาในเรื่อง ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะพบว่า ในระบบที่ไม่มีการป้อน สัญญาณควบคุม นั้น ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะขึ้นกับ สภาวะเริ่มต้นของระบบที่ เวลา  $t=0$  เพียงอย่างเดียว ในขณะที่ ระบบที่มีการป้อนสัญญาณอินพุตนั้น ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต มีค่าแปรผันตามสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไฟตรง ที่ป้อนเข้าไปในวงจร ทำให้สามารถปรับขนาด ของสัญญาณเอาต์พุต โดยการปรับสัญญาณไฟตรงดังกล่าว

## 2.4 สรุป

ในหัวข้อที่ 2.2 กล่าวถึง ระบบ และ สมการอนุพันธ์ และ คำตอบของสมการอนุพันธ์

ในหัวข้อที่ 2.3 กล่าวถึง ระบบที่สัญญาณเอาต์พุต สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ อนุพันธ์อันดับที่สอง และ อนุพันธ์อันดับที่สาม โดยทำการเปรียบเทียบผลเฉลยของสมการ เมื่อมี การป้อนสัญญาณอินพุต เป็นค่าคงที่ กับ เมื่อไม่มีการป้อนสัญญาณอินพุต และพบว่า ในระบบที่มี การป้อนสัญญาณอินพุต เป็นค่าคงที่ จะมีผลทำให้ ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งเป็นสัญญาณคลื่น รูปไซน์ มีค่าเปลี่ยน ไป โดยไม่ส่งผลใดๆ ต่อความถี่ของการออสซิลเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

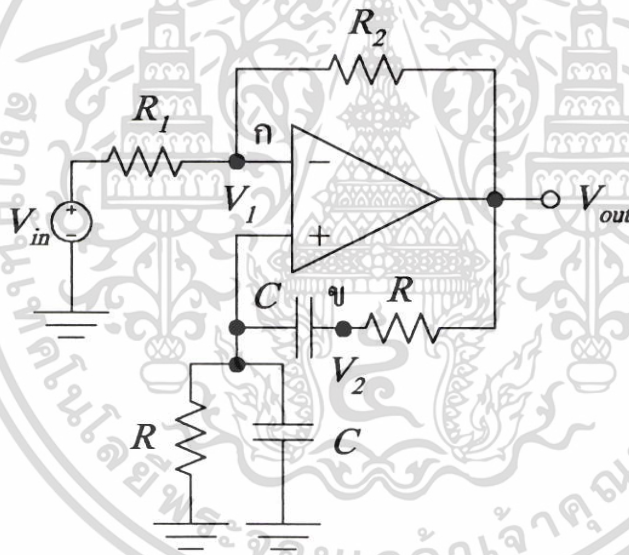
### บทที่ 3

## การวิเคราะห์ วงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์

### 3.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 3 นี้จะเป็นการวิเคราะห์วงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ เมื่อได้ทำการป้อนสัญญาณไฟตรง เพื่อไปควบคุมขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยจะทำการวิเคราะห์วงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ชนิดต่างๆ ได้แก่ วงจรเวนบริดจ์ ออสซิลเลเตอร์ , วงจรควอทคราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ , วงจรเฟส-ชิฟท์ ออสซิลเลเตอร์ , วงจรควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส และวงจรโคลทิตต์ออสซิลเลเตอร์โดยใช้เจเฟด

### 3.2 วงจรเวนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 3.1 วงจร เวนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์

ใช้ KCL ที่โนด ก. จะได้

$$\frac{V_1 - V_{in}}{R_1} + \frac{V_1 - V_{out}}{R_2} = 0 \quad (3.1)$$

จัดรูปสมการที่ (3.1) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)V_1 - \frac{1}{R_1}V_{in} - \frac{1}{R_2}V_{out} = 0 \quad (3.2)$$

ใช้ KCL ที่ ข1 Non-Inverting จะ ได้

$$sC(V_1 - 0) + \frac{V_1 - 0}{R} + sC(V_1 - V_2) = 0 \quad (3.3)$$

จัดรูปสมการที่ (3.3) จะ ได้

$$V_2 = \left(2 + \frac{1}{sCR}\right)V_1 \quad (3.4)$$

ใช้ KCL ที่ โหนด ข. จะ ได้

$$\frac{V_2 - V_{out}}{R} + sC(V_2 - V_1) = 0 \quad (3.5)$$

จัดรูปสมการที่ (3.5) จะ ได้

$$\left(\frac{1}{R} + sC\right)V_2 - sCV_1 - \frac{1}{R}V_{out} = 0 \quad (3.6)$$

แทนสมการ (3.4) ลงในสมการ (3.6) แล้ว จัดรูปสมการ แสดงดังสมการ

$$V_1 = \left(\frac{sCR}{s^2C^2R^2 + 3sCR + 1}\right)V_{out} \quad (3.7)$$

แทนสมการ (3.7) ลงในสมการ (3.2) จะ ได้

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)\left(\frac{sCR}{s^2C^2R^2 + 3sCR + 1}\right)V_{out} - \frac{1}{R_1}V_{in} - \frac{1}{R_2}V_{out} = 0 \quad (3.8)$$

นำ  $R_2$  คูณตลอดทั้งสองข้าง ของสมการ จะ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right) \left(\frac{sCR}{s^2C^2R^2 + 3sCR + 1}\right) V_{out} - \frac{R_2}{R_1} V_{in} - V_{out} = 0 \quad (3.9)$$

กำหนดให้

$$k = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.10)$$

จะได้ว่า

$$(1+k) \left(\frac{sCR}{s^2C^2R^2 + 3sCR + 1}\right) V_{out} - kV_{in} - V_{out} = 0 \quad (3.11)$$

จัดรูปสมการได้เป็น

$$\left(\left(\frac{(1+k)sCR}{s^2C^2R^2 + 3sCR + 1}\right) - 1\right) V_{out} = kV_{in} \quad (3.12)$$

$$\left(\frac{-s^2C^2R^2 + (k-2)sCR - 1}{s^2C^2R^2 + 3sCR + 1}\right) V_{out} = kV_{in} \quad (3.13)$$

$$C^2R^2s^2V_{out} - (k-2)CRsV_{out} + V_{out} + kC^2R^2s^2V_{in} + 3kCRsV_{in} + kV_{in} = 0 \quad (3.14)$$

ทำการแปลงลาปลาซ เพื่อหาวิเคราะห์ในแกนเวลา จะได้

$$C^2R^2 \frac{d^2V_{out}(t)}{dt^2} - (k-2)CR \frac{dV_{out}(t)}{dt} + V_{out}(t) + kC^2R^2 \frac{d^2V_{in}(t)}{dt^2} + 3kCR \frac{dV_{in}(t)}{dt} + kV_{in}(t) = 0 \quad (3.15)$$

จะเห็นว่า สมการที่ (3.15) อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ อันดับที่สอง ดังนั้นผลเฉลยของสมการ จึงประกอบไปด้วย ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ

กำหนดให้  $k = 2$  จัดรูปสมการที่ (3.15) ใหม่ ได้เป็น

$$C^2R^2 \frac{d^2V_{out}(t)}{dt^2} + V_{out}(t) + 2C^2R^2 \frac{d^2V_{in}(t)}{dt^2} + 6CR \frac{dV_{in}(t)}{dt} + 2V_{in}(t) = 0 \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ

การหาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ทำได้โดยกำหนดให้  $V_{in}(t) = 0$  จะเขียนสมการที่ (3.16) ได้เป็น

$$C^2 R^2 \frac{d^2 V_{out}(t)}{dt^2} + V_{out}(t) = 0 \quad (3.17)$$

แทนสมการอนุพันธ์ ด้วยสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) จะได้ว่า

$$C^2 R^2 m^2 + 1 = 0 \quad (3.18)$$

จะได้ว่า

$$m = \pm j \frac{1}{RC} \quad (3.19)$$

ดังนั้นจะได้ ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ แสดงดังสมการ

$$V_{out\ natural}(t) = C_1 e^{j \frac{1}{RC} t} + C_2 e^{-j \frac{1}{RC} t} \quad (3.20)$$

### หาผลตอบสนองเชิงบังคับ

เนื่องจากสัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นสัญญาณไฟตรง หรือกล่าวได้ว่า สัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น

$$\frac{d^2 V_{in}(t)}{dt^2} = 0, \frac{dV_{in}(t)}{dt} = 0 \quad (3.21)$$

ดังนั้น สมการที่ (3.16) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$C^2 R^2 \frac{d^2 V_{out}(t)}{dt^2} + V_{out}(t) + 2V_{in}(t) = 0 \quad (3.22)$$

เนื่องจากสัญญาณอินพุตเป็น สัญญาณไฟตรง หรือ ค่าคงที่ จึง กำหนดให้ ผลตอบสนองเชิงบังคับมี

ค่า ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out\_force} = A \quad (3.23)$$

แทนค่าลงไปในสมการที่ ( 3.22 ) จะได้ ผลตอบสนองเชิงบังคับ แสดงดังสมการ

$$A = -2V_{in}(t) \quad (3.24)$$

หาผลตอบสนองทั้งหมด

ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่าเท่ากับ ผลรวมของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติและผลตอบสนองเชิงบังคับ แสดงดังสมการ

$$V_{out}(t) = V_{out\_natural}(t) + V_{out\_force}(t) \quad (3.25)$$

แทนค่าผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ จากสมการที่ ( 3.20 ) และผลตอบสนองเชิงบังคับ จากสมการที่ ( 3.24 ) ลงในสมการที่ ( 3.25 ) จะได้ว่า

$$V_{out}(t) = C_1 e^{j\frac{1}{RC}t} + C_2 e^{-j\frac{1}{RC}t} - 2V_{in}(t) \quad (3.26)$$

หาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$

จากสมการที่ ( 3.26 ) พบว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีพจน์ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ซึ่งไม่ทราบค่า จึงต้องดำเนินการหาค่า  $C_1$  และ  $C_2$  โดยอาศัยสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  โดยกำหนดให้

$$V_{out}(0) = V_{INT} \quad (3.27)$$

และทำการหาสมการช่วย อีกหนึ่งสมการ เพื่อช่วยในการแก้สมการหาค่าคงที่  $C_1, C_2$  โดยการหาปริพันธ์ของ สมการที่ ( 3.16 ) ซึ่งเป็นสมการของระบบ ตั้งแต่ ที่เวลา  $t=0$  ถึงเวลาใดๆ [13] แสดงดังสมการ

$$C^2 R^2 \int_0^t \frac{d^2 V_{out}(t)}{dt^2} dt + \int_0^t V_{out}(t) dt + 2C^2 R^2 \int_0^t \frac{d^2 V_{in}(t)}{dt^2} dt + 6CR \int_0^t \frac{dV_{in}(t)}{dt} dt + 2 \int_0^t V_{in}(t) dt = 0 \quad (3.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการจัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

$$C^2R^2 \frac{dV_{out}(t)}{dt} + \int_0^t V_{out}(t)dt + 2C^2R^2 \frac{dV_{in}(t)}{dt} + 6CRV_{in}(t) + 2\int_0^t V_{in}(t)dt = 0 \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.29) พิจารณาสถานะ ที่เวลา  $t=0$  จะได้

$$C^2R^2 \frac{dV_{out}(0)}{dt} + \int_0^0 V_{out}(0)dt + 2C^2R^2 \frac{dV_{in}(0)}{dt} + 6CRV_{in}(0) + 2\int_0^0 V_{in}(0)dt = 0 \quad (3.30)$$

จากสมการที่ (3.30) พบว่า พจน์  $\int_0^0 V_o(0)dt$  , พจน์  $\int_0^0 V_{in}(0)dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และเนื่องจาก

$V_{in}(t)$  มีค่าคงที่ ดังนั้น  $\frac{dV_{in}(0)}{dt}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น จัดรูปสมการที่ (3.30) ได้เป็น

$$C^2R^2 \frac{dV_{out}(0)}{dt} + 6CRV_{in}(0) = 0 \quad (3.31)$$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (3.27) และ (3.31) ใช้ในการหาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ดังนี้

ก. แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ (3.26) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ พบว่า ในสถานะเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  สัญญาณเอาต์พุต จะมีค่าเท่ากับเงื่อนไขเริ่มต้น ของระบบ ดังนั้น

$$V_{out}(0) = V_{INT} = C_1 e^{j\frac{1}{RC}0} + C_2 e^{-j\frac{1}{RC}0} - 2V_{in}(0) \quad (3.32)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.32) แสดงดังสมการ

$$V_{INT} = C_1 + C_2 - 2V_{in}(0) \quad (3.33)$$

ข. จากสมการที่ (3.26) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 1 จะได้ว่า

$$V'_{out}(t) = j\frac{1}{RC}C_1 e^{j\frac{1}{RC}t} - j\frac{1}{RC}C_2 e^{-j\frac{1}{RC}t} \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเงื่อนไขในสมการที่ ( 3.31 ) แทนค่าเงื่อนไข ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ ( 3.34 ) จะได้ว่า

$$V'_{out}(0) = j \frac{1}{RC} C_1 - j \frac{1}{RC} C_2 \quad (3.35)$$

แทนค่า สมการที่ ( 3.35 ) ลงไปในเงื่อนไขในสมการที่ ( 3.31 ) จะได้ว่า

$$j(C_1 - C_2) = -6V_{in}(0) \quad (3.36)$$

จากสมการที่ ( 3.36 ) ใช้คุณสมบัติ การเท่ากัน ของจำนวนเชิงซ้อน พบว่า

$$C_1 - C_2 = 0 \quad (3.37)$$

จากสมการที่ ( 3.37 ) กำหนดให้

$$C_1 = C_2 = C \quad (3.38)$$

แทนค่าคำตอบสมการที่ ( 3.38 ) ลงในสมการที่ ( 3.33 ) ดังนั้น

$$V_{INT} = C + C - 2V_{in}(0) \quad (3.39)$$

เนื่องจาก สัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ซึ่ง  $V_{in}(t) = V_{in}(0)$  ดังนั้น

$$C = \frac{V_{INT} + 2V_{in}(t)}{2} \quad (3.40)$$

จากสมการที่ ( 3.38 ) และ สมการที่ ( 3.40 ) แทนค่า ลงในสมการที่ ( 3.26 ) จะได้ว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่า

$$V_{out}(t) = \left( \frac{V_{INT} + 2V_{in}(t)}{2} \right) e^{j\frac{1}{RC}t} + \left( \frac{V_{INT} + 2V_{in}(t)}{2} \right) e^{-j\frac{1}{RC}t} - 2V_{in}(t) \quad (3.41)$$

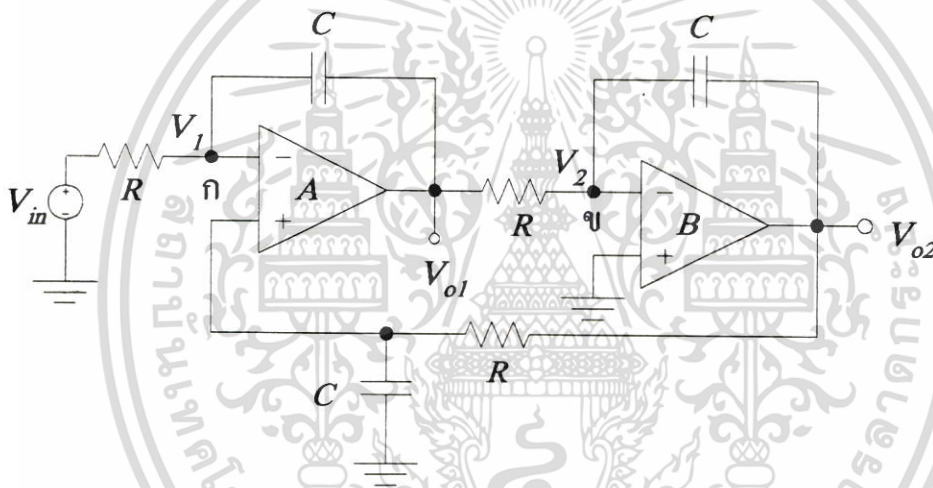
### หรือจัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out}(t) = (V_{INT} + 2V_{in}(t)) \cos\left(\frac{1}{RC}t\right) - 2V_{in}(t) \quad (3.42)$$

พบว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของ วงจร เวนบริคซ์ออสซิลเลเตอร์ นั้น เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ที่มีความถี่เท่ากับ  $\frac{1}{RC}$  rad/s รวมกับ สัญญาณไฟตรงที่ป้อนเข้ามาทางอินพุต โดยที่ ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ นั้นขึ้นกับ สภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  และ ค่าสัญญาณไฟตรงที่ป้อนให้กับระบบ

### 3.3 วงจรควอเทร่าเจอร์ออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 3.2 วงจรควอเทร่าเจอร์ออสซิลเลเตอร์

ใช้ KCL ที่โนด ก. จะได้

$$\frac{V_1 - V_m}{R} + sC(V_1 - V_{o1}) = 0 \quad (3.43)$$

ทำการจัดรูปสมการจะได้ว่า

$$\left(\frac{1+sCR}{R}\right)V_1 - \frac{V_m}{R} - sCV_{o1} = 0 \quad (3.44)$$

ใช้ KCL ที่ ข1 non-inverting ของ Op-Amp A จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$sC(V_1 - 0) + \frac{(V_1 - V_{o2})}{R} = 0 \quad (3.45)$$

ทำการจัดรูปสมการจะได้ว่า

$$V_{o2} = (1 + sCR)V_1 \quad (3.46)$$

ใช้ KCL ที่โนด ข. จะได้

$$\frac{V_2 - V_{o1}}{R} + sC(V_2 - V_{o2}) = 0 \quad (3.47)$$

ขา inverting ของ Op-Amp A เป็น Virtual Ground เนื่องจากขา non-inverting ดังนั้น  $V_2 = 0$   
ทำการจัดรูปสมการจะได้ว่า

$$V_{o1} = -sCRV_{o2} \quad (3.48)$$

แทนสมการที่ (3.46) ลงในสมการที่ (3.44) จะได้ว่า

$$\left( \frac{1 + sCR}{R} \right) \left( \frac{V_{o2}}{1 + sCR} \right) - \frac{V_{in}}{R} - sCV_{o1} = 0 \quad (3.49)$$

แทนสมการที่ (3.48) ลงในสมการที่ (3.49) จะได้ว่า

$$\frac{V_{o2}}{R} - \frac{V_{in}}{R} - sC(-sCRV_{o2}) = 0 \quad (3.50)$$

จัดรูปสมการใหม่ ได้เป็น

$$s^2C^2R^2V_{o2} + V_{o2} - V_{in} = 0 \quad (3.51)$$

ทำการแปลงลาปลาซ เพื่อทำวิเคราะห์ในแกนเวลา จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C^2R^2 \frac{d^2V_{o2}(t)}{dt^2} + V_{o2}(t) - V_{in}(t) = 0 \quad (3.52)$$

จะเห็นว่า สมการที่ ( 3.52 ) อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง ดังนั้นผลเฉลยของสมการ จึงประกอบไปด้วย ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ  
หาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ

การหาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ทำได้โดยกำหนดให้  $V_{in}(t) = 0$  จะเขียนสมการที่ ( 3.52 ) ได้เป็น

$$C^2R^2 \frac{d^2V_{o2}(t)}{dt^2} + V_{o2}(t) = 0 \quad (3.53)$$

แทนสมการอนุพันธ์ ด้วยสมการคุณลักษณะ ( Characteristic Equation ) จะได้ว่า

$$C^2R^2m^2 + 1 = 0 \quad (3.54)$$

จะได้ว่า

$$m = \pm j \frac{1}{RC} \quad (3.55)$$

ดังนั้นจะได้ ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ แสดงดังสมการ

$$V_{o2_{natural}}(t) = C_1 e^{j \frac{1}{RC} t} + C_2 e^{-j \frac{1}{RC} t} \quad (3.56)$$

หาผลตอบสนองเชิงบังคับ

เนื่องจากสัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นสัญญาณไฟตรง หรือกล่าวได้ว่า สัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจึง กำหนดให้ ผลตอบสนองเชิงบังคับมีค่า ดังสมการ

$$V_{o2_{force}} = A \quad (3.57)$$

แทนค่าลงไปในสมการที่ ( 3.52 ) ซึ่งเป็นสมการของระบบ จะได้ว่า ผลตอบสนองเชิงบังคับ มีค่า

$$V_{o2_{force}} = A = V_{in}(t) \quad (3.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาผลตอบสนองทั้งหมด

ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่าเท่ากับ ผลรวมของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติและผลตอบสนองเชิงบังคับ แสดงดังสมการ

$$V_{o2}(t) = V_{o2_{natural}}(t) + V_{o2_{force}}(t) \quad (3.59)$$

แทนค่าผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ จากสมการที่ (3.56) และผลตอบสนองเชิงบังคับ จากสมการที่ (3.58) ลงในสมการที่ (3.59) จะได้ว่า

$$V_{o2}(t) = C_1 e^{j\frac{1}{RC}t} + C_2 e^{-j\frac{1}{RC}t} + V_{in}(t) \quad (3.60)$$

หาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$

จากสมการที่ (3.60) พบว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีพจน์ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ซึ่งไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องดำเนินการหาค่า  $C_1$  และ  $C_2$  โดยอาศัยสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  โดยกำหนดให้

$$V_{out}(0) = V_{INT} \quad (3.61)$$

และหาสมการช่วย อีกหนึ่งสมการ เพื่อช่วยในการแก้สมการหาค่าคงที่  $C_1, C_2$  โดยการหาปริพันธ์ของ สมการที่ (3.52) ซึ่งเป็นสมการของระบบ ตั้งแต่เวลา  $t=0$  ถึงเวลาใดๆ [13] แสดงดังสมการ

$$C^2 R^2 \int_0^t \frac{d^2 V_{o2}(t)}{dt^2} dt + \int_0^t V_{o2}(t) dt - \int_0^t V_{in}(t) dt = 0 \quad (3.62)$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

$$C^2 R^2 \frac{dV_{o2}(t)}{dt} + \int_0^t V_{o2}(t) dt - \int_0^t V_{in}(t) dt = 0 \quad (3.63)$$

จากสมการที่ (3.63) พิจารณาสภาวะ ที่เวลา  $t=0$  จะได้ว่า

$$C^2 R^2 \frac{dV_{o2}(0)}{dt} + \int_0^0 V_{o2}(0) dt - \int_0^0 V_{in}(0) dt = 0 \quad (3.64)$$

จากสมการที่ (3.64) จะเห็นว่า พจน์  $\int_0^0 V_{o2}(0) dt$  , พจน์  $\int_0^0 V_{in}(0) dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น  
เขียนสมการที่ (3.64) ได้เป็น

$$C^2 R^2 \frac{dV_{o2}(0)}{dt} = 0 \quad (3.65)$$

หรือจัดรูปสมการที่ (3.65) ได้เป็น

$$\frac{dV_o(0)}{dt} = 0 \quad (3.66)$$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (3.61) และ (3.66) ใช้ในการหาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ดังนี้

ก. แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ (3.60) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ พบว่า ในสภาวะเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  สัญญาณเอาต์พุต จะมีค่าเท่ากับเงื่อนไขเริ่มต้น ของระบบ ดังนี้

$$V_{o2}(0) \equiv V_{INT} = C_1 e^{j\frac{1}{RC}0} + C_2 e^{-j\frac{1}{RC}0} + V_{in}(0) \quad (3.67)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.67) แสดงดังสมการ

$$V_{INT} = C_1 + C_2 + V_{in}(0) \quad (3.68)$$

ข. จากสมการที่ (3.60) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 1 จะได้ว่า

$$V'_{o2}(t) = j\frac{1}{RC} C_1 e^{j\frac{1}{RC}t} - j\frac{1}{RC} C_2 e^{-j\frac{1}{RC}t} \quad (3.69)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (3.66) แทนค่าเงื่อนไข ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ (3.69) พบว่า ในสภาวะเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุต ที่เวลา  $t=0$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V'_{o2}(0) = j \frac{1}{RC} C_1 e^{j \frac{1}{RC} 0} - j \frac{1}{RC} C_2 e^{-j \frac{1}{RC} 0} = 0 \quad (3.70)$$

แทนค่า สมการที่ (3.70) ลงไปในเงื่อนไขในสมการที่ (3.66) จะได้ว่า

$$j(C_1 - C_2) = 0 \quad (3.71)$$

จากสมการที่ (3.71) ใช้คุณสมบัติ การเท่ากัน ของจำนวนเชิงซ้อน พบว่า

$$C_1 - C_2 = 0 \quad (3.72)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.72) จะได้ว่า

$$C_1 = C_2 \quad (3.73)$$

จากสมการที่ (3.73) กำหนดให้

$$C_1 = C_2 = C \quad (3.74)$$

แทนค่าคำตอบสมการที่ (3.74) ลงในสมการที่ (3.68) ดังนั้น

$$V_{INT} = C + C + V_{in}(0) \quad (3.75)$$

เนื่องจาก สัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ซึ่ง  $V_{in}(t) = V_{in}(0)$  ดังนั้น

$$C = \frac{V_{INT} - V_{in}(t)}{2} \quad (3.76)$$

จากสมการที่ (3.74) และ สมการที่ (3.76) แทนค่า ลงในสมการที่ (3.60) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ จะได้ว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่า

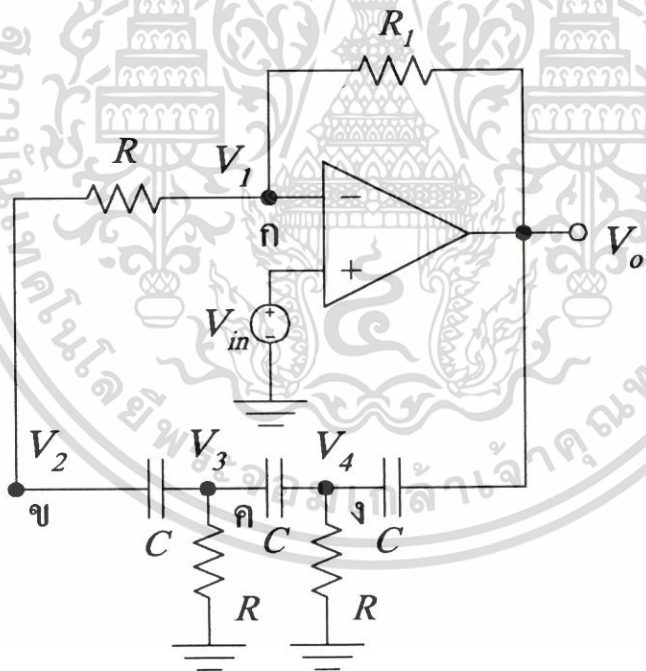
$$V_{o2}(t) = \left( \frac{V_{INT} - V_{in}(t)}{2} \right) e^{j\frac{1}{RC}t} + \left( \frac{V_{INT} - V_{in}(t)}{2} \right) e^{-j\frac{1}{RC}t} + V_{in}(t) \quad (3.77)$$

หรือจัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

$$V_{o2}(t) = (V_{INT} - V_{in}(t)) \cos\left(\frac{1}{RC}t\right) + V_{in}(t) \quad (3.78)$$

จะเห็นว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของ วงจร ควอตราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ นั้น เป็นสัญญาณ คลื่นรูปไซน์ ที่มีความถี่เท่ากับ  $\frac{1}{RC} \text{ rad/s}$  รวมกับ สัญญาณ ไฟตรงที่ป้อนเข้ามาทางอินพุต โดยที่ ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ นั้น ขึ้นกับ สภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  และ ค่าสัญญาณ ไฟตรงที่ป้อนให้กับระบบ

### 3.4 วงจรเฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 3.3 วงจรเฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์

เนื่องจากขา inverting และขา non-inverting ของ Op-Amp เป็น Virtual Voltage ดังนั้น

$$V_1 = V_{in} \quad (3.79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ KCL ที่ โหนด ก. ถึง โหนด ง. ตามลำดับจะได้ว่า

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}\right)V_{in} - \frac{1}{R_1}V_o - \frac{1}{R}V_2 = 0 \quad (3.80)$$

$$\left(\frac{1}{R} + sC\right)V_2 - \frac{1}{R}V_{in} - sCV_3 = 0 \quad (3.81)$$

$$\left(\frac{1}{R} + 2sC\right)V_3 - sCV_2 - sCV_4 = 0 \quad (3.82)$$

$$\left(\frac{1}{R} + 2sC\right)V_4 - sCV_3 - sCV_o = 0 \quad (3.83)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.80) จะได้ว่า

$$V_2 = (1+k)V_{in} - kV_o \quad (3.84)$$

โดยที่

$$k = \frac{R}{R_1} \quad (3.85)$$

แทนสมการที่ (3.84) ลงในสมการที่ (3.81) จะได้ว่า

$$\left(\frac{1}{R} + sC\right)\left((1+k)V_{in} - kV_o\right) - \frac{1}{R}V_{in} - sCV_3 = 0 \quad (3.86)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\left(\frac{k(1+sCR) + sCR}{R}\right)V_{in} - \frac{k(1+sCR)}{R}V_o = sCV_3 \quad (3.87)$$

แทนสมการที่ (3.82) ลงในสมการที่ (3.83) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{1}{R} + 2sC\right) \left(\frac{1}{sC} \cdot \left(\left(\frac{1}{R} + 2sC\right)V_3 - sCV_2\right)\right) - sCV_3 - sCV_o = 0 \quad (3.88)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\left(\frac{3s^2C^2R^2 + 4sCR + 1}{sCR^2}\right)V_3 - \left(\frac{2sCR + 1}{R}\right)V_2 - sCV_o = 0 \quad (3.89)$$

แทนสมการที่ (3.84) , (3.87) ลงในสมการ (3.89) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} &\left(\frac{3s^2C^2R^2 + 4sCR + 1}{sCR^2}\right) \left(\frac{1}{sC} \cdot \left(\left(\frac{k(1+sCR) + sCR}{R}\right)V_{in} - \frac{k(1+sCR)}{R}V_o\right)\right) \\ &- \left(\frac{2sCR + 1}{R}\right) \left((1+k)V_{in} - kV_o\right) - sCV_o = 0 \end{aligned} \quad (3.90)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.90) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} &\left[\left(1 + \frac{1}{k}\right)s^3C^3R^3 + 6s^2C^2R^2 + 5sCR + 1\right]V_o \\ &+ \left[\left(\frac{5+5k}{k}\right)s^3C^3R^3 + \left(\frac{5+8k}{k}\right)s^2C^2R^2 + \left(\frac{1+5k}{k}\right)sCR + 1\right]V_{in} = 0 \end{aligned} \quad (3.91)$$

ทำการแปลงลาปลาซเพื่อทำวิเคราะห์ในแกนเวลา จะได้ว่า

$$\begin{aligned} &\left[\left(1 + \frac{1}{k}\right)C^3R^3 \frac{d^3V_o(t)}{dt^3} + 6C^2R^2 \frac{d^2V_o(t)}{dt^2} + 5sCR \frac{dV_o(t)}{dt} + V_o(t)\right] \\ &+ \left[\left(\frac{5+5k}{k}\right)C^3R^3 \frac{d^3V_{in}(t)}{dt^3} + \left(\frac{5+8k}{k}\right)C^2R^2 \frac{d^2V_{in}(t)}{dt^2} + \left(\frac{1+5k}{k}\right)CR \frac{dV_{in}(t)}{dt} + V_{in}(t)\right] = 0 \end{aligned} \quad (3.92)$$

จะเห็นว่า สมการที่ (3.92) อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 ดังนั้นผลเฉลยของสมการ จึงประกอบไปด้วย ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ

การหาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ทำได้โดยกำหนดให้  $V_{in}(t) = 0$  จะเขียนสมการที่ (3.92) ได้เป็น

$$\left(1 + \frac{1}{k}\right) C^3 R^3 \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} + 6C^2 R^2 \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + 5CR \frac{dV_o(t)}{dt} + V_o(t) = 0 \quad (3.93)$$

จะเห็นว่าสมการที่ (3.93) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 ถ้าเราเขียนรูปทั่วไปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 แสดงดังสมการ

$$A \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} + B \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + C \frac{dV_o(t)}{dt} + DV_o(t) = 0 \quad (3.94)$$

แทนสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 ด้วยสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) จะได้ดังสมการ

$$Am^3 + Bm^2 + Cm + D = 0 \quad (3.95)$$

และถ้าหากต้องการหาคำตอบของสมการเป็นสัญชาตญาณคลื่นรูปไซน์ จึงต้องกำหนดผลเฉลยของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = C_1 e^{m_1 t} + C_2 e^{m_2 t} + C_3 e^{m_3 t} \quad (3.96)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} m_1 &= j\omega \\ m_2 &= -j\omega \\ m_3 &= -k_1 \end{aligned} \quad (3.97)$$

ดังนั้น สมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) จะอยู่ในรูป

$$(m - j\omega)(m + j\omega)(m + k_1) = 0 \quad (3.98)$$

$$m^3 + k_1 m^2 - \omega^2 m - k_1 \omega^2 = 0 \quad (3.99)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (3.95) กับสมการที่ (3.99) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}k_1 &= B/A \\ \omega^2 &= -C/A \\ k_1\omega^2 &= -D/A\end{aligned}\quad (3.100)$$

ดังนั้น หากผลตอบสนองเชิงธรรมชาติของวงจรเฟสชิฟท์ ออสซิลเลเตอร์ โดยใช้วิธีเทียบสัมประสิทธิ์ แสดงดังสมการ

$$k_1 = \frac{6C^2R^2}{\left(1 + \frac{1}{k}\right)C^3R^3} \quad (3.101)$$

$$\omega^2 = \frac{5CR}{\left(1 + \frac{1}{k}\right)C^3R^3} \quad (3.102)$$

$$k_1\omega^2 = \frac{6C^2R^2}{\left(1 + \frac{1}{k}\right)C^3R^3} \cdot \frac{5CR}{\left(1 + \frac{1}{k}\right)C^3R^3} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.103)$$

จากสมการ (3.103) แก้สมการหาค่า  $k$  จะได้ว่า

$$k = \frac{1}{29} \quad (3.104)$$

แทนค่า ลงในสมการที่ (3.101) และ (3.102) จะได้ว่า

$$k_1 = \frac{1}{5CR}, \quad \omega^2 = -\frac{1}{6C^2R^2} \quad (3.105)$$

ดังนั้นจะได้ ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ แสดงดังสมการ

$$V_{o_{natural}}(t) = C_1e^{j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} + C_2e^{-j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} + C_3e^{\frac{1}{5RC}t} \quad (3.106)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หาผลตอบสนองเชิงบังคับ

เนื่องจากสัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นสัญญาณไฟตรง หรือกล่าวได้ว่า สัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น

$$\frac{d^3V_{in}(t)}{dt^3}, \frac{d^2V_{in}(t)}{dt^2}, \frac{dV_{in}(t)}{dt} = 0 \quad (3.107)$$

ดังนั้น สมการที่ (3.92) ซึ่งเป็นสมการของระบบทั้งหมด จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$\left(1 + \frac{1}{k}\right)C^3R^3 \frac{d^3V_o(t)}{dt^3} + 6C^2R^2 \frac{d^2V_o(t)}{dt^2} + 5CR \frac{dV_o(t)}{dt} + V_o(t) + V_{in}(t) = 0 \quad (3.108)$$

เนื่องจากสัญญาณอินพุตเป็น สัญญาณไฟตรง หรือ ค่าคงที่ ดังนั้นจึง กำหนดให้ ผลตอบสนองเชิงบังคับมีค่า ดังสมการ

$$V_{o_{force}} = A \quad (3.109)$$

แทนค่าลงไปในสมการที่ (3.108) จะได้ว่า ผลตอบสนองเชิงบังคับ มีค่าแสดงดังสมการ

$$A = -V_{in}(t) \quad (3.110)$$

### หาผลตอบสนองทั้งหมด

ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่าเท่ากับ ผลรวมของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติและผลตอบสนองเชิงบังคับ แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = V_{o_{natural}}(t) + V_{o_{force}}(t) \quad (3.111)$$

แทนค่าผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ จากสมการที่ (3.106) และผลตอบสนองเชิงบังคับ จากสมการที่ (3.110) ลงในสมการที่ (3.111) จะได้ว่า

$$V_o(t) = C_1 e^{j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} + C_2 e^{-j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} + C_3 e^{\frac{1}{5RC}t} - V_{in}(t) \quad (3.112)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$

จากสมการที่ ( 3.102 ) จะเห็นว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีพจน์ค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ซึ่งไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องดำเนินการหาค่า  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  โดยอาศัยสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  โดยกำหนดให้

$$V_o(0) = V_{INT} \quad (3.113)$$

และทำการหาสมการช่วย อีกหนึ่งสมการ เพื่อช่วยในการแก้สมการหาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  โดยทำการหาปริพันธ์ ของ สมการที่ ( 3.92 ) ซึ่งเป็นสมการของระบบทั้งหมด ตั้งแต่เวลา  $t=0$  ถึงเวลาใดๆ [13] จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \left[ \left(1 + \frac{1}{k}\right) C^3 R^3 \int_0^t \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} dt + 6C^2 R^2 \int_0^t \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} dt + 5CR \int_0^t \frac{dV_o(t)}{dt} dt + \int_0^t V_o(t) dt \right] \\ & + \left[ \left(\frac{5+5k}{k}\right) C^3 R^3 \int_0^t \frac{d^3 V_{in}(t)}{dt^3} dt + \left(\frac{5+8k}{k}\right) C^2 R^2 \int_0^t \frac{d^2 V_{in}(t)}{dt^2} dt + \left(\frac{1+5k}{k}\right) CR \int_0^t \frac{dV_{in}(t)}{dt} dt + \int_0^t V_{in}(t) dt \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.114)$$

จากสมการที่ ( 3.104 ) แทนค่า  $k = \frac{1}{29}$  ลงไปในสมการที่ ( 3.114 ) และทำการจัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

$$\begin{aligned} & \left[ 30C^3 R^3 \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + 6C^2 R^2 \frac{dV_o(t)}{dt} + 5CR V_o(t) + \int_0^t V_o(t) dt \right] \\ & + \left[ 150C^3 R^3 \frac{d^2 V_{in}(t)}{dt^2} + 153C^2 R^2 \frac{dV_{in}(t)}{dt} + 34CR V_{in}(t) + \int_0^t V_{in}(t) dt \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.115)$$

จากสมการที่ ( 3.115 ) สภาวะ ณ เวลา  $t=0$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \left[ 30C^3 R^3 \frac{d^2 V_o(0)}{dt^2} + 6C^2 R^2 \frac{dV_o(0)}{dt} + 5CR V_o(0) + \int_0^0 V_o(0) dt \right] \\ & + \left[ 150C^3 R^3 \frac{d^2 V_{in}(0)}{dt^2} + 153C^2 R^2 \frac{dV_{in}(0)}{dt} + 34CR V_{in}(0) + \int_0^0 V_{in}(0) dt \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.116)$$

จากสมการที่ (3.116) จะเห็นว่า พจน์  $\int_0^0 V_o(0)dt$  , พจน์  $\int_0^0 V_{in}(0)dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และเนื่อง  
จาก  $V_{in}(t)$  มีค่าคงที่ ดังนั้น  $\frac{d^2V_{in}(0)}{dt^2}$  ,  $\frac{dV_{in}(0)}{dt}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น เขียนสมการที่ (3.116)  
ได้เป็น

$$30C^3R^3 \frac{d^2V_o(0)}{dt^2} + 6C^2R^2 \frac{dV_o(0)}{dt} + 5CRV_o(0) + 34CRV_{in}(0) = 0 \quad (3.117)$$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (3.113) และ (3.117) ใช้ในการหาค่าคงที่  $C_1$  ,  $C_2$  และ  $C_3$  ดังนี้

ก. แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ (3.112) ซึ่งเป็นสมการ  
ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ดังนั้นจะได้ว่า ในสภาวะเริ่มต้น ณ.ที่เวลา  $t=0$  สัญญาณ เอาท์พุท  
จะมีค่าเท่ากับเงื่อนไขเริ่มต้น ของระบบ ดังนั้น

$$V_o(0) = V_{INT} = C_1 e^{j\frac{1}{\sqrt{6RC}}0} + C_2 e^{-j\frac{1}{\sqrt{6RC}}0} + C_3 e^{\frac{1}{5RC}0} - V_{in}(t) \quad (3.118)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.118) แสดงดังสมการ

$$V_{INT} = C_1 + C_2 + C_3 - V_{in}(t) \quad (3.119)$$

ข. จากสมการที่ (3.112) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ทำการหา  
อนุพันธ์ครั้งที่ 1 จะได้ว่า

$$V_o'(t) = j\frac{1}{\sqrt{6RC}}C_1 e^{j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} - j\frac{1}{\sqrt{6RC}}C_2 e^{-j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} + \frac{1}{5RC}C_3 e^{\frac{1}{5RC}t} \quad (3.120)$$

และ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 2 จะได้ว่า

$$V_o''(t) = -\frac{1}{6R^2C^2}C_1 e^{j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} + \frac{1}{6R^2C^2}C_2 e^{-j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} + \frac{1}{25R^2C^2}C_3 e^{\frac{1}{5RC}t} \quad (3.121)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (3.117) แทนค่าเงื่อนไข ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าวลงไปในสมการที่  
(3.112) , (3.120) และ (3.121) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o(0) = C_1 + C_2 + C_3 - V_{in}(0) \quad (3.122)$$

$$V_o'(0) = j\frac{1}{\sqrt{6RC}}C_1 - j\frac{1}{\sqrt{6RC}}C_2 + \frac{1}{5RC}C_3 \quad (3.123)$$

$$V_o''(0) = -\frac{1}{6R^2C^2}C_1 + \frac{1}{6R^2C^2}C_2 + \frac{1}{25R^2C^2}C_3 \quad (3.124)$$

แทนค่า สมการที่ (3.122), (3.123) และ (3.124) ลงไปในสมการที่ (3.117) จะได้ว่า

$$\left(10C_2 + \frac{37}{5}C_3\right) + j(\sqrt{6}C_1 - \sqrt{6}C_2) = -29V_{in}(0) \quad (3.125)$$

จากสมการที่ (3.125) ใช้คุณสมบัติ การเท่ากัน ของจำนวนเชิงซ้อน พบว่า

$$10C_2 + \frac{37}{5}C_3 = -29V_{in}(0) \quad (3.126)$$

$$\sqrt{6}C_1 - \sqrt{6}C_2 = 0 \quad (3.127)$$

จากสมการที่ (3.119), (3.126) และ (3.127) ทำการแก้สมการ หาค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  และ เนื่องจาก สัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ซึ่ง  $V_{in}(t) = V_{in}(0)$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$C_1 = C_2 = \frac{910V_{in}(t) + 185V_{INT}}{24} \quad (3.128)$$

$$C_3 = -\left(\frac{340V_{in}(t) + 50V_{INT}}{24}\right) \quad (3.129)$$

แทนค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ลงในสมการที่ (3.112) ดังนั้นจะได้ว่าผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่า

$$V_o(t) = \left(\frac{910V_{in}(t) + 185V_{INT}}{24}\right) e^{j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} + \left(\frac{910V_{in}(t) + 185V_{INT}}{24}\right) e^{-j\frac{1}{\sqrt{6RC}}t} - \left(\frac{340V_{in}(t) + 50V_{INT}}{24}\right) e^{\frac{1}{5RC}t} - V_{in}(t) \quad (3.130)$$

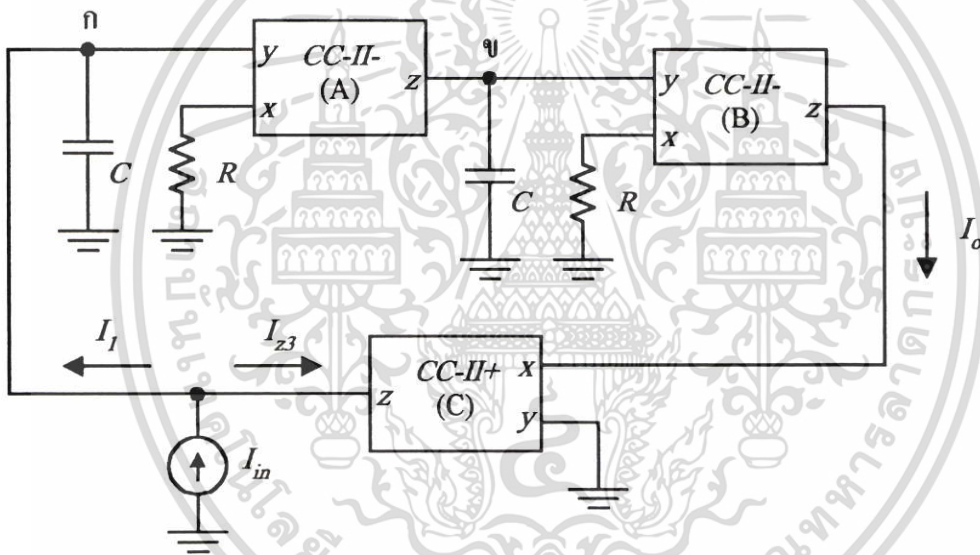
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือจัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = \left( \frac{910V_m(t) + 185V_{INT}}{24} \right) \cos\left( \frac{1}{\sqrt{6RC}} t \right) - \left( \frac{340V_m(t) + 50V_{INT}}{24} \right) e^{\frac{1}{5RC} t} - V_m(t) \quad (3.131)$$

จะเห็นว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของ วงจร เฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์ นั้น เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ร่วมกับ สัญญาณไฟตรงที่ป้อนเข้ามาทางอินพุต และมีผลของของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ที่มีค่าลดลงสู่ศูนย์ แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เมื่อเวลาผ่านไปโดยที่ ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ นั้น สามารถควบคุมได้ โดยสัญญาณไฟตรง

### 3.5 วงจรควอเทร่าเจอร์ออสซิลเลเตอร์ ในโทมครระแสด



รูปที่ 3.4 วงจรควอเทร่าเจอร์ออสซิลเลเตอร์ในโทมครระแสด

วงจรสายพานกระแส รุ่นที่ 2 เป็นอุปกรณ์แบบ 3 ขั้ว ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ เชนเมตริกซ์ ของตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (3.132)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ ( 3.132 ) อธิบายได้ว่า ที่อินพุตโหนด  $x$  จะมีค่าความต้านทานอินพุตต่ำ และ ที่อินพุตโหนด  $y$  จะมีค่าความต้านทานอินพุตสูง ดังนั้นกระแส  $I_y$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับค่ากระแส  $I_x$  จะถูกสะท้อนไปปรากฏที่โหนดเอาต์พุต  $z$  ที่มีค่าความต้านทานเอาต์พุตสูง

ส่วนเครื่องหมาย  $\pm$  แสดงถึงขั้วของกระแสเอาต์พุต เมื่อเทียบกับกระแสอินพุต ถ้ามีเครื่องหมายเป็น  $+$  ก็จะเป็นการบอกว่า กระแสเอาต์พุต และ กระแสอินพุตมีทิศทางเหมือนกัน กล่าวคือ ไหลเข้าทั้งคู่ หรือ ไหลออกทั้งคู่

จากความ ความสัมพันธ์ของวงจรสายพานรุ่นที่ 2 ทำให้วิเคราะห์ วงจรควอเทตราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ ที่ทำงานในโหมดกระแส ได้ดังนี้

พิจารณา วงจรสะท้อนกระแส C จะได้ว่า

$$I_{x3} = I_o = I_{z3} \quad (3.133)$$

พิจารณาที่ โหนด ก. เนื่องจากกระแส  $I_{y1} = 0$  จะได้ว่า

$$I_1 = I_{in} - I_o \quad (3.134)$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$V_{y1} = \frac{I_{in} - I_o}{sC} \quad (3.135)$$

เนื่องจาก  $V_{x1} = V_{y1}$  และ  $I_{z1} = -I_{x1}$  ดังนั้น

$$I_{z1} = -\frac{I_{in} - I_o}{sCR} \quad (3.136)$$

พิจารณาที่ โหนด ข. เนื่องจากกระแส  $I_{y2} = 0$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$V_{y2} = -\frac{I_{in} - I_o}{s^2 C^2 R} \quad (3.137)$$

เนื่องจาก  $V_{x2} = V_{y2}$  และ  $I_{z2} = -I_{x2}$  ดังนั้น

$$I_{z2} = \frac{I_{in} - I_o}{s^2 C^2 R^2} \quad (3.138)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก  $I_{z2} = I_{x3} = I_o$  ดังนั้น

$$I_o = \frac{I_{in} - I_o}{s^2 C^2 R^2} \quad (3.139)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$s^2 C^2 R^2 I_o + I_o - I_{in} = 0 \quad (3.140)$$

ทำการแปลงลาปลาซเพื่อทำวิเคราะห์ในแกนเวลา จะได้ว่า

$$C^2 R^2 \frac{d^2 I_o(t)}{dt^2} + I_o(t) - I_{in}(t) = 0 \quad (3.141)$$

จะเห็นว่า สมการที่ (3.141) อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 2 ดังนั้นผลเฉลยของสมการ จึงประกอบด้วย ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ

หาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ

การหาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ทำได้โดยกำหนดให้  $I_{in}(t) = 0$  จะเขียนสมการที่ (3.141) ได้เป็น

$$C^2 R^2 \frac{d^2 I_o(t)}{dt^2} + I_o(t) = 0 \quad (3.142)$$

แทนสมการอนุพันธ์ ด้วยสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) จะได้ว่า

$$C^2 R^2 m^2 + 1 = 0 \quad (3.143)$$

จะได้ว่า

$$m = \pm j \frac{1}{RC} \quad (3.144)$$

ดังนั้นจะได้ ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ เป็น

$$I_{o_{natural}}(t) = C_1 e^{j \frac{1}{RC} t} + C_2 e^{-j \frac{1}{RC} t} \quad (3.145)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หาผลตอบสนองเชิงบังคับ

เนื่องจากสัญญาณ  $I_{in}(t)$  เป็นสัญญาณไฟตรง หรือ กล่าวได้ว่า สัญญาณ  $I_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ จึงกำหนดให้ ผลตอบสนองเชิงบังคับมีค่า ดังสมการ

$$I_{o_{force}} = A \quad (3.146)$$

แทนค่าลงไปในสมการที่ (3.141) ซึ่งเป็นสมการของระบบ จะได้ว่า ผลตอบสนองเชิงบังคับ มีค่า

$$A = I_{in}(t) \quad (3.147)$$

### หาผลตอบสนองทั้งหมด

ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่าเท่ากับ ผลรวมของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติและผลตอบสนองเชิงบังคับ แสดงดังสมการ

$$I_o(t) = I_{o_{natural}}(t) + I_{o_{force}}(t) \quad (3.148)$$

แทนค่าผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ จากสมการที่ (3.145) และผลตอบสนองเชิงบังคับ จากสมการที่ (3.147) ลงในสมการที่ (3.148) จะได้ว่า

$$I_o(t) = C_1 e^{\frac{1}{RC}t} + C_2 e^{-\frac{1}{RC}t} + I_{in}(t) \quad (3.149)$$

### หาค่าคงที่ $C_1$ และ $C_2$

จากสมการที่ (3.149) จะเห็นว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีพจน์ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ซึ่งไม่ทราบค่า จึงต้องดำเนินการหาค่า  $C_1$  และ  $C_2$  โดยอาศัยสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  โดยกำหนดให้

$$I_o(0) = I_{INT} \quad (3.150)$$

และหาสมการช่วย อีกหนึ่งสมการ เพื่อช่วยในการแก้สมการหาค่าคงที่  $C_1, C_2$  โดยการหาปริพันธ์ของ สมการที่ (3.141) ซึ่งเป็น สมการของระบบ ตั้งแต่เวลา  $t=0$  ถึงเวลาใดๆ [13] จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C^2 R^2 \int_0^t \frac{d^2 I_o(t)}{dt^2} dt + \int_0^t I_o(t) dt - \int_0^t I_{in}(t) dt = 0 \quad (3.151)$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

$$C^2 R^2 \frac{dI_o(t)}{dt} + \int_0^t I_o(t) dt - \int_0^t I_{in}(t) dt = 0 \quad (3.152)$$

จากสมการที่ (3.152) สภาวะ ณ.เวลา  $t=0$  จะได้ว่า

$$C^2 R^2 \frac{dI_o(0)}{dt} + \int_0^0 I_o(0) dt - \int_0^0 I_{in}(0) dt = 0 \quad (3.153)$$

จากสมการที่ (3.153) จะเห็นว่า พจน์  $\int_0^0 I_o(0) dt$ , พจน์  $\int_0^0 I_{in}(0) dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น จัดรูป สมการที่ (3.153) ได้เป็น

$$C^2 R^2 \frac{dI_o(0)}{dt} = 0 \quad (3.154)$$

หรือเขียนสมการที่ (3.154) ได้เป็น

$$\frac{dI_o(0)}{dt} = 0 \quad (3.155)$$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (3.150) และ (3.155) ในการหาค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ดังนี้

ก. แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ (3.149) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ พบว่า ในสภาวะเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  สัญญาณเอาต์พุต จะมีค่าเท่ากับเงื่อนไขเริ่มต้น ของระบบ ดังนี้

$$I_o(0) = I_{INT} = C_1 e^{j\frac{1}{RC}0} + C_2 e^{-j\frac{1}{RC}0} + I_{in}(0) \quad (3.156)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.156) แสดงดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{INT} = C_1 + C_2 + I_{in}(0) \quad (3.157)$$

ข. จากสมการที่ (3.149) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 1 จะได้ว่า

$$I'_o(t) = j \frac{1}{RC} C_1 e^{j \frac{1}{RC} t} - j \frac{1}{RC} C_2 e^{-j \frac{1}{RC} t} \quad (3.158)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (3.155) แทนค่าเงื่อนไข ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าวลงไปในสมการที่ (3.158) จะได้ว่า ในสภาวะเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุต ที่เวลา  $t=0$  ดังนั้น

$$I'_o(0) = j \frac{1}{RC} C_1 e^{j \frac{1}{RC} 0} - j \frac{1}{RC} C_2 e^{-j \frac{1}{RC} 0} \quad (3.159)$$

แทนค่า สมการที่ (3.159) ลงไปในเงื่อนไขในสมการที่ (3.155) จะได้ว่า

$$j(C_1 - C_2) = 0 \quad (3.160)$$

จากสมการที่ (3.160) ใช้คุณสมบัติ การเท่ากัน ของจำนวนเชิงซ้อน พบว่า

$$C_1 - C_2 = 0 \quad (3.161)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.161) จะได้ว่า

$$C_1 = C_2 \quad (3.162)$$

จากสมการที่ (3.162) กำหนดให้

$$C_1 = C_2 = C \quad (3.163)$$

แทนค่าคำตอบสมการที่ (3.163) ลงในสมการที่ (3.157) ดังนั้น

$$I_{INT} = C + C + I_{in}(0) \quad (3.164)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ เนื่องจาก สัญญาณ  $I_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ซึ่ง  $I_{in}(t) = I_{in}(0)$  ดังนั้น

$$C = \frac{I_{INT} - I_{in}(t)}{2} \quad (3.165)$$

จากสมการที่ (3.163) และ สมการที่ (3.165) แทนค่า ลงในสมการที่ (3.149) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ จะได้ว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่า

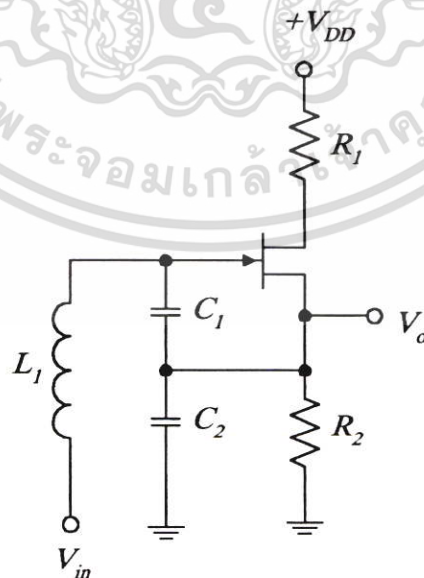
$$I_o(t) = \left( \frac{I_{INT} - I_{in}(t)}{2} \right) e^{j\frac{1}{RC}t} + \left( \frac{I_{INT} - I_{in}(t)}{2} \right) e^{-j\frac{1}{RC}t} + I_{in}(t) \quad (3.166)$$

หรือเขียนสมการใหม่ แสดงคั้งสมการ

$$I_o(t) = (I_{INT} - I_{in}(t)) \cos\left(\frac{1}{RC}t\right) + I_{in}(t) \quad (3.167)$$

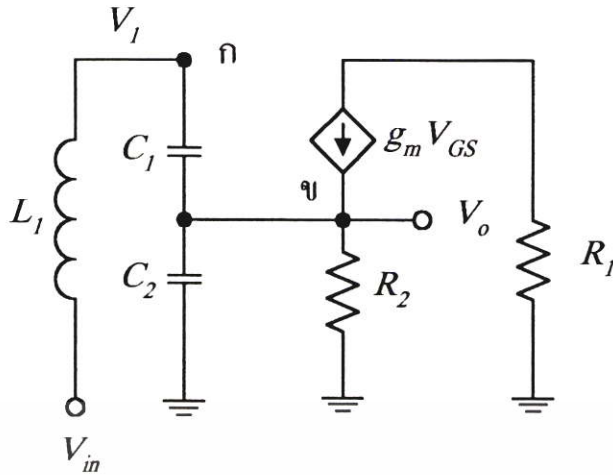
จะเห็นว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของ วงจร ควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ในโหมดกระแส นั้น เป็น สัญญาณกระแสคลื่นรูปไซน์ ที่มีความถี่เท่ากับ  $\frac{1}{RC}$  rad/s รวมกับ กระแสไฟตรงที่ป้อนเข้ามาทางอินพุต โดยที่ ขนาด สัญญาณกระแสคลื่นรูปไซน์ ขึ้นกับ สภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  และ ค่าสัญญาณไฟตรงที่ป้อนให้กับระบบ

### 3.6 วงจรโคลทิตต์ออสซิลเลเตอร์โดยใช้ เจเฟท



#### รูปที่ 3.5 วงจรโคลทิตท์ ออสซิลเลเตอร์ โดยใช้ เจเฟท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลทาง AC ของ วงจร โคลทพิทท์ ออสซิลเลเตอร์ โดยใช้ เจเฟต

ใช้ KCL ที่โนด ก. จะได้ว่า

$$\frac{V_1 - V_{in}}{sL_1} + (V_1 - V_o)sC_1 = 0 \quad (3.168)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.168) จะได้ว่า

$$V_1 = \frac{s^2 L_1 C_1}{1 + s^2 L_1 C_1} V_o + \frac{V_{in}}{1 + s^2 L_1 C_1} \quad (3.169)$$

ใช้ KCL ที่โนด ข. จะได้ว่า

$$sC_2 V_o + \frac{V_o}{R_2} + (V_o - V_1)sC_1 = g_m V_{GS} \quad (3.170)$$

$$V_o \left( sC_2 + \frac{1}{R_2} + sC_1 \right) - sC_1 V_1 = g_m (V_1 - V_o) \quad (3.171)$$

$$V_o \left( sC_2 + \frac{1}{R_2} + sC_1 + g_m \right) = g_m V_1 + sC_1 V_1 \quad (3.172)$$

แทนค่า  $V_1$  จากสมการที่ (3.169) ลงในสมการที่ (3.171) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o \left[ sC_2 + \frac{1}{R_2} + sC_1 + g_m \right] = \frac{s^2 L_1 C_1 g_m}{1 + s^2 L_1 C_1} V_o + \frac{s^3 L_1 C_1^2}{1 + s^2 L_1 C_1} V_o + \frac{V_{in}}{1 + s^2 L_1 C_1} \quad (3.173)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ ( 3.173 ) จะได้ว่า

$$V_o \left[ s^3 L_1 C_1 C_2 + s^2 \left( \frac{L_1 C_1}{R_2} \right) + s(C_1 + C_2) + \left( \frac{1}{R_2} + g_m \right) \right] = V_{in} \quad (3.174)$$

ทำการแปลงลาปลาซเพื่อทำวิเคราะห์ในแกนเวลา จะได้ว่า

$$L_1 C_1 C_2 \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} + \frac{L_1 C_1}{R_2} \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + (C_1 + C_2) \frac{dV_o(t)}{dt} + \left( \frac{1}{R_2} + g_m \right) V_o(t) = V_{in}(t) \quad (3.175)$$

จะเห็นว่า สมการที่ ( 3.175 ) อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 ดังนั้นผลเฉลยของสมการ จึงประกอบไปด้วย ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ และ ผลตอบสนองเชิงบังคับ

**หาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ**

การหาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ทำได้โดยกำหนดให้  $V_{in}(t) = 0$  จะเขียนสมการที่ ( 3.175 ) ได้เป็น

$$L_1 C_1 C_2 \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} + \frac{L_1 C_1}{R_2} \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + (C_1 + C_2) \frac{dV_o(t)}{dt} + \left( \frac{1}{R_2} + g_m \right) V_o(t) = 0 \quad (3.176)$$

จะเห็นว่าสมการที่ ( 3.176 ) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 ถ้าเราเขียนรูปทั่วไปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 แสดงดังสมการ

$$A \frac{d^3 V_o(t)}{dt^3} + B \frac{d^2 V_o(t)}{dt^2} + C \frac{dV_o(t)}{dt} + D V_o(t) = 0 \quad (3.177)$$

แทนสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 ด้วยสมการคุณลักษณะ ( Characteristic Equation ) จะได้ดังสมการ

$$Am^3 + Bm^2 + Cm + D = 0 \quad (3.178)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าต้องการให้คำตอบของสมการเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ จึงต้องกำหนดผลเฉลย ของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = Pe^{m_1 t} + Qe^{m_2 t} + Re^{m_3 t} \quad (3.179)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} m_1 &= j\omega \\ m_2 &= -j\omega \\ m_3 &= -k_1 \end{aligned} \quad (3.180)$$

ดังนั้นสมการคุณลักษณะ ( Characteristic Equation ) จะอยู่ในรูป

$$(m - j\omega)(m + j\omega)(m + k_1) = 0 \quad (3.181)$$

$$m^3 + k_1 m^2 - \omega^2 m - k_1 \omega^2 = 0 \quad (3.182)$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (3.178) กับสมการที่ (3.182) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} k_1 &= B/A \\ \omega^2 &= -C/A \\ k_1 \omega^2 &= -D/A \end{aligned} \quad (3.183)$$

ดังนั้น การหาผลตอบสนองเชิงธรรมชาติของวงจร โคลทพิคต์ ออสซิลเลเตอร์ โดยการใช้วิธีเทียบสัมประสิทธิ์ แสดงดังสมการ

$$k_1 = \frac{1}{C_2 R_2} \quad (3.184)$$

$$\omega^2 = -\frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2} \quad (3.185)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_1\omega^2 = -\frac{\frac{1}{R_2} + g_m}{L_1 C_1 C_2} \quad (3.186)$$

แทนค่าสมการ (3.184), (3.185) ลงใน สมการ (3.186) แล้ว แก้สมการหาค่า  $g_m$  จะได้ว่า

$$g_m = \frac{C_1}{C_2 R_2} \quad (3.187)$$

ดังนั้นแทนค่าสมการ (3.184), (3.185) ลงใน สมการ (3.180) และ (3.179) จะได้ ผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ แสดงดังสมการ

$$V_{o_{natural}}(t) = P e^{j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1 C_1 C_2}} t} + Q e^{-j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1 C_1 C_2}} t} + R e^{\frac{1}{R_2 C_2} t} \quad (3.188)$$

หาผลตอบสนองเชิงบังคับ

เนื่องจากสัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นสัญญาณไฟตรง หรือกล่าวได้ว่า สัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจึง กำหนดให้ ผลตอบสนองเชิงบังคับมีค่า ดังสมการ

$$V_{o_{force}} = A \quad (3.189)$$

แทนค่าลงไปในสมการที่ (3.175) ซึ่งเป็นสมการของระบบ จะได้ว่า ผลตอบสนองเชิงบังคับ มีค่าแสดงดังสมการ

$$A = V_{in}(t) \quad (3.190)$$

หาผลตอบสนองทั้งหมด

ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่าเท่ากับ ผลรวมของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติและผลตอบสนองเชิงบังคับ แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = V_{o_{natural}}(t) + V_{o_{force}}(t) \quad (3.191)$$

แทนค่าผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ จากสมการที่ (3.188) และผลตอบสนองเชิงบังคับ จากสมการที่ (3.190) ลงในสมการที่ (3.191) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o(t) = Pe^{j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}t} + Qe^{-j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}t} + Re^{\frac{1}{R_2C_2}t} + V_{in}(t) \quad (3.192)$$

หาค่าคงที่  $P, Q$  และ  $R$

จากสมการที่ (3.192) จะเห็นว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีพจน์ค่าคงที่  $P, Q$  และ  $R$  ซึ่งไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องดำเนินการหาค่า  $P, Q$  และ  $R$  อาศัยสภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  โดยกำหนดให้

$$V_o(0) = V_{INT} \quad (3.193)$$

และหาสมการช่วย อีกหนึ่งสมการ เพื่อช่วยในการแก้สมการหาค่าคงที่  $P, Q$  และ  $R$  โดยการหาปริพันธ์ ของ สมการที่ (3.175) ซึ่งเป็นสมการของระบบทั้งหมด ตั้งแต่ ที่เวลา  $t=0$  ถึงเวลาใดๆ [13] จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & L_1C_1C_2 \int_0^t \frac{d^3V_o(t)}{dt^3} dt + \frac{L_1C_1}{R_2} \int_0^t \frac{d^2V_o(t)}{dt^2} dt + (C_1 + C_2) \int_0^t \frac{dV_o(t)}{dt} dt + \left( \frac{1}{R_2} + g_m \right) \int_0^t V_o(0) dt \\ & = \int_0^t V_{in}(t) dt \end{aligned} \quad (3.194)$$

จากสมการที่ (3.194) สภาวะ ที่เวลา  $t=0$  จะได้ว่า

$$L_1C_1C_2 \frac{d^2V_o(0)}{dt^2} + \frac{L_1C_1}{R_2} \cdot \frac{dV_o(t)}{dt} + (C_1 + C_2)V_o(0) + \left( \frac{1}{R_2} + g_m \right) \int_0^0 V_o(0) dt = \int_0^0 V_{in}(0) dt \quad (3.195)$$

จากสมการที่ (3.195) จะเห็นว่า พจน์  $\int_0^0 V_o(0) dt$  ,  $\int_0^0 V_{in}(0) dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น เขียนสมการที่ (3.195) ได้เป็น

$$L_1C_1C_2 \frac{d^2V_o(0)}{dt^2} + \frac{L_1C_1}{R_2} \cdot \frac{dV_o(t)}{dt} + (C_1 + C_2)V_o(0) = 0 \quad (3.196)$$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (3.193) และ (3.196) ใช้ในการหาค่าคงที่  $P, Q$  และ  $R$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าว ลงไปในสมการที่ ( 3.192 ) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ดังนั้นจะได้ว่า ในสภาวะเริ่มต้น ณ.ที่เวลา  $t = 0$  สัญญาณ เอาท์พุท จะมีค่าเท่ากับเงื่อนไขเริ่มต้น ของระบบ ดังนี้

$$V_o(0) = V_{INT} = Pe^{j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}t} + Qe^{-j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}t} + Re^{\frac{1}{R_2C_2}t} + V_{in}(t) \quad (3.197)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ ( 3.197 ) แสดงดังสมการ

$$V_{INT} = P + Q + R + V_{in}(0) \quad (3.198)$$

ข. จากสมการที่ ( 3.192 ) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 1 จะได้ว่า

$$V_o'(t) = j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}Pe^{j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}t} - j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}Qe^{-j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}t} + \frac{1}{R_2C_2}Re^{\frac{1}{R_2C_2}t} \quad (3.199)$$

และ ทำการหาอนุพันธ์ครั้งที่ 2 จะได้ว่า

$$V_o''(t) = -\left(\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}\right)Pe^{j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}t} + \left(\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}\right)Qe^{-j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}t} + \frac{1}{R_2^2C_2^2}Re^{\frac{1}{R_2C_2}t} \quad (3.200)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ ( 3.196 ) แทนค่าเงื่อนไข ที่เวลา  $t=0$  ดังกล่าวลงไปในสมการที่ ( 3.192 ) , ( 3.199 ) และ ( 3.200 ) จะได้ว่า

$$V_o(0) = P + Q + R + V_{in}(0) \quad (3.201)$$

$$V_o'(0) = j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}P - j\sqrt{\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}}Q + \frac{1}{R_2C_2}R \quad (3.202)$$

$$V_o''(0) = -\left(\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}\right)P + \left(\frac{C_1+C_2}{L_1C_1C_2}\right)Q + \frac{1}{R_2^2C_2^2}R \quad (3.203)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า สมการที่ ( 3.201 ) , ( 3.202 ) และ ( 3.203 ) ลงไปในสมการที่ ( 3.196 ) จะได้ว่า

$$L_1 C_1 C_2 \left( - \left( \frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2} \right) P + \left( \frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2} \right) Q + \frac{1}{R_2^2 C_2} R \right) + \frac{L_1 C_1}{R_2} \left( j \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2}} P - j \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2}} Q + \frac{1}{R_2 C_2} R \right) + (C_1 + C_2)(P + Q + R + V_{in}(0)) = 0 \quad (3.204)$$

จัดรูปสมการที่ ( 3.204 ) ใหม่ได้เป็น

$$[-(C_1 + C_2) + C_1 + C_2]P + [(C_1 + C_2) + C_1 + C_2]Q + \left[ \frac{2L_1 C_1}{R_2^2 C_2} + C_1 + C_2 \right]R + j \left[ \sqrt{\frac{L_1 C_1 (C_1 + C_2)}{R_2^2 C_2}} P - \sqrt{\frac{L_1 C_1 (C_1 + C_2)}{R_2^2 C_2}} Q \right] = -(C_1 + C_2)V_{in}(0) \quad (3.205)$$

จากสมการที่ ( 3.205 ) ใช้คุณสมบัติ การเท่ากัน ของจำนวนเชิงซ้อน พบว่า

$$[2C_1 + 2C_2]Q + \left[ \frac{2L_1 C_1}{R_2^2 C_2} + C_1 + C_2 \right]R = -(C_1 + C_2)V_{in}(0) \quad (3.206)$$

$$\sqrt{\frac{L_1 C_1 (C_1 + C_2)}{R_2^2 C_2}} P - \sqrt{\frac{L_1 C_1 (C_1 + C_2)}{R_2^2 C_2}} Q = 0 \quad (3.207)$$

จากสมการที่ ( 3.198 ) , ( 3.206 ) และ ( 3.207 ) ทำการแก้สมการ หาค่าคงที่  $P, Q$  และ  $R$  จะได้ว่า

$$P = Q = \frac{1}{2}(V_{INT} - V_{in}(0)) \quad (3.208)$$

$$R = \frac{R_2^2 C_2 (2C_1 + 2C_2)}{4L_1 C_1} (V_{INT} - V_{in}(0)) \quad (3.209)$$

แทนค่าคงที่  $P, Q$  และ  $R$  ลงในสมการที่ ( 3.192 ) และ เนื่องจาก สัญญาณ  $V_{in}(t)$  เป็นค่าคงที่ ซึ่ง  $V_{in}(t) = V_{in}(0)$  ดังนั้นจะได้ว่าผลตอบสนองทั้งหมดของระบบ มีค่า

$$V_o(t) = \left( \frac{1}{2}(V_{INT} - V_{in}(t)) \right) e^{j\sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2}} t} + \left( \frac{1}{2}(V_{INT} - V_{in}(t)) \right) e^{-j\sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2}} t} - \left( \frac{R_2^2 C_2 (2C_1 + 2C_2)}{4L_1 C_1} (V_{INT} - V_{in}(0)) \right) e^{\frac{1}{R_2 C_2} t} + V_{in}(t) \quad (3.210)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือจัดรูปสมการใหม่ แสดงดังสมการ

$$V_o(t) = (V_{INT} - V_m(t)) \cos \left( \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2}} t \right) - \left( \frac{R^2 C_2 (2C_1 + 2C_2)}{4L_1 C_1} (V_{INT} - V_m(0)) \right) e^{\frac{1}{R_2 C_2} t} + V_m(t) \quad (3.211)$$

จะเห็นว่า ผลตอบสนองทั้งหมดของ วงจร โคลพิตต์ออสซิลเลเตอร์ นั้น เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ที่มีความถี่  $\sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2}}$  rad/s รวมกับ สัญญาณไฟตรงที่ป้อนเข้ามาทางอินพุต และมีผลของของผลตอบสนองเชิงธรรมชาติ ที่มีค่าลดลงสู่ศูนย์ แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เมื่อเวลาผ่านไปโดยที่ ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ขึ้นกับ สภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  และ ค่าสัญญาณไฟตรงที่ป้อนให้กับระบบ

### 3.7 สรุป

จากการวิเคราะห์ วงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบต่างๆ ที่มีการป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง พบว่าขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ได้ นั้น จะขึ้นกับ สภาวะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  และ ค่าสัญญาณไฟตรงที่ป้อนให้กับระบบ

ดังนั้นในการควบคุมขนาดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ จึงสามารถปรับได้จาก สัญญาณไฟตรงที่ป้อนเข้าไปในระบบนั้น และสัญญาณไฟตรงดังกล่าวจะไม่มีผลใดๆ ต่อเงื่อนไขของการออสซิลเลต และความถี่ของ การออสซิลเลต

## บทที่ 4

# ผลการทดลอง การควบคุมขนาดสัญญาณ ของวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์

### 4.1 กล่าวนำ

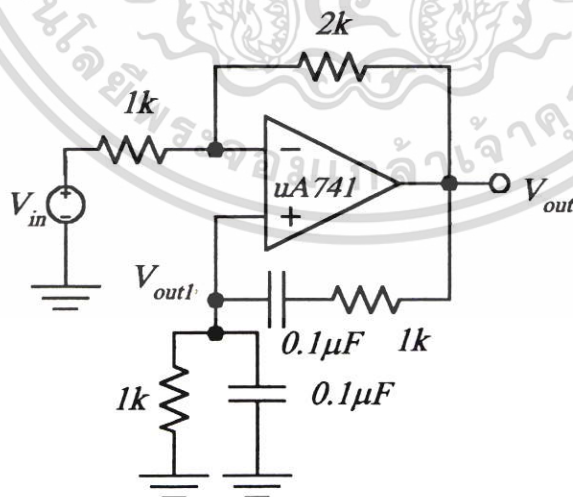
ในบทนี้ ได้นำเสนอผลการทดลอง การควบคุมขนาดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยอาศัยหลักการตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยภายในบทนี้ จะประกอบไปด้วยเนื้อหาที่สำคัญคือ ผลการเขียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ ผลการทดลองจากวงจรจริง ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 4.2 การเขียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากหลักการที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เพื่อเป็นการทดสอบแนวความคิด ที่ได้นำเสนอ จึงได้ทำการเขียนแบบการทำงานของวงจรต่างๆ โดยใช้โปรแกรม PSPICE โดยอุปกรณ์ที่ใช้ ประกอบด้วย ไอซีออปแอมป์ เบอร์ uA741 และใช้ไฟเลี้ยงวงจร ที่  $\pm 12$  โวลต์

#### 4.2.1 ผลการเขียนแบบ วงจรแอมพลิฟายเออร์

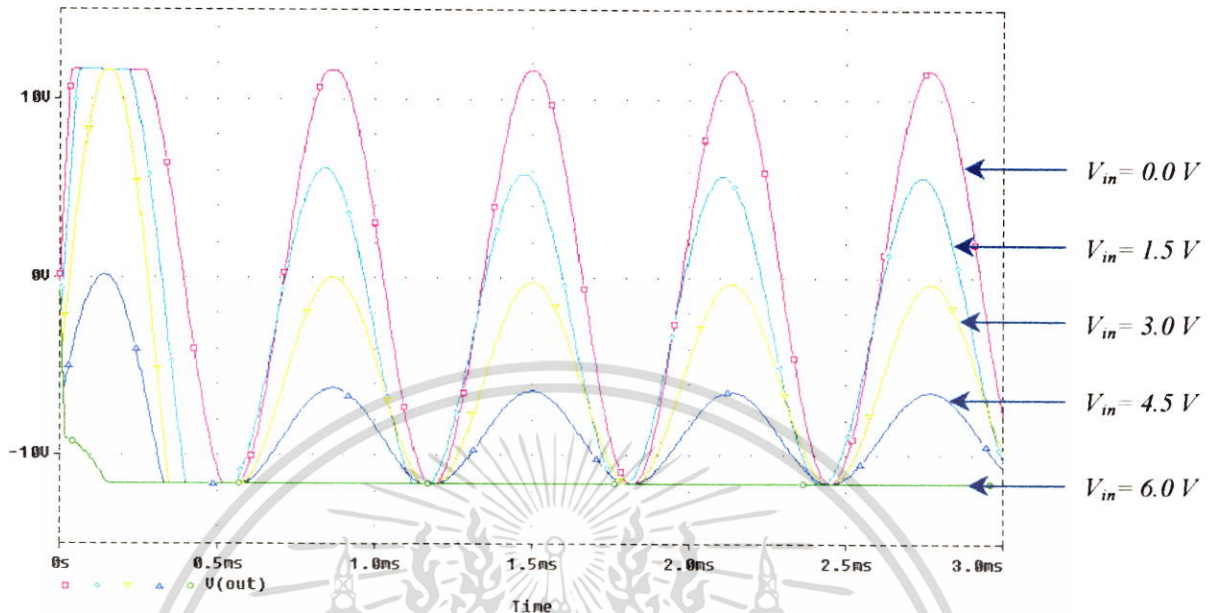
เขียนแบบการทำงานของวงจร แอมพลิฟายเออร์ โดยต่อวงจร แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรแอมพลิฟายเออร์ ที่ทำการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE

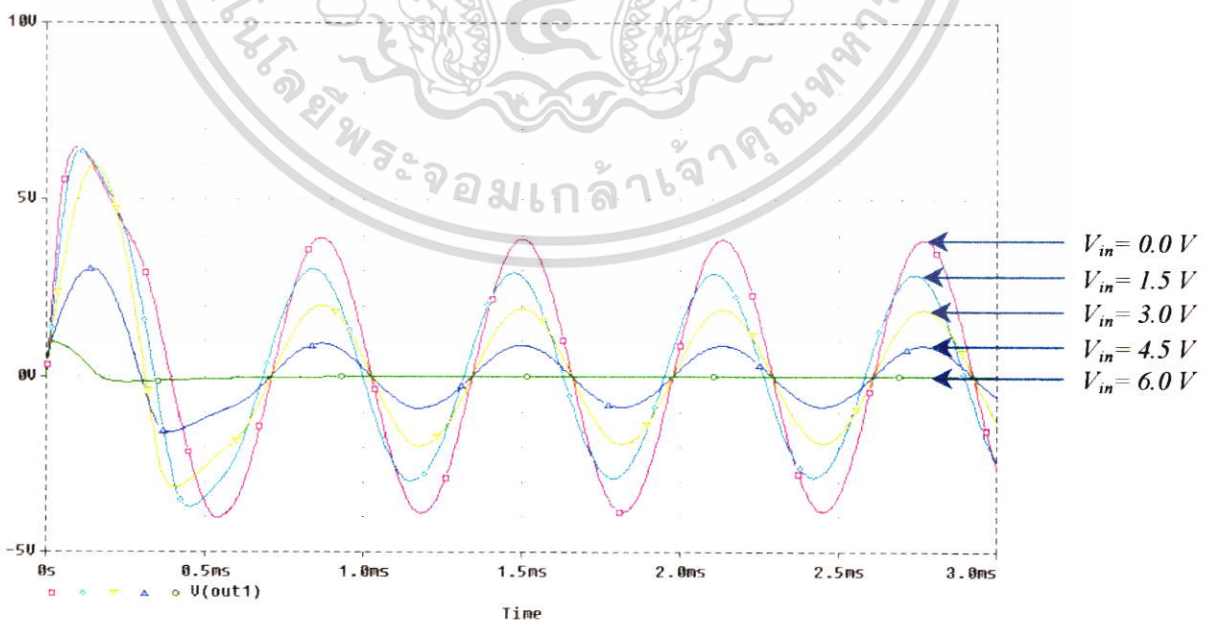
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณไฟตรง ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง +6 โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 1.5 โวลต์ แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.1 เมื่อสัญญาณอินพุต มีค่าบวก

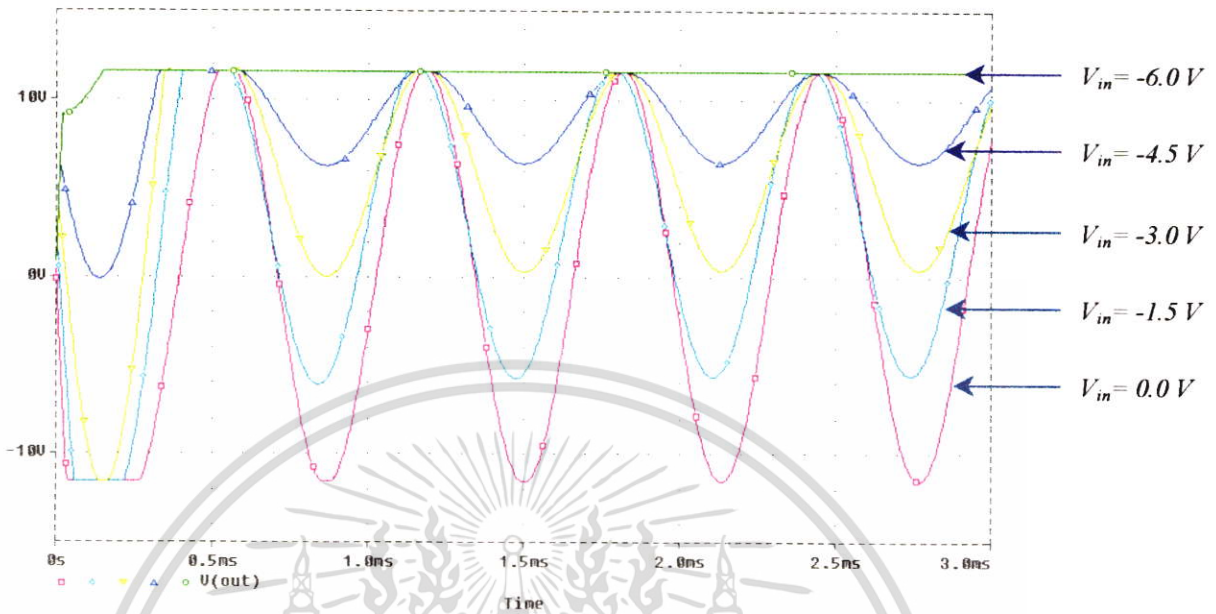
จากผลการเลียนแบบ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณไฟตรงที่มีค่าบวก และมีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่า ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะมีขนาดเล็กลง และ ชี้อยู่บนสัญญาณไฟตรงที่มีค่าลบ แต่เราสามารถเลือก สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปรศจากผลของไฟตรง แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.1 ที่ ตำแหน่ง  $V_{out1}$

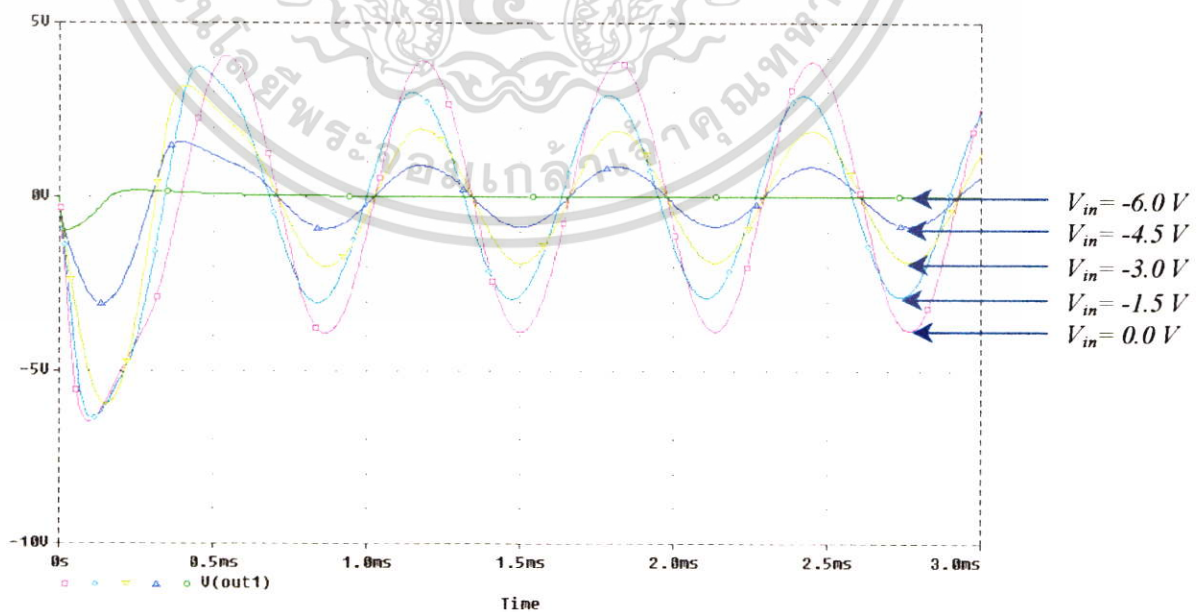
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง -6 โวลต์ โดยลดค่าครั้งละ 1.5 โวลต์ แสดงผลการเขียนแบบดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.1 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าลบ

จากผลการเขียนแบบ เมื่อสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณไฟตรงที่มีค่าลบ และมีขนาดลดลง พบว่าขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะมีขนาดเล็กลง และ ชั่วอยู่บนสัญญาณไฟตรงที่มีค่าบวก แต่เราสามารถเลือก สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของไฟตรง แสดงผลการเขียนแบบ ดังรูปที่ 4.5

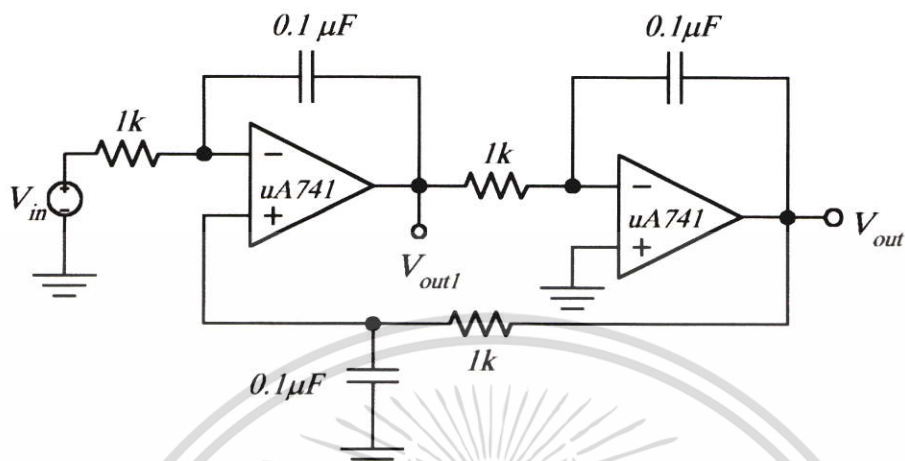


รูปที่ 4.5 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.1 ที่ ตำแหน่ง  $V_{out1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

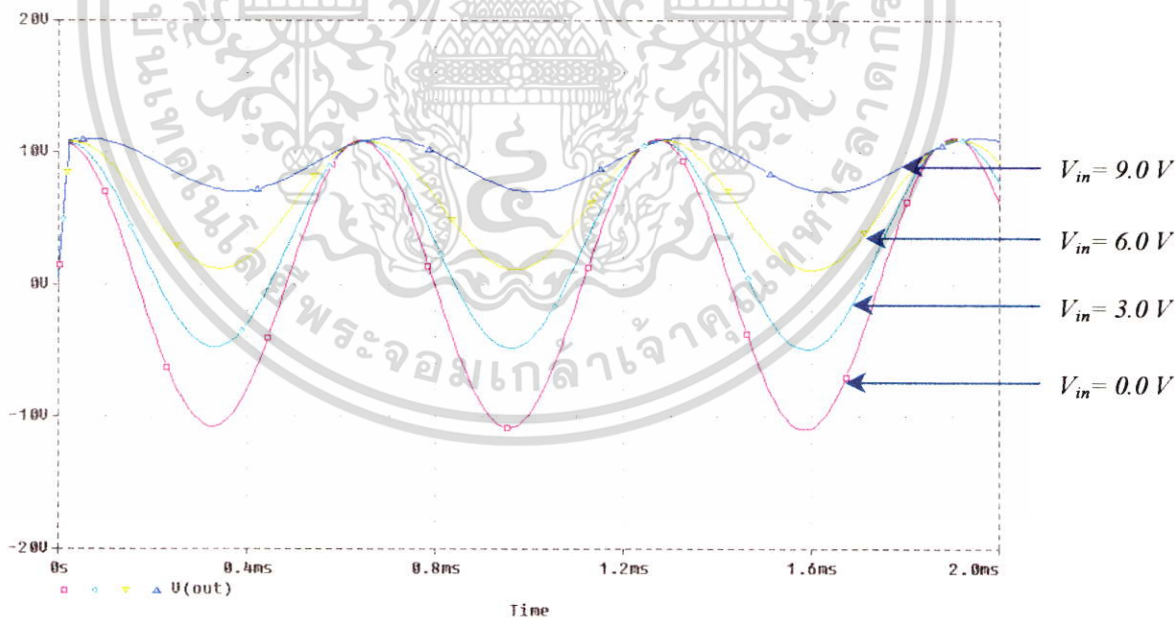
#### 4.2.2 ผลการเลียนแบบ วงจรควอตราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์

เลียนแบบการทำงานของวงจร ควอตราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ โดยต่อวงจร แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรควอตราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ ที่ทำการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง +9 โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 3 โวลต์ แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.7

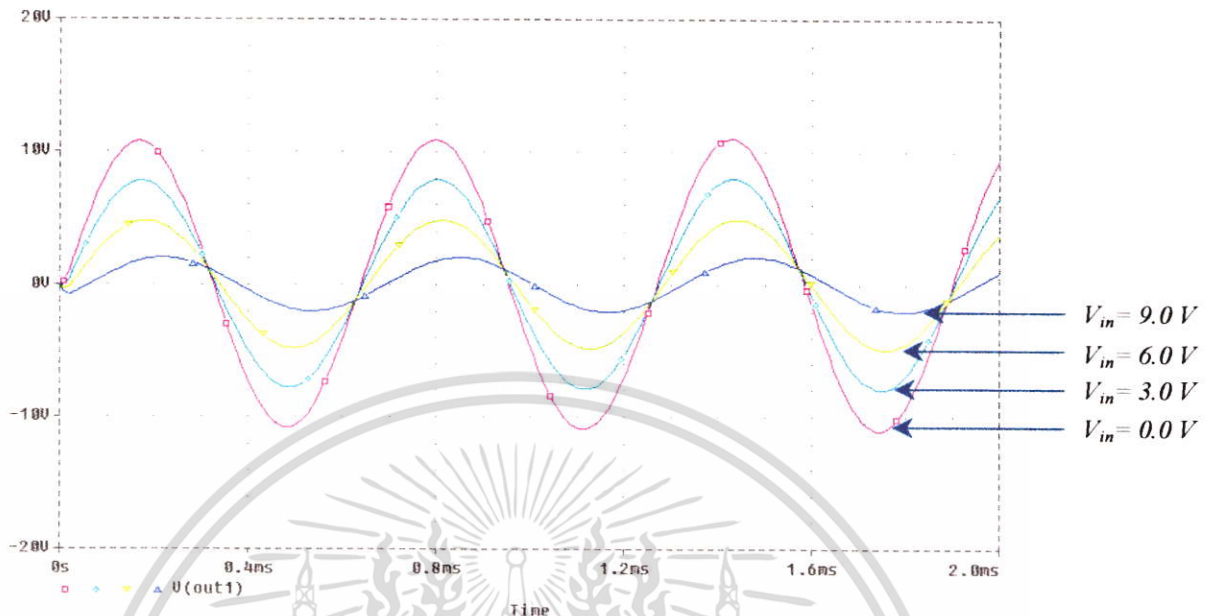


รูปที่ 4.7 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.6 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าบวก

จากผลการเลียนแบบ เมื่อสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณไฟตรงที่มีค่าบวก และมีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่า ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะมีขนาดเล็กลง และ ชั่วอยู่บนสัญญาณไฟตรงที่มีค่าบวก แต่

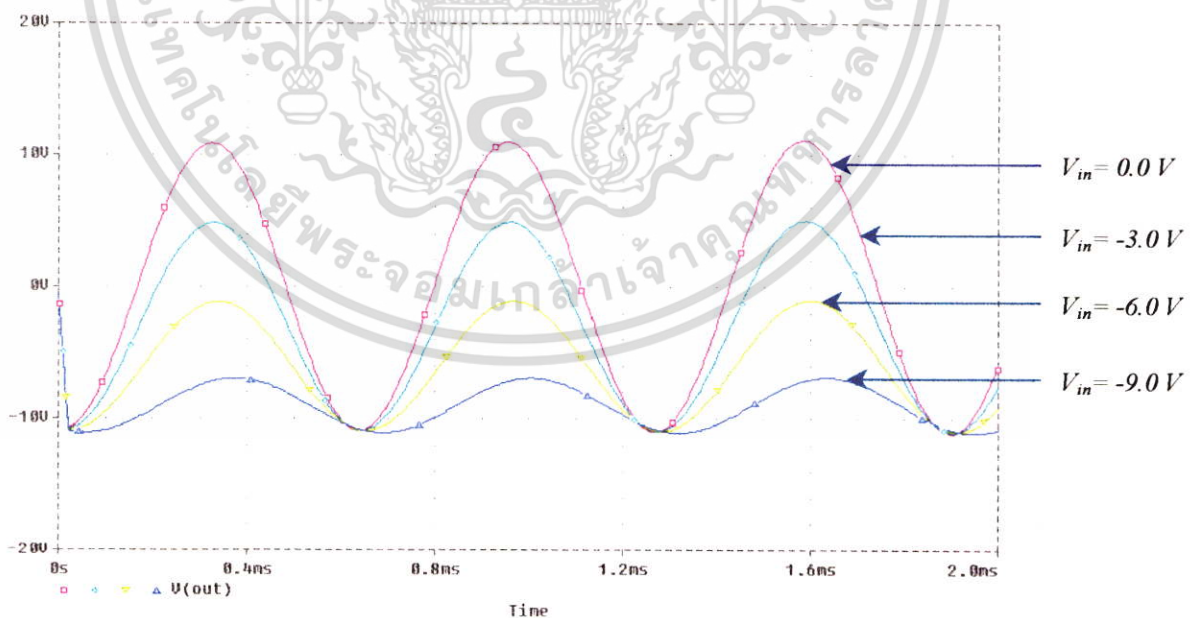
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถเลือกสัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของไฟตรง แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.6 ที่ ตำแหน่ง  $V_{out1}$

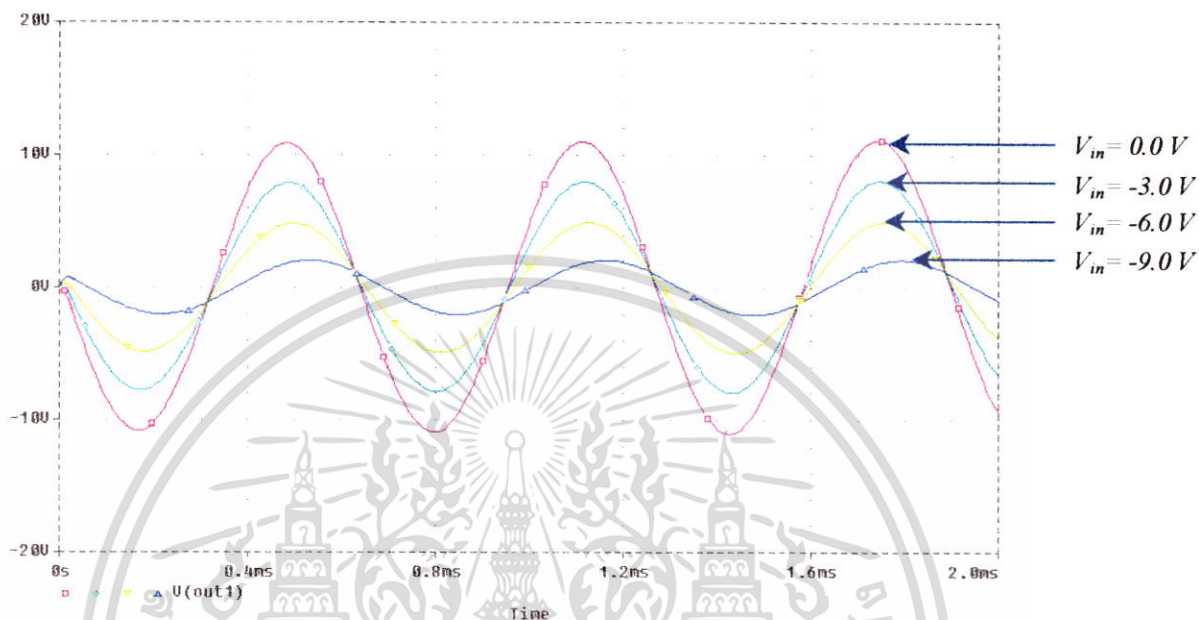
เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง -9 โวลต์ โดยลดค่าครั้งละ 3 โวลต์ แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.6 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

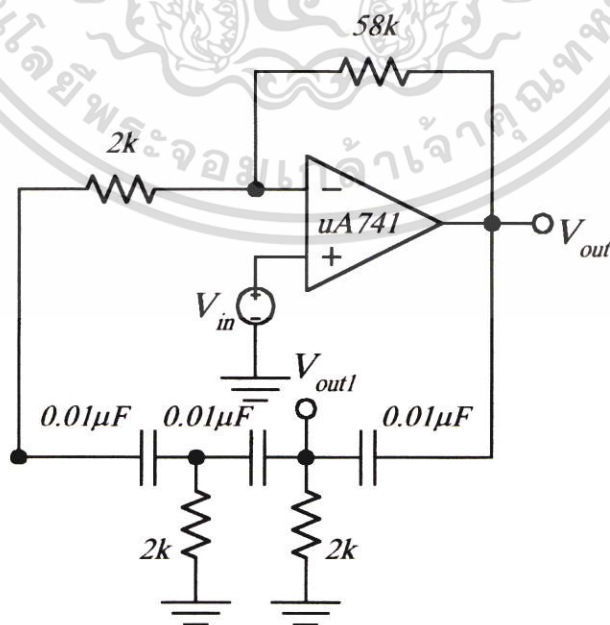
จากผลการเลียนแบบ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรงที่มีค่าลบ และมีขนาดลดลง พบว่า ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะมีขนาดเล็กลง และ ชี้ออยู่บนสัญญาณไฟตรงที่มีค่าลบ แต่เราสามารถเลือกสัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของไฟตรง แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.6 ที่ ตำแหน่ง  $V_{out1}$

#### 4.2.3 ผลการเลียนแบบ วงจรเฟลซิท้ออสซิลเลเตอร์

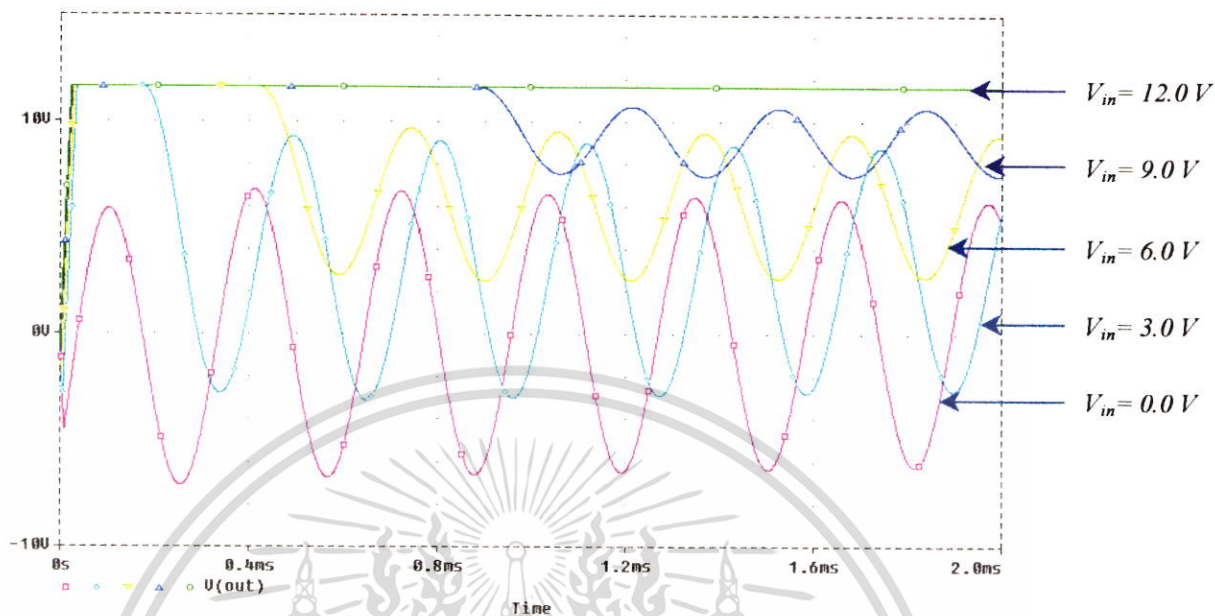
เลียนแบบการทำงานของวงจร เฟลซิท้ออสซิลเลเตอร์ โดยต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 4.11



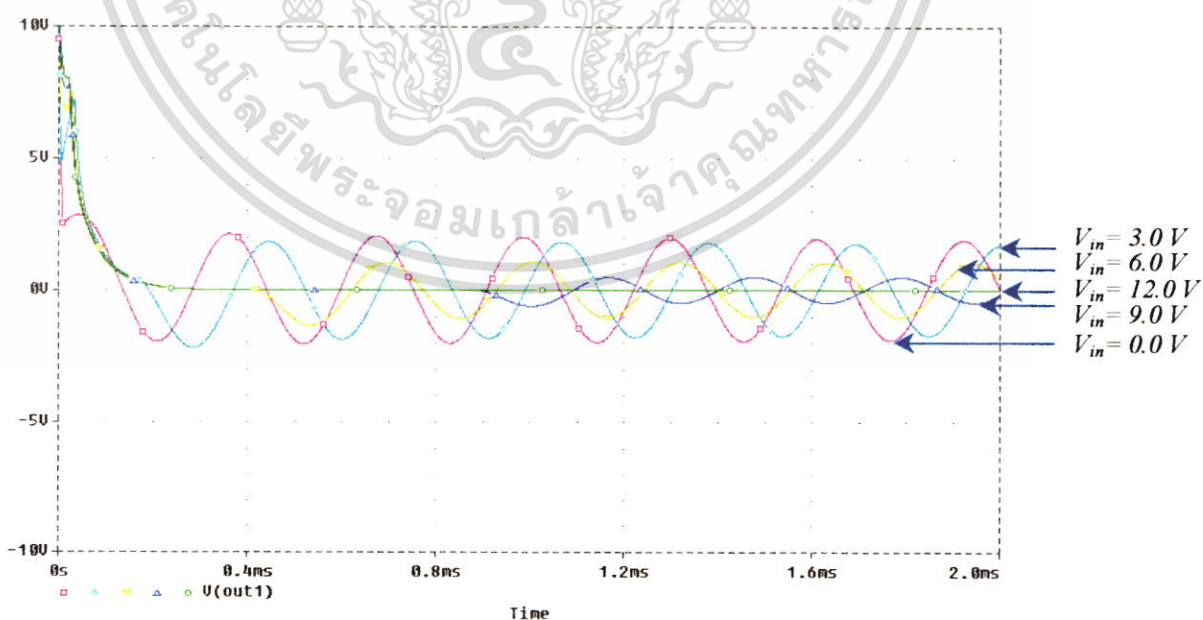
รูปที่ 4.11 วงจรเฟลซิท้ออสซิลเลเตอร์ ที่ทำการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง + 12 โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 3 โวลต์ แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.12



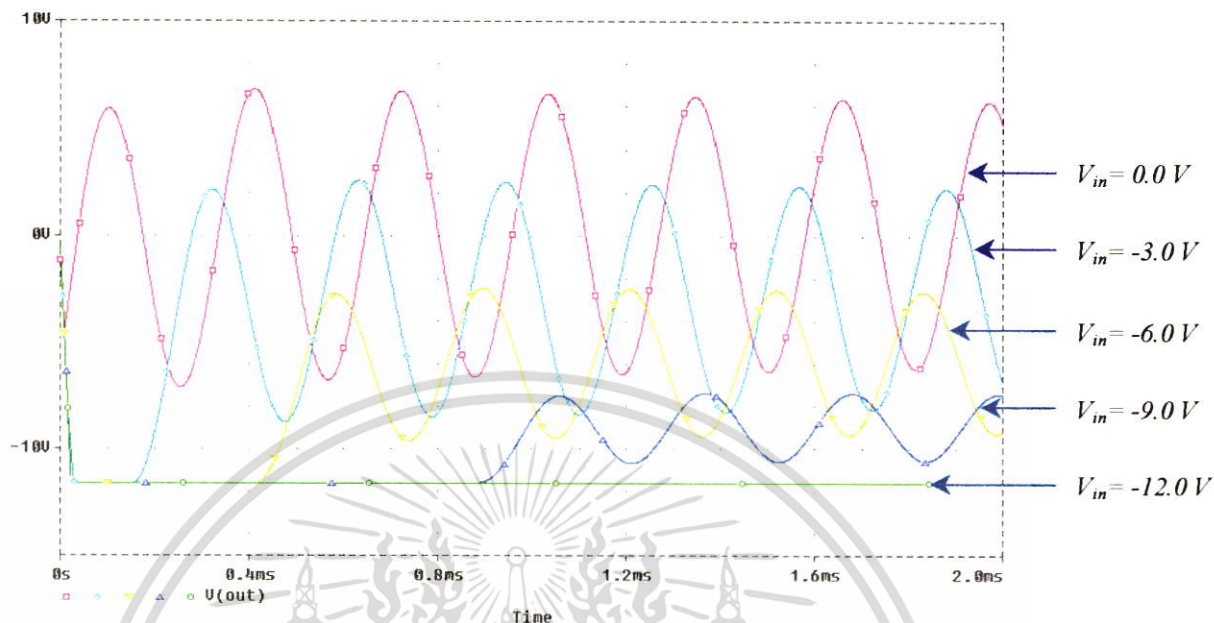
รูปที่ 4.12 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.11 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าบวก จากผลการเลียนแบบ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรงที่มีค่าบวก และมีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่า ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะมีขนาดเล็กลง และ ชี้อยู่บนสัญญาณไฟตรงที่มีค่าบวก แต่เราสามารถเลือก สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของไฟ แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.11 ที่ ตำแหน่ง  $V_{out1}$

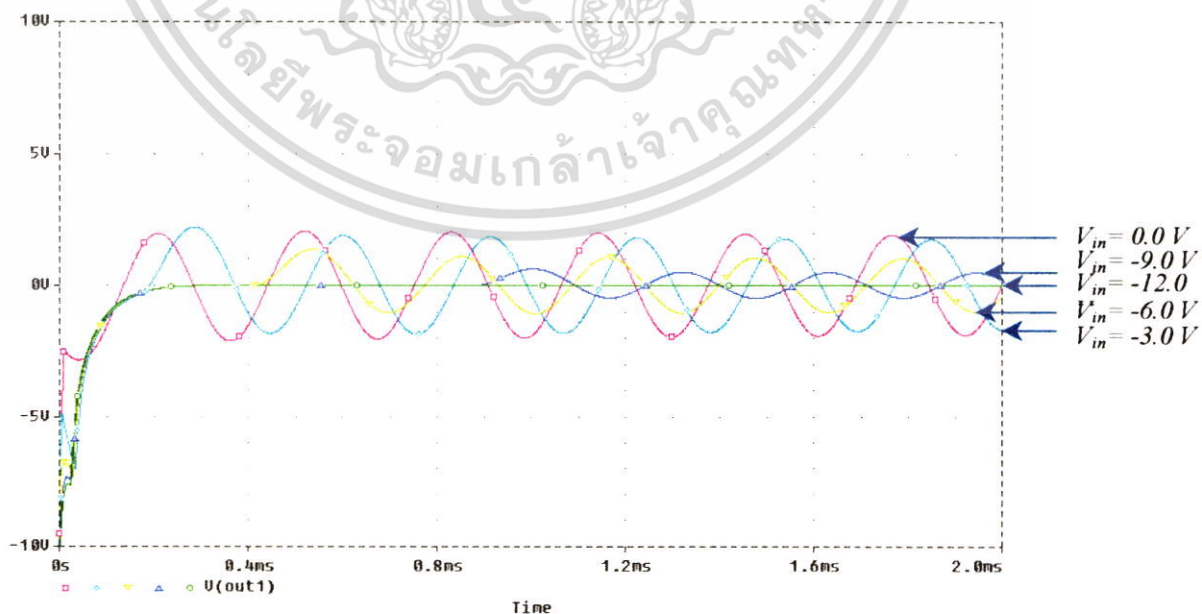
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง -12 โวลต์ โดยลดค่าครั้งละ 3 โวลต์ แสดงผลการเขียนแบบดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.11 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าลบ

จากผลการเขียนแบบ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรงที่มีค่าลบ และมีขนาดลดลง พบว่า ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะมีขนาดเล็กลง และ ชั่วอยู่บนสัญญาณไฟตรงที่มีค่าลบ แต่เราสามารถเลือก สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของไฟตรง แสดงผลการเขียนแบบ ดังรูปที่ 4.15

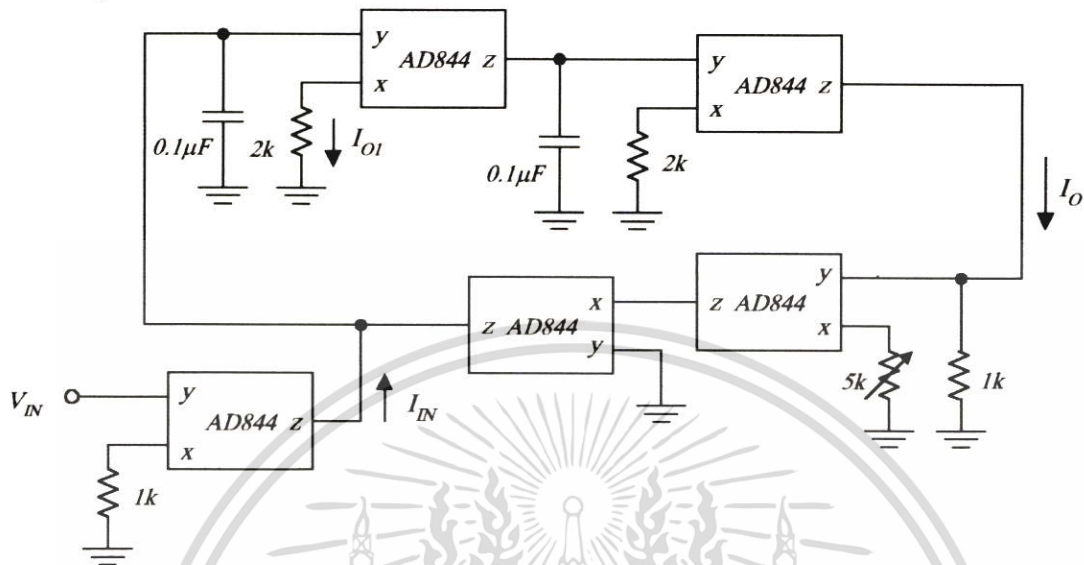


รูปที่ 4.15 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.11 ที่ ตำแหน่ง  $V_{out1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นใจในประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

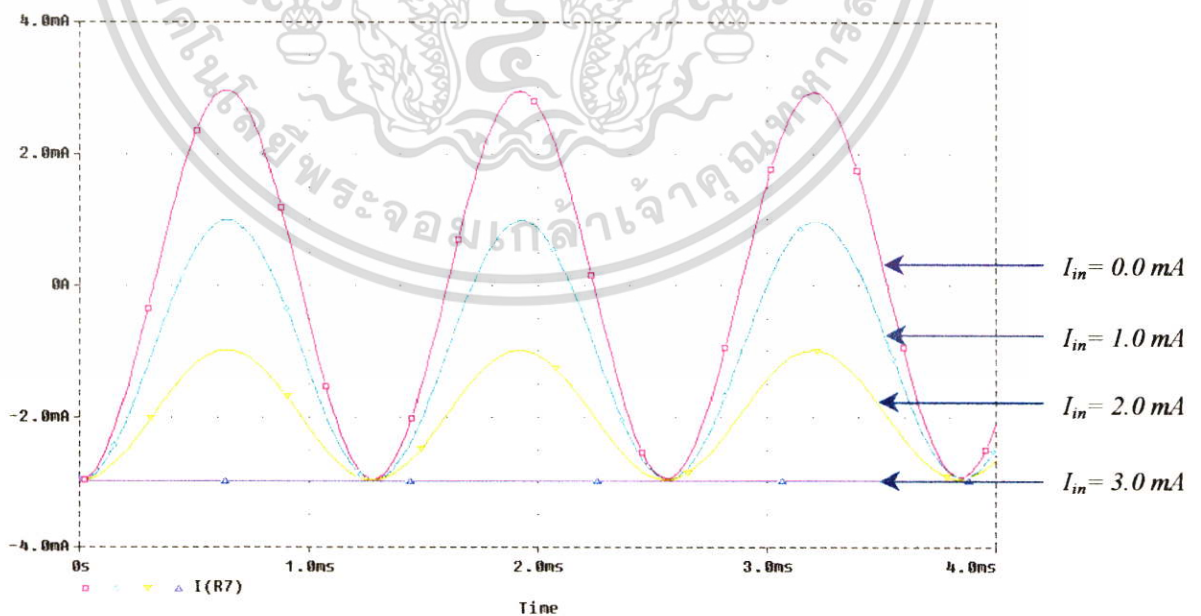
#### 4.2.4 ผลการเลียนแบบ วงจรควอตราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส

เลียนแบบการทำงานของวงจรควอตราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส โดยต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 วงจรควอตราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส ที่ทำการเลียนแบบ โดยโปรแกรม PSPICE

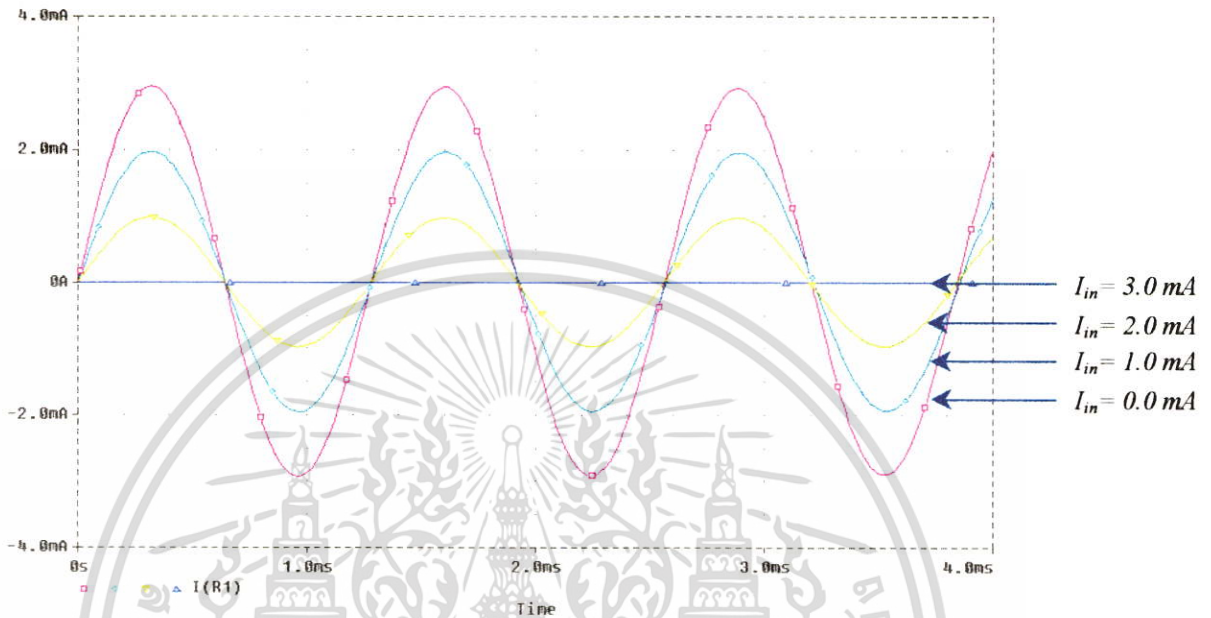
เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณ ไฟตรง ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง +3 โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 1 โวลต์ ทำให้มีการป้อนกระแสอินพุต ตั้งแต่ 0 ถึง 3 mA แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.16 เมื่อกระแสอินพุตมีค่าบวก

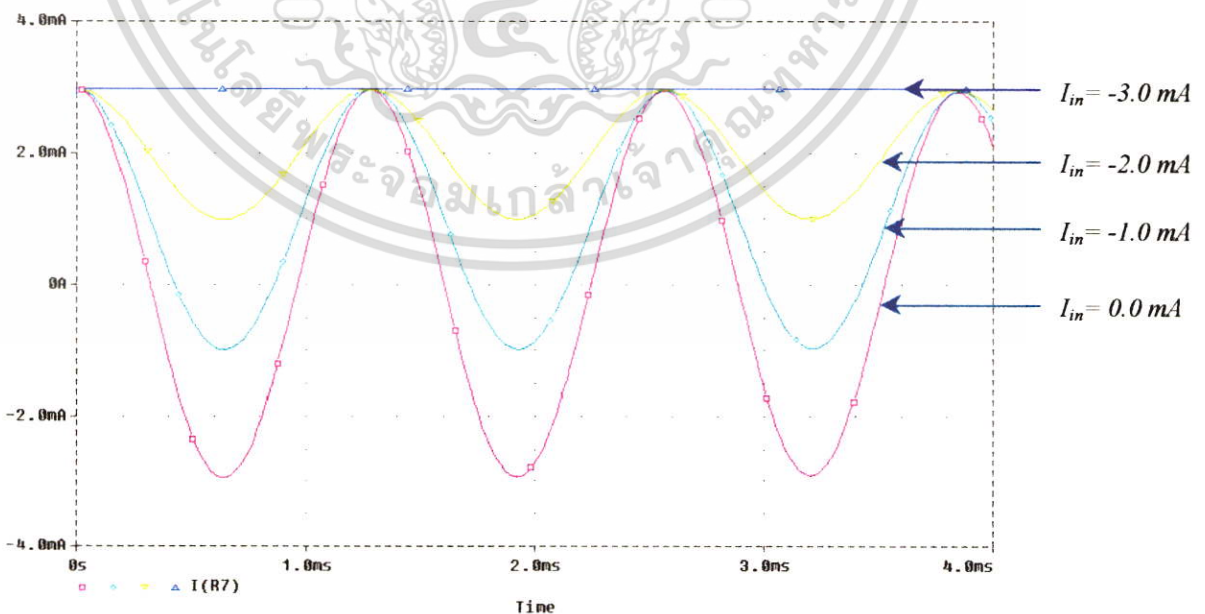
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการเขียนแบบ เมื่อสัญญาณกระแสอินพุต เป็นกระแสไฟตรงที่มีค่าเป็นบวก และมีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่า ขนาดของสัญญาณกระแสเอาต์พุต จะมีขนาดเล็กลง และ ขึ้นอยู่กับสัญญาณกระแสไฟตรงที่มีค่าบวก แต่เราสามารถเลือก สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $I_{O1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของกระแสไฟตรง แสดงผลการเขียนแบบ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.16 ที่ตำแหน่ง  $I_{O1}$

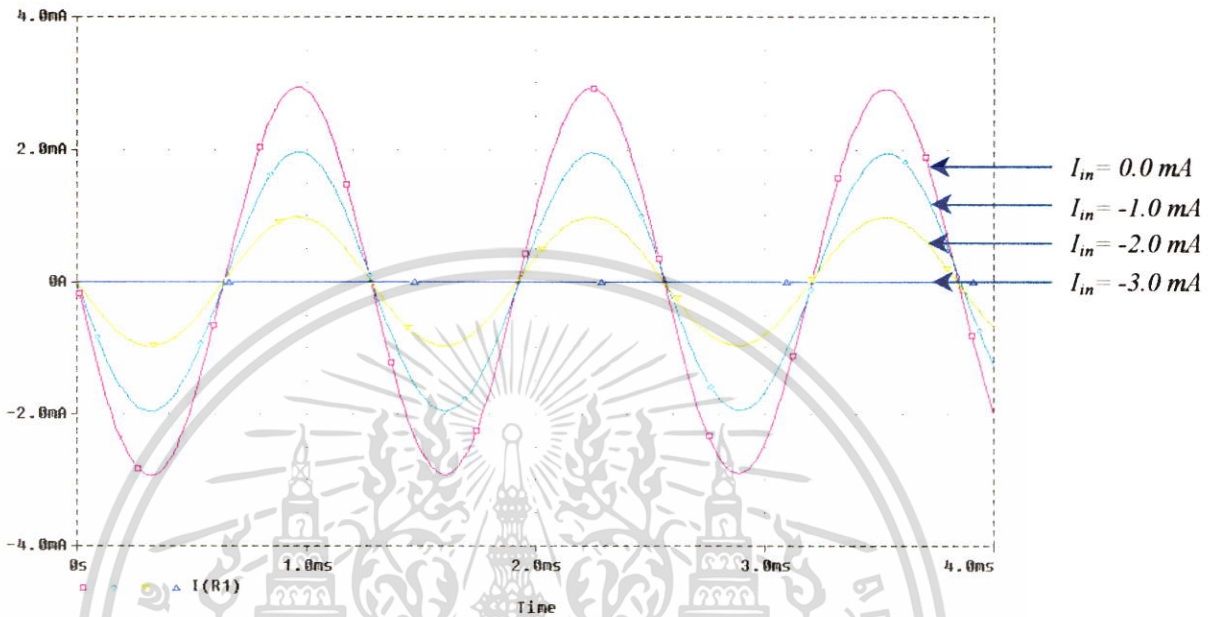
เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง -3 โวลต์ โดยทำการลดค่าครั้งละ 1 โวลต์ ทำให้มีการป้อนกระแสอินพุต ตั้งแต่ 0 ถึง -3 mA แสดงผลการเขียนแบบ ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.16 เมื่อกระแสอินพุตมีค่าลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการเขียนแบบ เมื่อสัญญาณกระแสอินพุต เป็นสัญญาณกระแสไฟตรงที่มีค่าลบ และมีขนาดลดลง พบว่า ขนาดของสัญญาณกระแสเอาต์พุต จะมีขนาดเล็กลง และ ขี้อยู่บนสัญญาณกระแสไฟตรงที่มีค่าลบ แต่เราสามารถเลือก สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $I_{O1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของกระแสไฟตรง แสดงผลการเขียนแบบ ดังรูปที่ 4.20



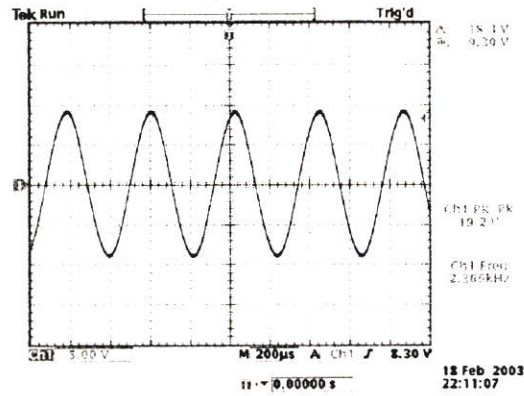
รูปที่ 4.20 ผลการเขียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรรูปที่ 4.16 ที่ตำแหน่ง  $I_{O1}$

### 4.3 การทดลองโดยการต่อวงจรจริง

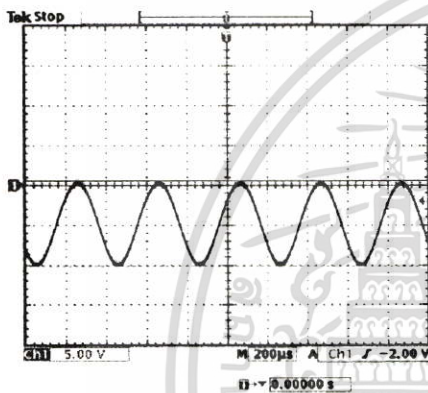
จากหลักการที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เพื่อเป็นการทดสอบแนวความคิด ที่ได้นำเสนอ จึงได้ทำการต่อวงจรจริง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ ประกอบด้วย ไอซีออปีแอมป์ เบอร์ uA741 และใช้ไฟเลี้ยงวงจร ที่  $\pm 12$  โวลต์

#### 4.3.1 ผลการทดลอง วงจรเวเนบรีจ์ ออสซิลเลเตอร์

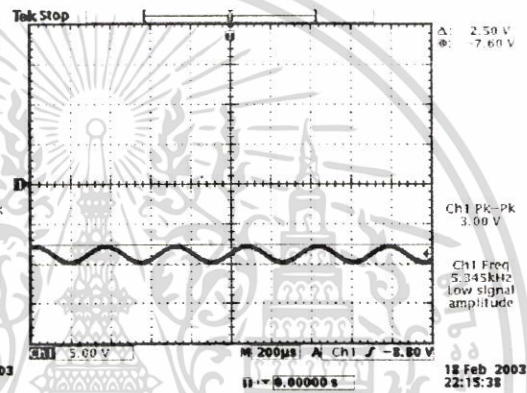
ต่อวงจร เวเนบรีจ์ออสซิลเลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.1 และ ป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณไฟตรง ตั้งแต่  $-4$  โวลต์ ถึง  $4$  โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ  $2$  โวลต์ และ บันทึกผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.21 ถึง รูปที่ 4.23



รูปที่ 4.21 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงมีค่า 0 โวลท์

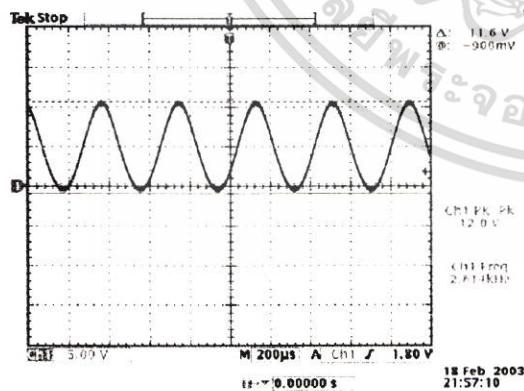


(ก)

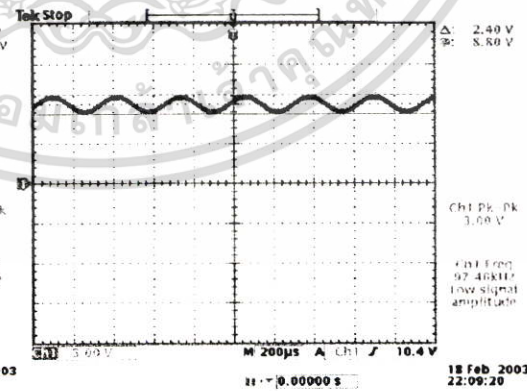


(ข)

รูปที่ 4.22 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงบวก  
ก. ป้อนค่า 2 โวลท์ ข. ป้อนค่า 4 โวลท์



(ก)



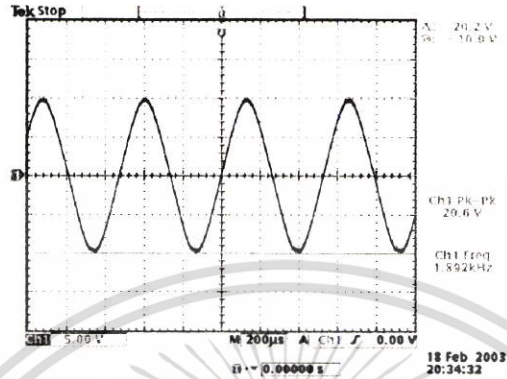
(ข)

รูปที่ 4.23 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงลบ  
ก. ป้อนค่า -2 โวลท์ ข. ป้อนค่า -4 โวลท์

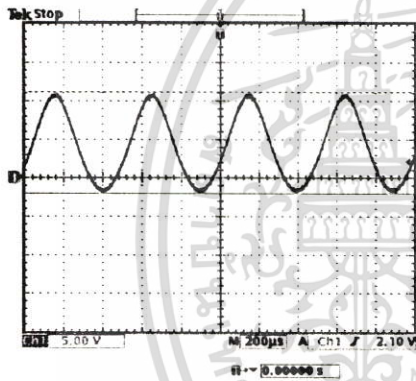
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 ผลการทดลอง วงจรควอตราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์

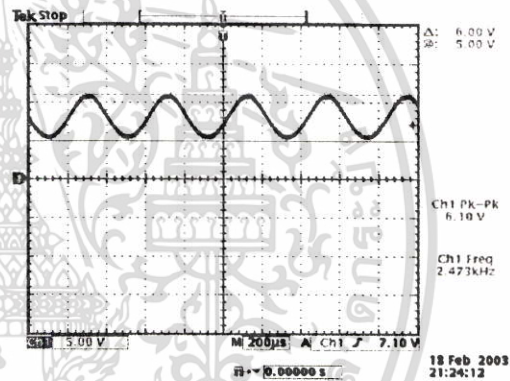
ต่อวงจร ควอตราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.6 และ ป้อนสัญญาณอินพุต เป็น สัญญาณไฟตรง ตั้งแต่  $-8$  โวลต์ ถึง  $8$  โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ  $4$  โวลต์ และ บันทึกผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.24 ถึง รูปที่ 4.26



รูปที่ 4.24 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงมีค่า  $0$  โวลต์



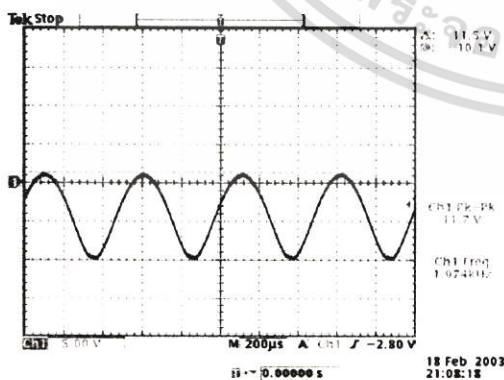
(ก)



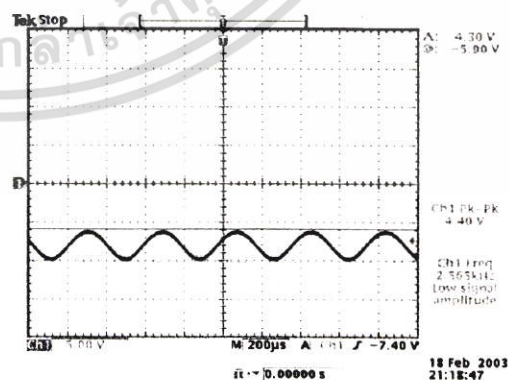
(ข)

รูปที่ 4.25 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงบวก

ก. ป้อนค่า  $4$  โวลต์ ข. ป้อนค่า  $8$  โวลต์



(ก)



(ข)

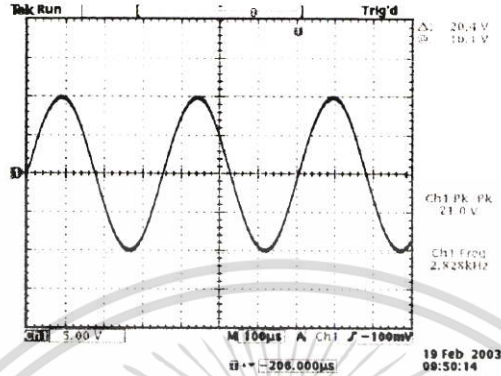
รูปที่ 4.26 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นไฟตรงลบ

ก. ป้อนค่า  $-4$  โวลต์ ข. ป้อนค่า  $-8$  โวลต์

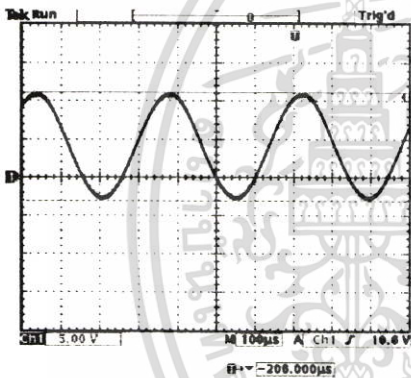
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดลอง วงจรเฟสชิฟต์ ออสซิลเลเตอร์

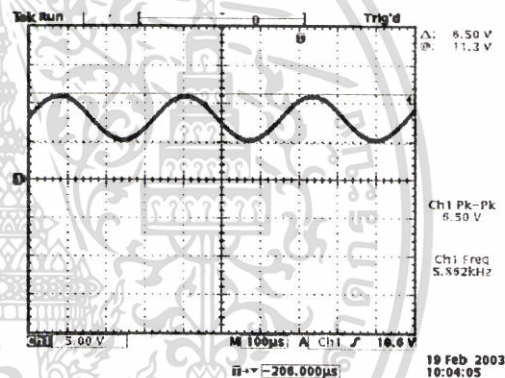
ต่อวงจร เฟสชิฟต์ ออสซิลเลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.11 และ ป้อนสัญญาณอินพุต เป็น สัญญาณไฟตรง ตั้งแต่ -12 โวลต์ ถึง 12 โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 4 โวลต์ และบันทึกผลการ ทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.27 ถึง รูปที่ 4.29



รูปที่ 4.27 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็น ไฟตรงมีค่า 0 โวลต์



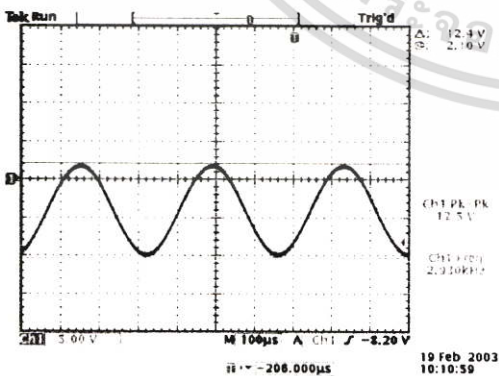
( ก )



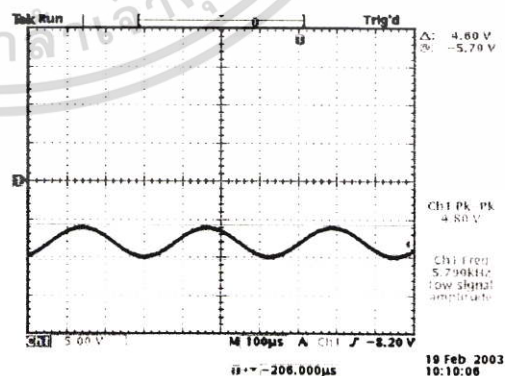
( ข )

รูปที่ 4.28 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็น ไฟตรงบวก

ก. ป้อนค่า 4 โวลต์ ข. ป้อนค่า 8 โวลต์



( ก )



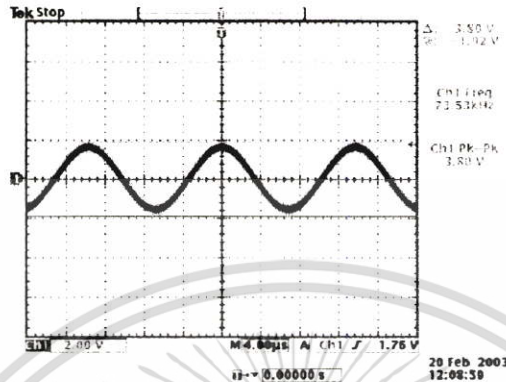
( ข )

รูปที่ 4.29 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็น ไฟตรงลบ

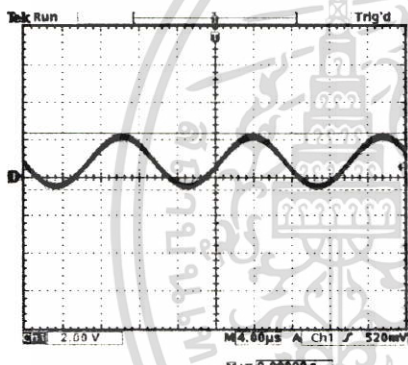
ก. ป้อนค่า -4 โวลต์ ข. ป้อนค่า -8 โวลต์

4.3.4 ผลการทดลอง วงจรควอทราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส

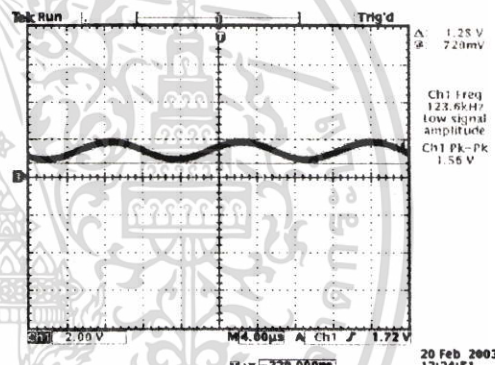
ต่อวงจร ควอทราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ ในโหมดกระแส แสดงดังรูปที่ 4.16 และ ป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณกระแสไฟตรง ตั้งแต่ -3 มิลลิแอมป์ ถึง 3 มิลลิแอมป์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 1.5 มิลลิแอมป์ และบันทึกผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.30 – รูปที่ 4.32



รูปที่ 4.30 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นกระแสไฟตรงมีค่า 0 มิลลิแอมป์



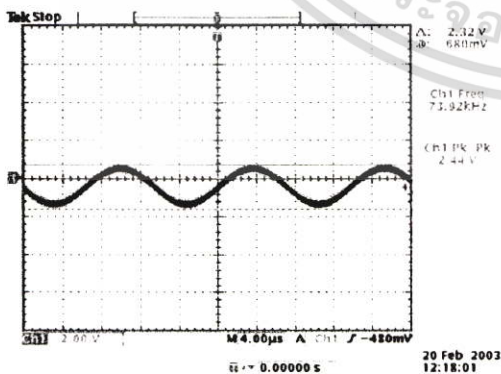
(ก)



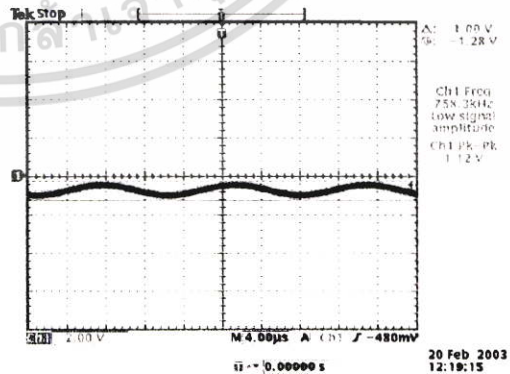
(ข)

รูปที่ 4.31 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นกระแสไฟตรงบวก

ก. ป้อนค่า 1.5 มิลลิแอมป์ ข. ป้อนค่า 2.5 มิลลิแอมป์



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.32 สัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นกระแสไฟตรงลบ

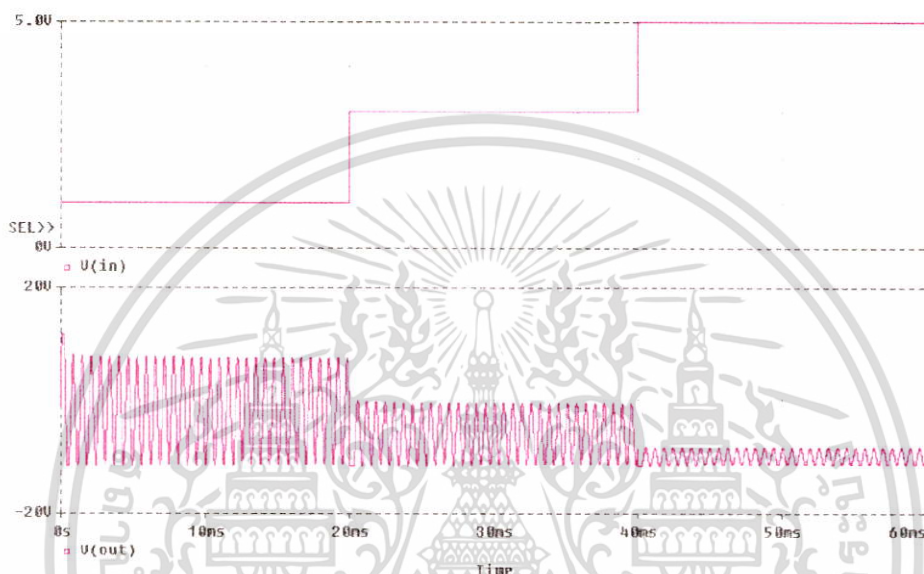
ก. ป้อนค่า -1 มิลลิแอมป์ ข. ป้อนค่า -2 มิลลิแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณขั้นบันได และ สัญญาณฟันเลื่อย

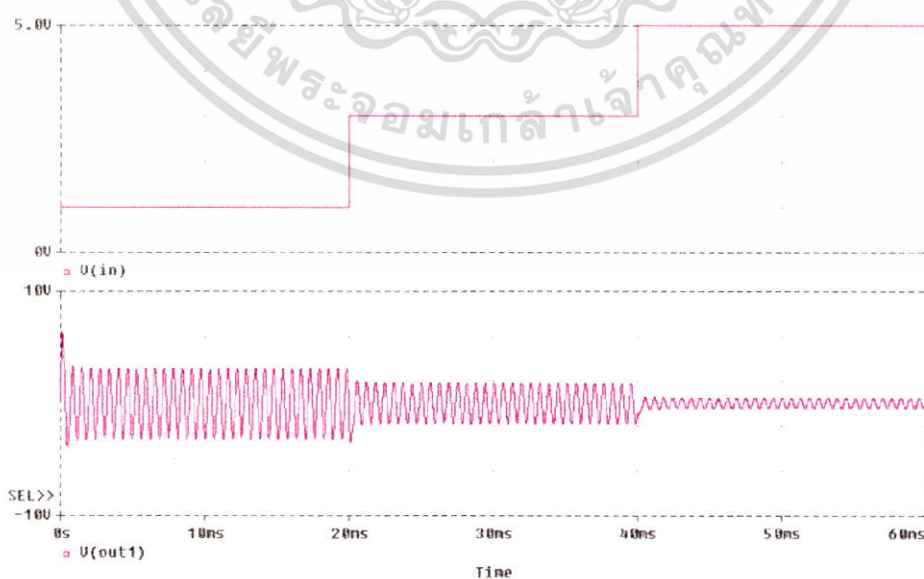
### 4.4.1 ผลการเลียนแบบ วงจรเวเนบรีจ้ออสซิลเลเตอร์

เลียนแบบการทำงานของวงจร เวเนบรีจ้ออสซิลเลเตอร์ โดยต่อวงจร แสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณขั้นบันได ตั้งแต่ +1 โวลต์ ถึง +5 โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 2 โวลต์ แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณขั้นบันได

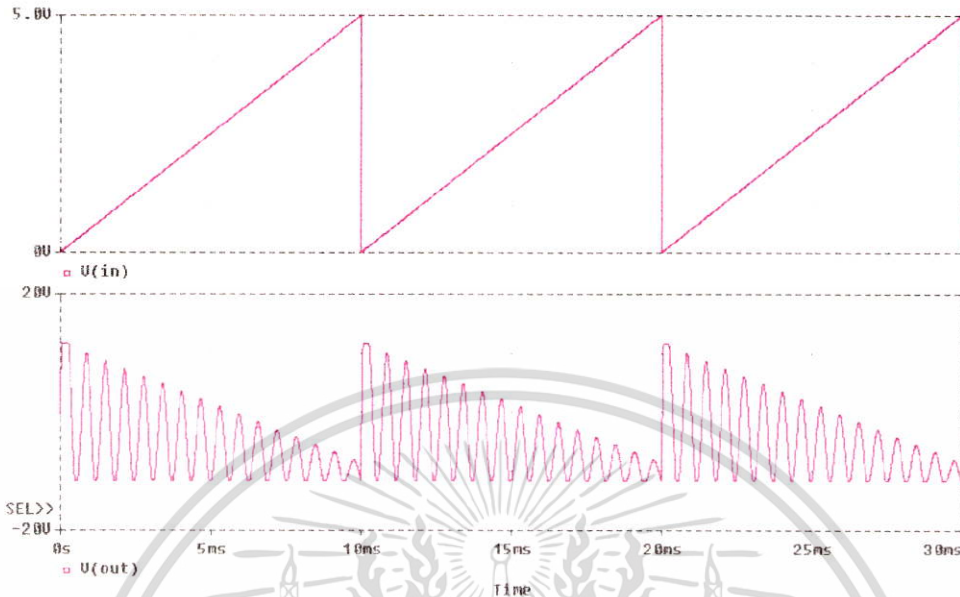
สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของกระแสไฟตรง แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 สัญญาณเอาต์พุต ที่ปราศจากผลของไฟตรง เทียบกับสัญญาณอินพุต

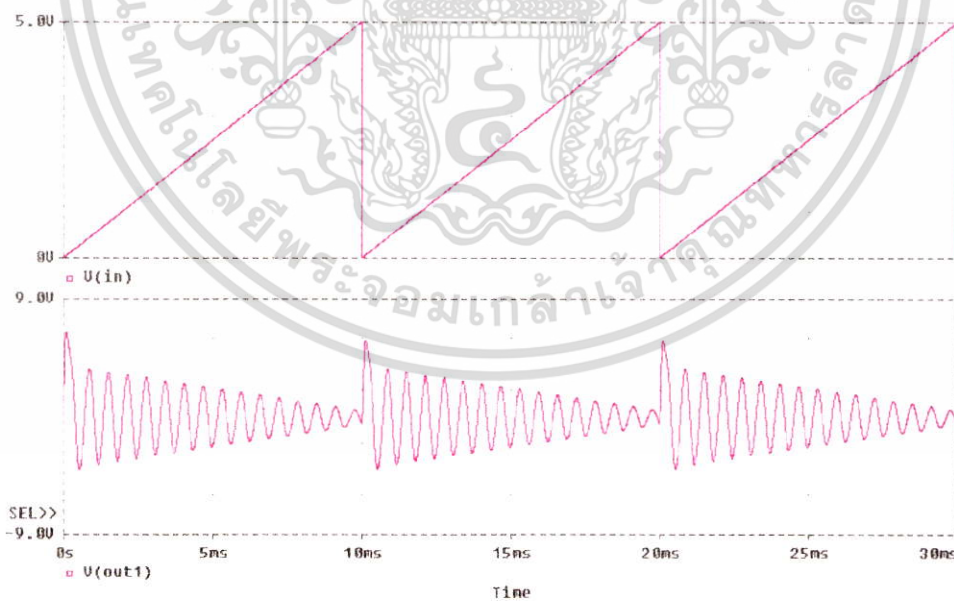
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณฟันเลื่อย ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง +5 โวลต์ ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ แสดงผลการเดินแบบ ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณฟันเลื่อย

สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของกระแสไฟตรง แสดงผลการเดินแบบ ดังรูปที่ 4.36

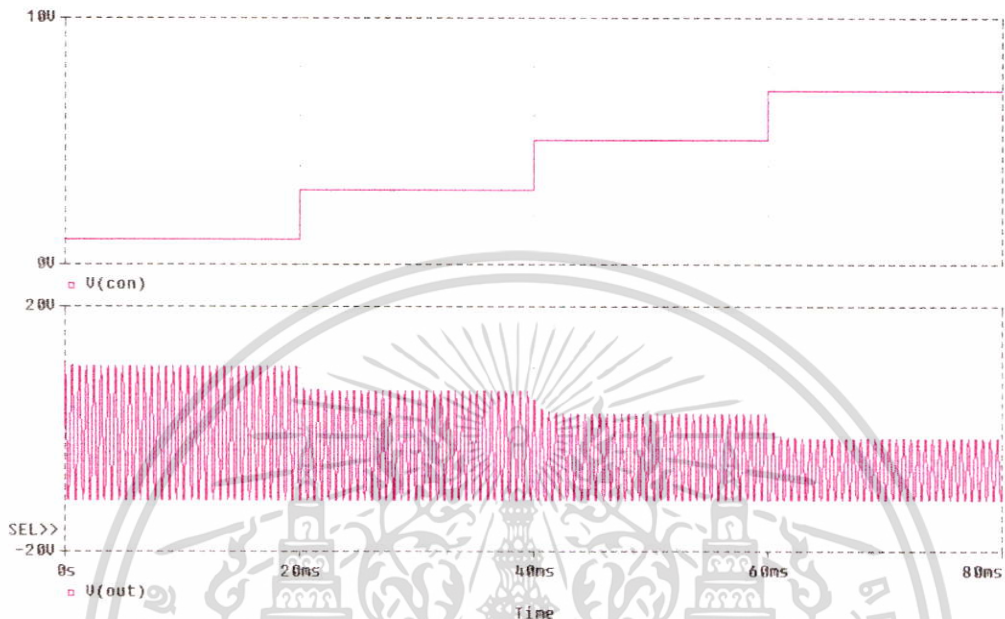


รูปที่ 4.36 สัญญาณเอาต์พุต ที่ปราศจากผลของไฟตรง เทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

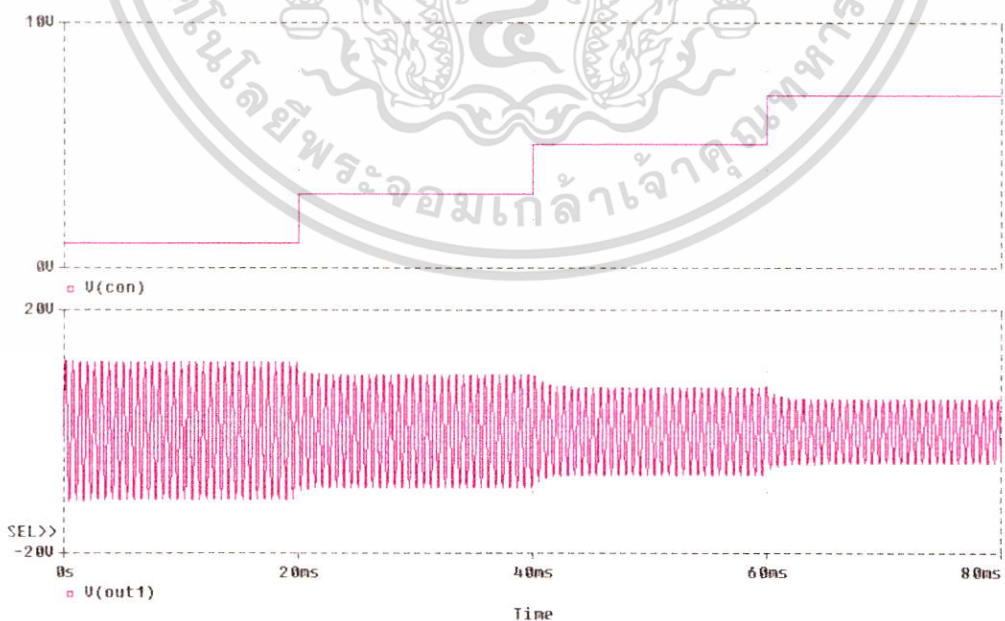
#### 4.4.2 ผลการเลียนแบบ วงจรควอตราเจอร์ออสซิลเลเตอร์

เลียนแบบการทำงานของวงจร ควอตราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ โดยต่อวงจร แสดงดังรูปที่ 4.6 เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณขั้นบันได ตั้งแต่ +1 โวลต์ ถึง +7 โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 2 โวลต์ แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณขั้นบันได

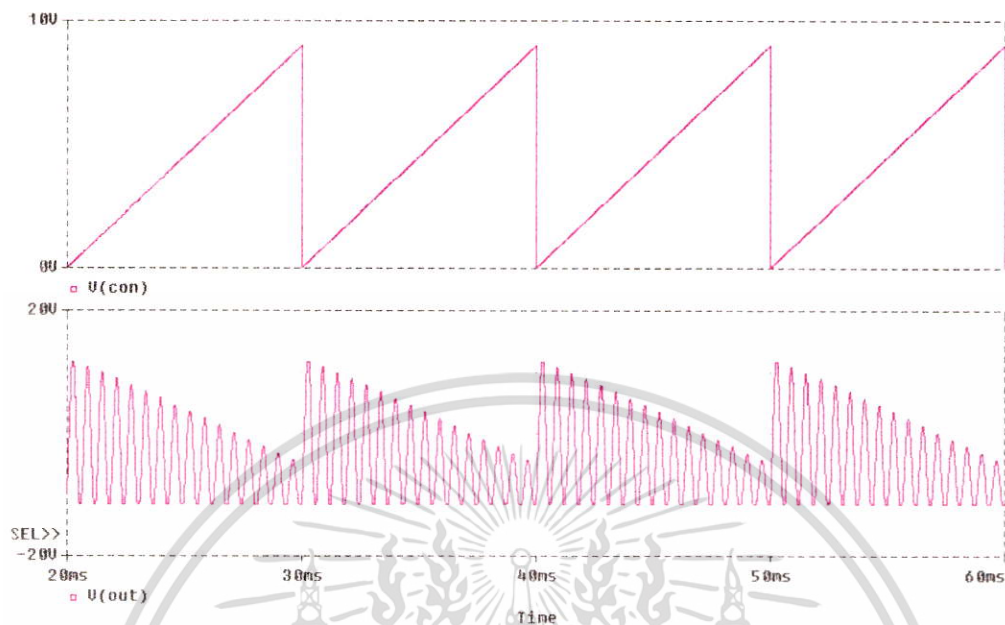
สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของกระแสไฟตรง แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 สัญญาณเอาต์พุต ที่ปราศจากผลของไฟตรง เทียบกับสัญญาณอินพุต

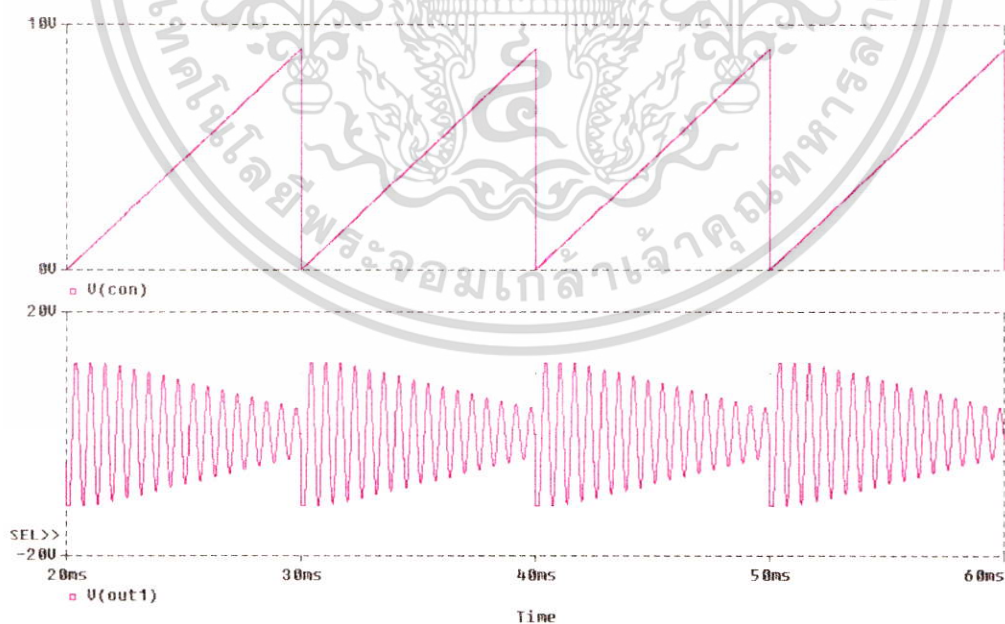
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณฟันเลื่อย ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง +9 โวลต์ ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ แสดงผลการเขียนแบบ ดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 สัญญาณเอาต์พุต เทียบกับสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุต เป็นสัญญาณฟันเลื่อย

สัญญาณเอาต์พุต จากตำแหน่ง  $V_{out1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปราศจากผลของกระแสไฟตรง แสดงผลการเขียนแบบ ดังรูปที่ 4.40



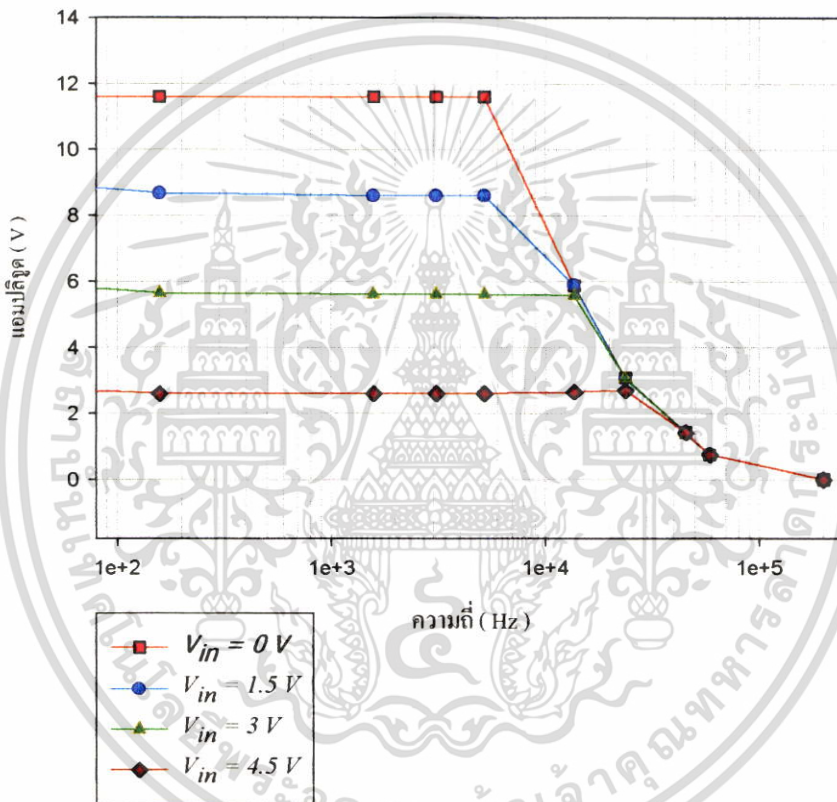
รูปที่ 4.40 สัญญาณเอาต์พุต ที่ปราศจากผลของไฟตรง เทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 ผลการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่

### 4.5.1 ผลการเลียนแบบ วงจรเวเนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์

เลียนแบบการทำงานวงจร เวเนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ โดยต่อวงจร แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยปรับค่าความต้านทานให้แตกต่างกัน วัดขนาดสัญญาณเอาต์พุต และ ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนแรงดันอินพุต ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง 4.5 โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 1.5 โวลต์ แสดงผลการเลียนแบบ ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรเวเนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์

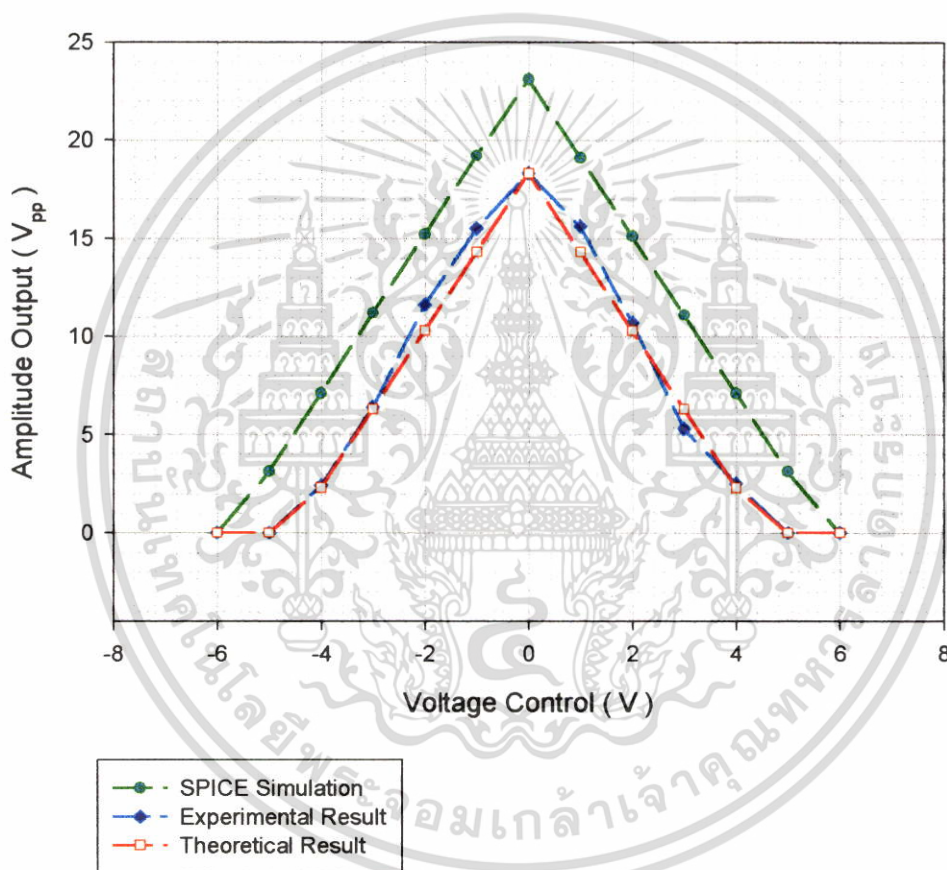
จากกราฟผลตอบสนองทางความถี่ พบว่า เมื่อ ความถี่ของการทำงาน มีค่าสูงขึ้น ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต จะมีค่าลดลง เนื่องจาก ข้อจำกัดของอุปกรณ์ออปแอมป์ เบอร์ uA741 ที่ใช้ในการเลียนแบบ แต่ เมื่อพิจารณาถึง ความแตกต่างของสัญญาณอินพุต ที่ป้อนเข้าไป พบว่า ขนาดของสัญญาณอินพุต ที่ป้อนเข้าไปในระบบ มีผลต่อ ผลตอบสนองทางความถี่ ของวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยที่ เมื่อขนาดของสัญญาณอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ มีค่าเพิ่มขึ้นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.6 เปรียบเทียบ ผลการทดลองการเลียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ , ผลการทดลองการต่อวงจรจริง และ ผลจากทางทฤษฎี

### 4.6.1 วงจรเวเนบรีดจ์ออสซิลเลเตอร์

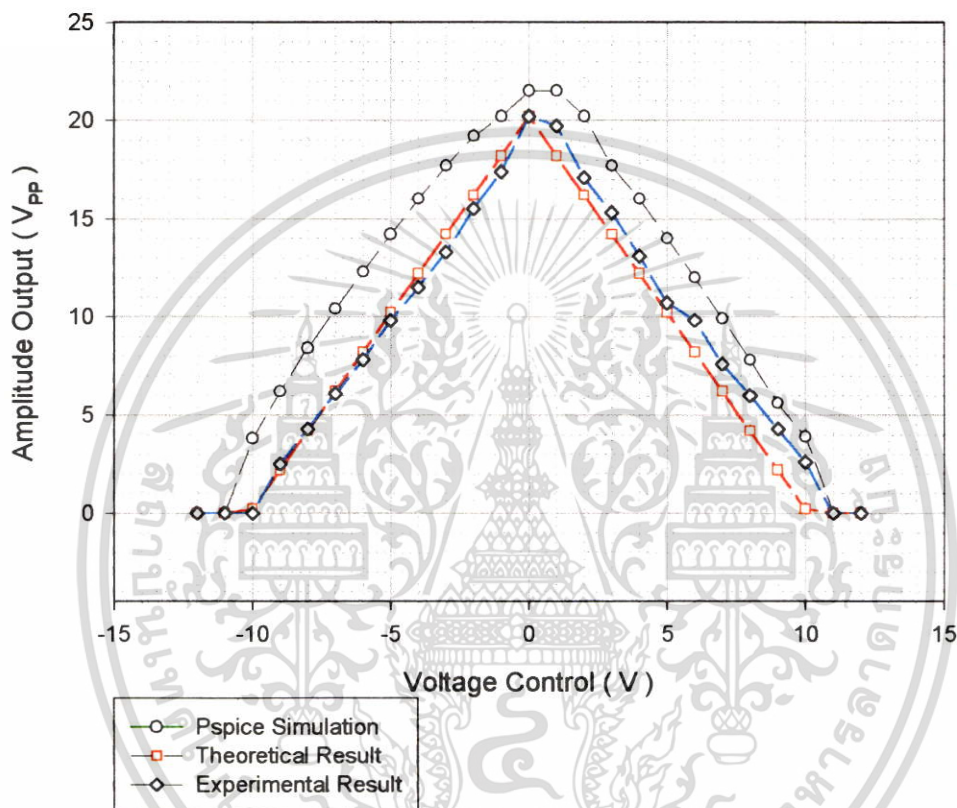
จากผลการทดลอง จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ ผลการทดลอง จากการต่อวงจรจริง ของวงจรเวเนบรีดจ์ออสซิลเลเตอร์ นำมาพล็อตกราฟ เปรียบเทียบกับ ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี แสดงดังกราฟ ในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 กราฟ ผลการทดลองจริง เปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จากทางทฤษฎี และ ผลจากการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรเวเนบรีดจ์ ออสซิลเลเตอร์ โดยแกนตั้งเป็นขนาดสัญญาณเอาต์พุต และแกนนอนเป็นขนาดสัญญาณอินพุตไฟตรง

#### 4.6.2 วงจรควอตราเจอร์ออสซิลเลเตอร์

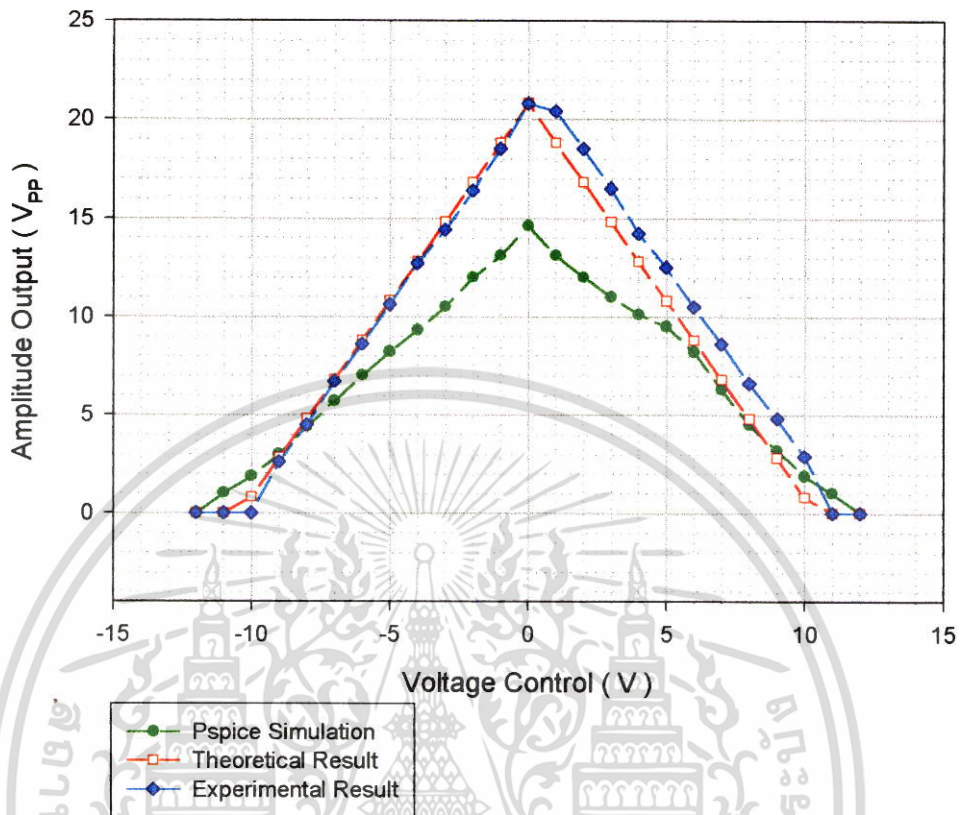
จากผลการทดลอง จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ ผลการทดลอง จากการต่อวงจรจริง ของวงจรควอตราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ นำมาพล็อตกราฟ เปรียบเทียบกับ ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี แสดงดังกราฟ ในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 กราฟ ผลการทดลองจริง เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี และ ผลจากการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรควอตราเจอร์ ออสซิลเลเตอร์ โดยแกนตั้งเป็นขนาดสัญญาณเอาต์พุต และแกนนอนเป็นขนาดสัญญาณอินพุตไฟตรง

#### 4.6.3 วงจรเฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์

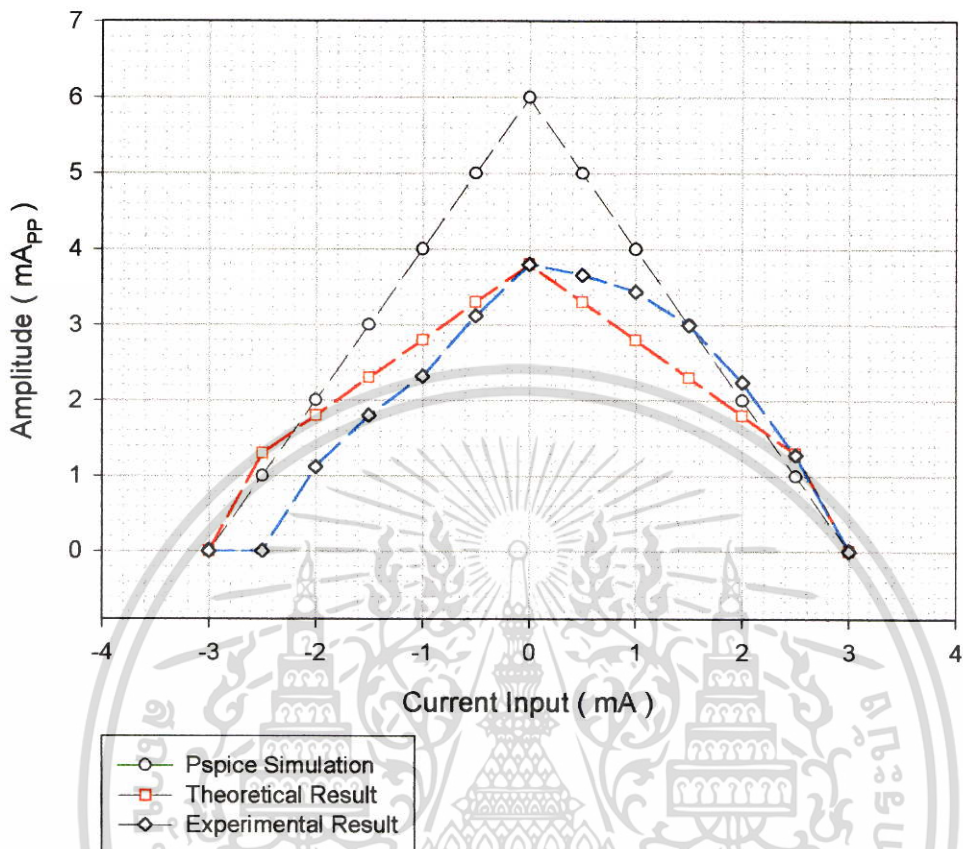
จากผลการทดลอง จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ ผลการทดลอง จากการต่อวงจรจริง ของวงจรเฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์ นำมาพล็อตกราฟ เปรียบเทียบกับ ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี แสดงดังกราฟ ในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 กราฟ ผลการทดลองจริง เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี และ ผลจากการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSpice ของวงจรเฟสชิฟต์ออสซิลเลเตอร์ โดยแกนตั้งเป็นขนาดสัญญาณเอาต์พุต และแกนนอนเป็นขนาดสัญญาณอินพุตไฟตรง

#### 4.6.4 วงจรควอดราราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ในโหมดกระแส

จากผลการทดลอง จากการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ ผลการทดลอง จากการต่อวงจรจริง ของวงจรควอดราราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ในโหมดกระแส นำมาพล็อตกราฟ เปรียบเทียบกับ ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี แสดงดังกราฟ ในรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 กราฟ ผลการทดลองจริง เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี และ ผลจากการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSPICE ของวงจรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ในโหมดกระแส โดยแกนตั้งเป็นขนาดสัญญาณเอาต์พุต และแกนนอนเป็นขนาดสัญญาณอินพุตไฟตรง

#### 4.7 สรุป

ในบทที่ 4 นี้เป็นการกล่าวถึง ผลการทดลองโดยการเลียนแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ ผลการทดลองจากการต่อวงจรจริง และ ได้ทำการเปรียบเทียบ ผลการทดลองดังกล่าว กับ ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี จะพบว่า ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ได้เป็นอย่างดี

## สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

จากวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการหาเทคนิคในการควบคุมขนาดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ให้มีค่าตามต้องการ ในรูปแบบใหม่ โดยมุ่งเน้นให้ระบบมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ไม่ต้องต่อวงจรใดๆเพิ่มเติม และ นอกจากนี้แล้ว เทคนิคดังกล่าว ยังไม่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขของการ การออสซิลเลต และ ความถี่ของการออสซิลเลต ซึ่งจากการวิจัยได้ข้อสรุปดังนี้

ในวงจรออสซิลเลเตอร์โดยทั่วไป ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ได้ นั้น จะขึ้นกับสถานะเริ่มต้นของระบบ ที่เวลา  $t=0$  ดังนั้นในการปรับขนาดของสัญญาณรูปไซน์นั้น จึงทำได้โดยการปรับค่า สถานะเริ่มต้นของระบบ เช่น การปรับค่า ไฟเลี้ยงของวงจร หรือ การกำหนดค่าสถานะเริ่มต้น ที่อุปกรณ์ เป็นต้น

แต่ในหลักการที่ได้นำเสนอดังกล่าว ได้ทำการป้อนสัญญาณไฟตรง เข้าไปในระบบ ทำให้ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ขึ้นกับ สถานะเริ่มต้นของระบบ และ สัญญาณไฟตรง ที่ป้อนเข้าไปในระบบ ดังนั้นในการปรับขนาดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ จึงทำได้โดยการปรับสัญญาณไฟตรงที่ป้อนเข้าระบบ แต่หลักการดังกล่าว สัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ได้ จะขึ้นอยู่กับ ไฟตรงค่าหนึ่ง แต่ สามารถที่จะเลือกสัญญาณคลื่นรูปไซน์ จากตำแหน่งอื่นในวงจร ที่เป็นตำแหน่งที่ปราศจากไฟตรงได้ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ สร้างเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณเอเอ็มได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เขียนแบบวงจรขึ้นมาในหลายๆวงจร ได้แก่ วงจรเวเนบริจ-ออสซิลเลเตอร์, วงจรควอทคราเจอร์ออสซิลเลเตอร์, วงจรเฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์, วงจรควอทคราเจอร์ในโหมดกระแส พบว่า ในแต่ละวงจรมันสามารถที่จะควบคุมขนาด สัญญาณคลื่นรูปไซน์ได้ แต่ มีข้อที่แตกต่างกัน คือ ช่วงของสัญญาณอินพุต ที่ป้อนเข้าไปควบคุม ซึ่งจะขึ้นกับรูปแบบของ วงจร ซึ่งเป็นข้อจำกัดประการหนึ่งของหลักการดังกล่าว

สุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ และสามารถให้แนวทางต่อผู้ที่สนใจพัฒนาเทคนิคการควบคุมขนาดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ต่อไป โดยนำเทคนิคดังกล่าว ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Filanovsky, I.M., "Oscillators with amplitude control by restoration of capacitor initial condition," in Proc. Inst. Elec. Eng., vol.134, pt. G. No.1, Feb. 1987, pp. 31-37.
- [2] Sitichai Pookaiyandom and Kanit Saivichit , " RC Phase shifter Variable Sinusoidal oscillators using Initial Condition-Restoration Amplitude control" , IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol.39, No.6, 1990 , pp.1038-1044 .
- [3] Filanovsky, I.M., "A sinusoidal VCO with control of frequency and amplitude" Circuits and Systems, 1989., Proceedings of the 32nd Midwest Symposium on , vol.1 , 14-16 Aug 1989 Page(s): 446 -449
- [4] Filanovsky, I.M. , Shui-Sheng Qin and Kothapalli,G. , "Sinusoidal Oscillator with Voltage controlled Frequency and Amplitude", Int.J.Electronics, Vol.68, No.1, 1990, pp.95-112.
- [5] Filanovsky, I.M., " A Wein bridge RC oscillator with fast amplitude control," Int. J. Electron., vol.58, 1985 , pp.817-826.
- [6] Filanovsky, I.M., and Stromsmoe.K.A., "Amplitude control in a Twin-T bridge RC-Oscillator using a windows comparator",Int.J.Electronics.Vol.61, 1986 , pp.197 – 206.
- [7] Panwit Tuwanut, Paramote Wardkein and Thongchai Maneechukate, "7 decade low frequency switched capacitor oscillator", Circuits and Systems, 2001. MWSCAS 2001. Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium on , Vol. 2 , 2001 pp. 785 -788
- [8] ปราโมทย์ วาดเขียน, ชัยรัตน์ วงษ์สุวรรณ และ ธงชัย มณีชูเกต , " การควบคุมแอมพลิจูดไขว้-ชอยคอลลอสซิลเลเตอร์ ด้วยผลตอบสนองบังคับแบบง่าย", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ , 2543 , หน้า 645-648
- [9] เบนจวรรณ ชรรวมุณี , ปราโมทย์ วาดเขียน และ ธงชัย มณีชูเกต, " การควบคุมค่าแอมพลิจูด ด้วยผลตอบสนองบังคับแบบง่ายสำหรับวงจรรอสซิลเลเตอร์ในโหมดกระแส", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 24 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2544 , หน้า 1018-1022
- [10] วิวัฒน์ กิรานนท์. วิศวกรรมการสื่อสาร. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง : อักษรสยามการพิมพ์. 2540.
- [11] ศรีบุตร แวงเจริญ และ ชนศักดิ์ บ่ายเที่ยง. สมการเชิงอนุพันธ์ 1. คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ : บริษัทวงตะวัน. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] วิวัฒน์ กิรานนท์. ทฤษฎีวงจรขั้ววงจรไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง : โครงการตำรา. 2540.
- [13] David E. Johnson , John L.Hilburn , Johnny R. Johnson. **Electric Circuit Analysis**. Prentice Hall International Inc.1989, pp.261-263

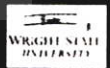


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IEEE MIDWEST SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS



DAYTON, OHIO  
AUGUST 14-17, 2001

BIRTHPLACE OF AVIATION

01CH37257

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7 Decade Low Frequency Switched Capacitor Oscillator

Panwit Tuwanut\* Paramote Wardkein\* Thongchai Maneechukate\*\*

\* Telecommunication Department. Faculty of Engineering.

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

Phone:66-2-3269901 Email s2061086@telecom.kmitl.ac.th

\*\* Physic Department. Faculty of Science.

Narasuan University. Phitsanulok 65000 Thailand.

### Abstract

In this work a sine wave switched-capacitor (SC) oscillator based on feedback SC BPF oscillator is proposed. Advantage of this technique is high stability, constant amplitude at wide frequency range and suitable for amplitude control by output forced response technique. In addition, frequency tuning can be adjusted by clock control, which without effect to stability. The experimental results conforming the validity of the theory are also presented.

### 1. Introduction

In general, a sine wave is important signal. It is used in measurement, instrumentation, electronic system and telecommunication system, etc. Usually, it is generated by various methods such as (1) positive feedback network (Wein bridge, Phase shift and Twin T oscillator, etc) technique, (2) recognized digital data of sinusoidal in ROM [1,2], read and convert it to be analog with A/D converter, (3) used difference equation [3] that has a result as a sine wave and (4) SC fashion [4,5] is used to be produced wave. For forth approach is appropriate with low frequency generation. All of manner, their problems are unable to generate sine wave that constant amplitude at wide frequency range. Especially first technique, frequency adjusted in wide range it need to be change values of R and C which it cause to be variation of amplitude sine wave and condition of oscillation. It is not convenient to be implemented. In this work, we present a technique to generate sine wave by used a positive feedback SC BPF filter which constant amplitude through 7 decade wide frequency range is achieved. Another advantage for 4'th method is frequency tuning can be adjusted by clock control SC network which we don't need change C in the circuit.

Beside that, network structure is convenient for amplitude control by dc forced output response technique [6] and stability control. In experiment we used IC ( MF5 ) as a SC BPF filter, the experimental

results agree well with the validity of technique are also presented. In section 2, the oscillator based on quadrature integrator and feedback SC Band pass filter are discussed and amplitude control is presented also. In section 3, implementation of feedback SC BPF oscillator is described. Experimental results from this circuit are presented and conclusion is described in section 4.

### 2. Principle

In general, the consideration of behavior of sine wave oscillator that it is directly generated must be almost used second order differential equation to describe.

Since sine wave is a one of natural output responses of differential equation. Which laplace transform is a one of techniques that used to be solved differential equation in s domain. By this fashion the condition and frequency of oscillation are simply accomplished but it is difficult to find amplitude of sine wave. While we can find all of information from the differential equation that it is solved by directly method. In this here, both techniques are used to solve differential equation that have output response as a pure sine wave. In order to be simple analysis, quadrature oscillator scheme is used to be model as shown in figure 1.

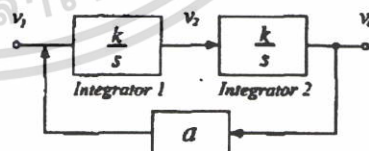


Fig 1. Ideal integrator quadrature oscillator

Which  $v_0$  ,  $v_1$  ,  $v_2$  are voltage at node 1, 2 and 3, respectively. It follows that

$$s^2 = ak^2 \quad (1)$$

$$\omega = k\sqrt{a} \quad (2)$$

As  $-a = |a|$ , and  $k$  are constant,  $\omega$  is frequency of oscillation while the ideal integration function on  $s$  domain is represented by  $\frac{k}{s}$ . For figure 1. if integrator is ideal,  $v_1$ ,  $v_2$  and  $v_o$  output are sine wave, so that, this network will oscillate by adjustable of oscillation condition doesn't need. It has only just one thing that we do, initial condition of oscillator is provided.

In the case that integrator in figure 1. is non ideal, and  $\frac{k}{s+\epsilon_1}$ ,  $\frac{k}{s+\epsilon_2}$  are non ideal integration function of integrator one and two, respectively.  $\epsilon_1, \epsilon_2$  as a real constant. So that characteristic equation is a

$$s^2 + (\epsilon_1 + \epsilon_2)s + \epsilon_1\epsilon_2 - ak^2 = 0 \quad (3)$$

Which four pattern of natural response of equation (3) are overdamped (a), critically damped (b), underdamped (c) and undamped (d) shown in figure 2.

In the case of OSC scheme is a figure 1. If integrators are non ideal that the complete sine wave is not produced so it is not suitable for implementation. Hence we will consider oscillator scheme constructed by BPF and feedback amplifier as shown in figure 3.

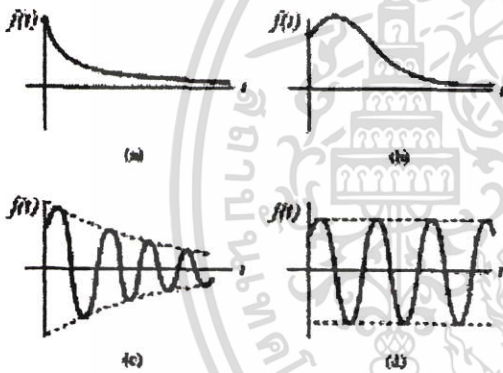


Fig 2. The response of equation (3) (a) overdamped (b) critically damped (c) underdamped and (d) undamped

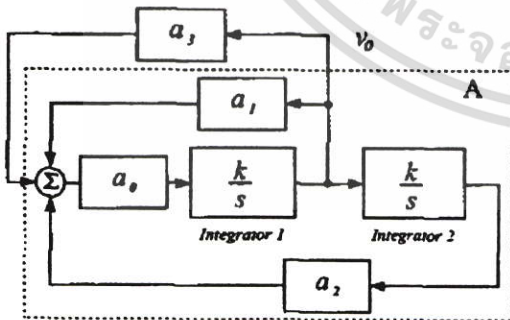


Fig 3. Ideal integrator state variable oscillator

It is found that

$$s^2 - a_0k(a_1 + a_3)s - k^2a_0a_2 = 0 \quad (4)$$

If  $a_1 = -a_3$  and  $a_2a_0 = -|a_0a_2|$  so that

$$s^2 = -k^2|a_0a_2| \quad (5)$$

$$\omega = k\sqrt{|a_0a_2|} \quad (6)$$

In figure 4. show oscillator scheme that both integrator are non ideal

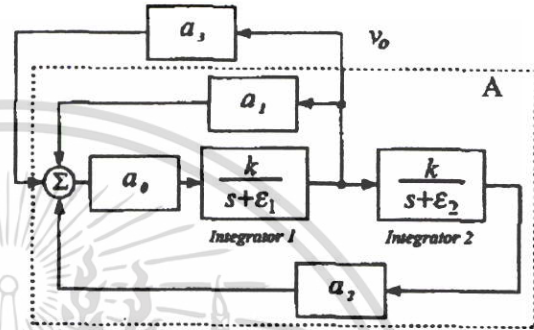


Fig 4. Non ideal integrator state variable oscillator

so that characteristic equation indicate in equation (7)

$$s^2 + (\epsilon_1 + \epsilon_2 - a_0k(a_1 + a_3))s = a_0k\epsilon_2(a_1 + a_3) + a_0a_2k^2 \quad (7)$$

Suppose that

$$a_3 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{a_0k} - a_1 \quad (8)$$

and

$$\epsilon_1(\epsilon_1 + \epsilon_2) + a_0a_2k^2 - \epsilon_1\epsilon_2 = -[\epsilon_1(\epsilon_1 + \epsilon_2) + a_0a_2k^2 - \epsilon_1\epsilon_2] \quad (9)$$

The perfect oscillator is found in figure 4

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{[\epsilon_2(\epsilon_1 + \epsilon_2) + a_0a_2k^2 - \epsilon_1\epsilon_2]} \\ &= \sqrt{[\epsilon_2^2 + a_0a_2k^2]} \end{aligned} \quad (10)$$

which  $\omega$  is frequency of oscillation.

The advantage of second oscillator scheme is when the both integrator are non ideal we can tune  $a_3$  in order to achieve perfect oscillator while first scheme cannot be obtained.

In this paper we use a MF5 as a SC BPF as shown in block A

**Amplitude Control**

For this here, the dc forced output response amplitude control technique is used as shown in [6]. For this circuit we connect positive input of op-amp in feedback section ( op-amp (2) ) with voltage source instead of terminated to ground as shown in fig 6.. Which amplitude relative to dc voltage source as indicated below

$$A = \begin{cases} Bv_i + |V_{SAT}| & v_i < 0 \\ Bv_i - |V_{SAT}| & v_i > 0 \end{cases} \quad (11)$$

which A is an amplitude sine wave output and B as a constant.  $v_{SAT}$  is a saturation voltage.

**3. Circuits and Experiment**

In order to verify this technique we use circuit in figure 5. that equivalent to block diagram in figure 4. For IC MF5 is used as SC BPF and IC TL081 as an op-amp show in figure 5.

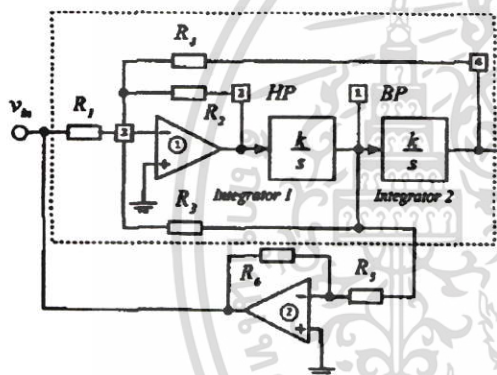


Fig 5. SC-BPF and its feedback oscillator

From figure 5., characteristic equation achieve as following

$$s^2 + skR_2 \frac{1}{R_2} - \frac{R_5}{R_6} R_1 + k^2 \frac{R_1}{R_4} = 0 \quad (12)$$

Which  $k = \frac{2\pi f_{CLK}}{100}$  or  $k = \frac{2\pi f_{CLK}}{50}$  [7] is a constant of integrator on SC circuit of MF5,  $f_{clk}$  is a clock frequency

that SC circuit control. Assume  $\frac{1}{R_2} - \frac{R_5}{R_6} R_1 = 0$

frequency of oscillation as a  $\omega = k \sqrt{\frac{R_1}{R_4}}$ .

To control amplitude, circuit in fig 5 is modified by instead of ground at positive input pole of second op-amp with voltage source. In experiment, supply voltage  $\pm 5V$  is used  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 5k\Omega$ . It follow that amplitude of sine wave is

$$A = \begin{cases} 2v_{DC} + |V_{SAT}| & v_i < 0 \\ 2v_{DC} - |V_{SAT}| & v_i > 0 \end{cases} \quad (13)$$

In this case  $|V_{SAT}| = 3.6V$  so that

$$A = \begin{cases} 2v_{DC} + 3.6 & v_i < 0 \\ 2v_{DC} - 3.6 & v_i > 0 \end{cases} \quad (14)$$

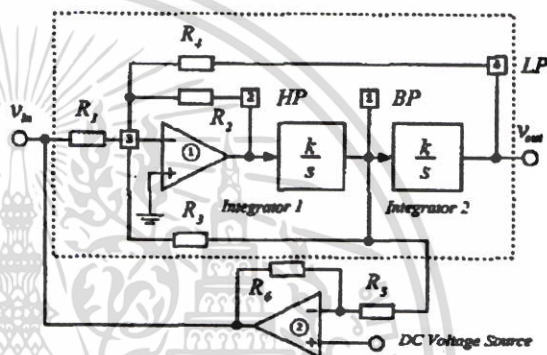


Fig 6. Complete SC oscillator and amplitude control.

Experimental results of frequency and amplitude control are respectively shown in fig 7. and fig 9.

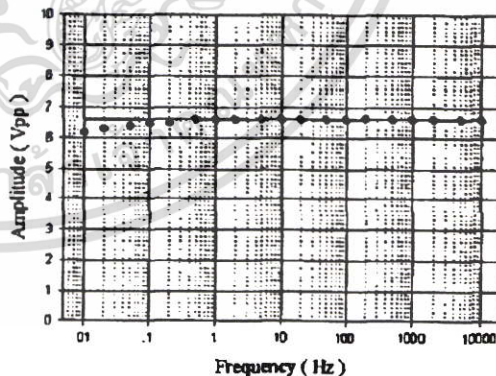


Fig 7. Frequency of oscillation versus its amplitude at  $V_{DC}$  as a zero.

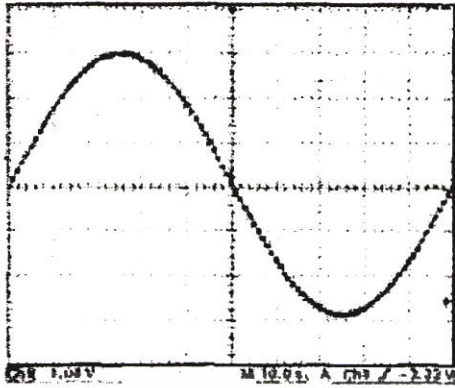


Fig 8. Experimental result of sine wave output oscillator at frequency 0.01 Hz

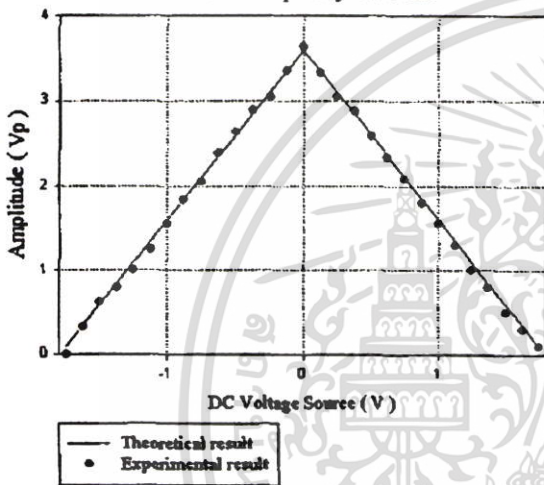


Fig 9. Amplitude of sine wave output versus DC voltage source which used to be amplitude control.

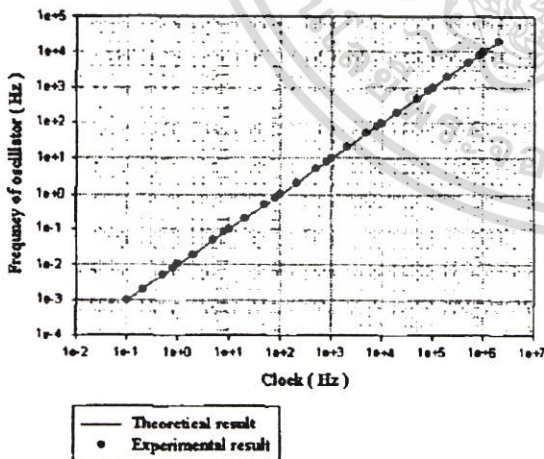


Fig 10. Frequency of oscillation versus clock frequency

#### 4. Conclusion

From experimental results, we found that oscillator operates at wide frequency range with constant amplitude and high stability, because of feedback part of proposed circuit will offset phase at the whole frequency, in order to it is still oscillate while feedback amplifier of fig 1. unable to operate. In addition, amplitude control by dc forced response can be available with dc feed at positive input of op-amp in feedback part instead of ground. Furthumore frequency tuning can be easily done by adjust frequency of clock control SC.

#### 5. Reference

- [1] J.M. Workley: "High-Resolution Digital Sine wave Generation", *Electronic Lett.*, 1983, 19, 3, pp 123-124
- [2] K.Furuno, K.Hirano, Y.Ito.: "Design of digital sinusoidal oscillators with absolute periodicity", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic System*, vol. AES-11, No. 6, pp. 1286-1298, November, 1975
- [3] Douglas B.Cox.: "A digitally programmable switched-capacitor universal active filter/oscillator", *IEEE Journal of Solid State Circuit*, vol. SC-18, No. 4, pp. 383-389, August 1983
- [4] J.L.Huertas, A.Rodriguez. Vazquez. And H.Perez.: "A novel SC oscillator", *IEEE Trans. On Circuit and system*, vol CAS-31, No-3, pp310-312, March 1984
- [5] Paul E. Fleischer, A Ganesan and Kenneth R. Laker.: "A switch capacitor oscillator with precision amplitude control and guaranteed start-up", *IEEE Journal of Solid State Circuit*, vol. SC-20, No. 2, pp. 641-647, April 1985
- [6] Paramote Wardkein, Chairat Wongsuwon and Thongchai Maneechukate.: "The Simple sinusoidal oscillator amplitude control by forced response", *23rd Electrical Engineering Conference (Thai Language)*, pp. 645-648, November 2000
- [7] Datasheet IC MF5, "National Data Acquisition Databook", National Semiconductor, pp 7-102 - 7-116

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นามสกุล นาย ปานวิทย์ ธุระนุติ  
 วัน เดือน ปี เกิด 21 กันยายน 2520  
 ภูมิลำเนาเดิม จังหวัดน่าน  
 ประวัติการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)  
 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ปีการศึกษา 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้