

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

ระบบเข้ารหัสลับเสียงโดยใช้ตัวดึงดูดเคออสติก

VOICE CRYPTOSYSTEM FOR USING CHAOTIC ATTRACTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

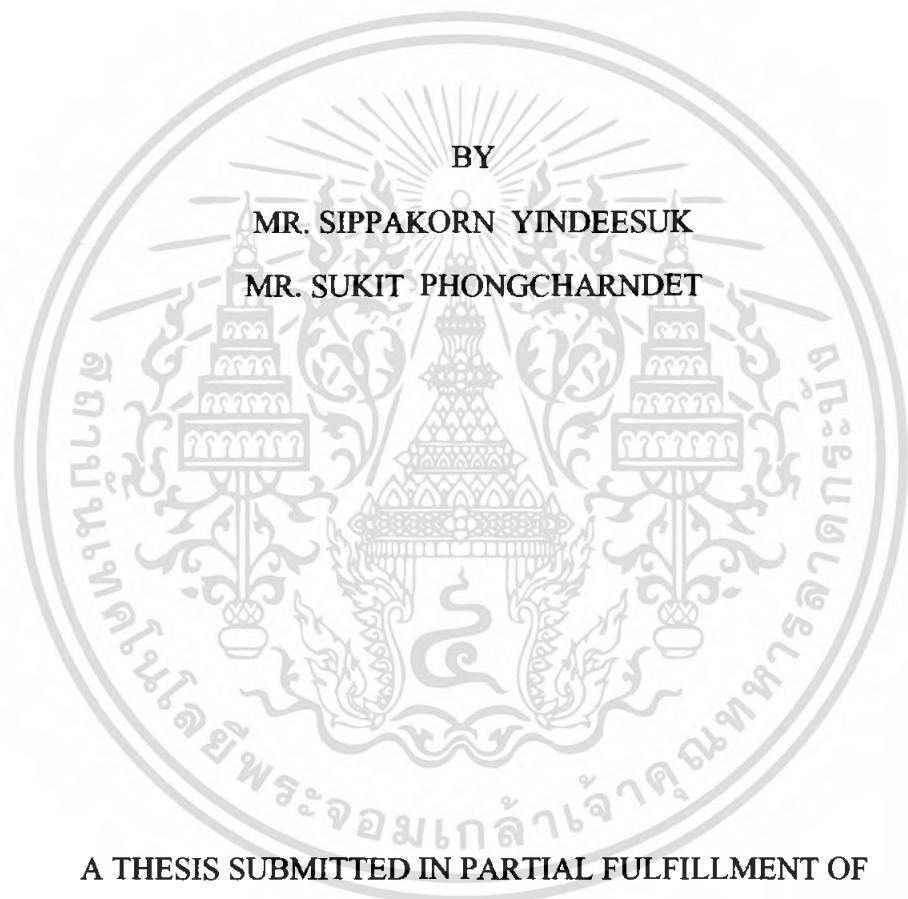
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**VOICE CRYPTOSYSTEM FOR USING CHAOTIC ATTRACTOR**

**BY**

**MR. SIPPAKORN YINDEESUK**

**MR. SUKIT PHONGCHARNDET**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบเสนอปริญญาบัตร

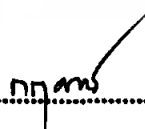
หัวข้อปริญญาบัตร ระบบเข้าหัดลับเสียงโดยใช้ตัวคึงคุดเคออดิก  
ชื่อนักศึกษา นายสีปกร ยินดีสุข รหัส 47010838  
นายสุกิจ พงศ์ชาญเดช รหัส 47010850  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปิติเขต ผู้รักษา  
ผศ.กฤดากร กล่อมการ  
ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ  
ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ  
ปีการศึกษา 2550

ปริญญาบัตรฉบับนี้ได้รับการเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว



( รศ.ดร.ปิติเขต ผู้รักษา )

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์



( ผศ.กฤดากร กล่อมการ )

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อปริญญานิพนธ์** ระบบเข้ารหัสลับเสียงโดยใช้ตัวคิงคอคเคออดิก

**ชื่อนักศึกษา** นายสิปปกร ยินดีสุข รหัส 47010838

นายสุกิจ พงศ์ชาญเดช รหัส 47010850

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา

ศศ.ภฤดากร กล่อมการ

**ระดับการศึกษา** ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

**ปีการศึกษา** 2550

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้กล่าวถึงการศึกษาการออกแบบวงจรเข้ารหัสลับโดยใช้องค์ความรู้จากระบบ ตัวคิงคอคเคออดิกหรือระบบสัญญาณอลวน ซึ่งมีหลักการทำงานคือ การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ด้วยการนำข้อมูลที่ต้องการส่งไปให้ผู้รับ มาทำการเข้ารหัสด้วยสัญญาณตัวคิงคอคเคออดิก. เพื่อให้ผู้ที่จะโจรกรรมข้อมูลหรือแฮคเกอร์ ไม่สามารถถอดรหัสข้อมูลได้หรือถอดรหัสได้ยากที่สุด เนื่องจากวงจรเข้ารหัสจะเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการเข้ารหัสอยู่ตลอดเวลา ทำให้คาดเดารูปแบบสัญญาณได้ยากมาก

ระบบนี้จะสามารถนำไปใช้ในด้านการศึกษาหรือระบบที่ต้องการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลในระดับสูง เช่น ในด้านธุรกิจที่มีข้อมูลที่เป็นความลับที่ไม่อยากเปิดเผยหรือและต้องการความปลอดภัยของข้อมูลในระดับสูง หรือข้อมูลที่เป็นความลับทางการทหาร

**Thesis Title** Design cryptosystem for using Chaotic Attractor

**Student** Mr. Sippakorn Yindeesuk ID. 47010838  
Mr. Sukit Phongcharndet ID. 47010850

**Advisor** Assoc.Prof.Dr. Pitikhate Sooraksa  
Assist.Prof. Kiddakorn Klomkarn

**Graduate Level** Bachelor Degree of Information Engineering

**Department** Information Engineering

**Academic Year** 2007

### ABSTRACT

This thesis describes the design cryptosystem using chaotic attractors. To protect contents from hackers. Once the content is encrypted by chaos signals. The hacker can't steal the contents.

The Content is difficult to steal because Chaos signals always changes encryption key. This system can be applied to a telecommunication system or a high risk security system such as business system to keep the customer's data or in military top secret activation.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านต่าง ๆ ทั้งคำปรึกษา ทางด้านวิชาการ และคำแนะนำในการปฏิบัติงาน รวมถึงความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือ และ อุปกรณ์ต่าง ๆ จากอาจารย์ปิติเชต สุรรักษา อาจารย์ชกฤตากร กล่อมการ และพี่ศักดา สาครตานนท์ จนกระทั่งสำเร็จเป็นปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยห่วงใยและให้การสนับสนุนด้านการศึกษาก่อนอย่างดีมาโดยตลอด รวมทั้งขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำ ทางด้านวิชาการ และการดำเนินงานในหลายๆด้าน

คุณประ โยชน์ที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายสิปกร ยินดีสุข

นายสุกิจ พงษ์ชาญเดช

ผู้จัดทำ

## สารบัญ

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 สถาปัตยกรรมของระบบ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ตัวคิ่งคูดเคออดติก	3
2.1.1 นิยามเคออดติก	3
2.1.2 คุณสมบัติของเคออด	4
2.1.3 ประโยชน์ของเคออด	5
2.2 วงจรของ Chua(Chua's Circuit)	6
2.3 ตัวคิ่งคูดของ Lorenz	11
2.4 ออปแอมป์	13
2.4.1 ทฤษฎีออปแอมป์	13
2.4.2 สัญลักษณ์ของออปแอมป์	14
2.4.3 คุณสมบัติเชิงอุดมคติของออปแอมป์	16
2.4.4 โครงสร้างภายในออปแอมป์	18
2.4.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานออปแอมป์	20
2.5 หลักการซิงโครไนซ์ของระบบเคออดติก	25
บทที่ 3 วิธีการออกแบบ	
3.1 ใช้ Simulink ในโปรแกรม Matlab สร้างวงจรตัวคิ่งคูดของ Chua จากสมการ	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

3.2	ทดลองเขียนวงจรตัวคิ่งคูดของ Chua โดยใช้ Pspice	31
3.3	สร้างวงจรที่ปรับปรุงขึ้นจากวงจรตัวคิ่งคูดของ Lorenz	32
3.4	ทดลองเขียนวงจรที่ปรับปรุงขึ้นจากวงจรตัวคิ่งคูดของ Lorenz	34
3.5	วงจรที่ใช้ทำโครงการงาน	35
3.6	ทดลองเขียนวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน โดยใช้ Pspice	39
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>		
4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจร Chua	44
4.2	ผลที่ได้จากการทดลองด้วยวงจร Chua	45
4.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน	46
4.3.1	วงจรตัวคิ่งคูด Lorenz ทางด้านฝั่งรับและฝั่งส่ง	46
4.3.2	วงจรมอดคูดเลชัน	47
4.3.3	วงจรคีมอดคูดเลชัน	48
4.4	ผลการทดลองวงจรตัวคิ่งคูด	49
4.4.1	ฝั่งส่ง	49
4.4.2	ตัวคิ่งคูดภาครับ	52
4.4.3	วงจรทั้งหมดเมื่อต่อทั้งภาคส่งและภาครับเข้าด้วยกันและ ใส่เสียงเพื่อทดลองวงจร	53
4.4.4	เสียงที่ได้จากการทดลอง	56
<b>บทที่ 5 สรุป</b>		
5.1	สรุปการพัฒนาโครงการงาน	57
5.2	ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านเทคนิค	57
5.3	แนวทางในการพัฒนาต่อ	58
<b>บรรณานุกรม</b>		59

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 วงจร Chua	7
รูปที่ 2.2 i-v characteristic ของ Chua ไคโอด	8
รูปที่ 2.3 Chua ไคโอด	10
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างวงจร Chua ที่ใช้งานได้ในทางปฏิบัติ	10
รูปที่ 2.5 สัญญาณเคออสจาก $v_{c_1}, v_{c_2}$ เมื่อเทียบกับเวลา	11
รูปที่ 2.6 สัญญาณเคออสจาก $v_{c_1}$ เป็นแกน y และ $v_{c_2}$ เป็นแกน x	11
รูปที่ 2.7 วงโคจรของระบบ Lorenz ที่ค่าพารามิเตอร์ $r=28, \sigma = 10, b = 8/3$	12
รูปที่ 2.8 แสดงการขั้วต่างๆของออปแอมป์	14
รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์อย่างง่ายของออปแอมป์	15
รูปที่ 2.10 การป้อนสัญญาณของออปแอมป์	15
รูปที่ 2.11 แสดงการหักล้างกันของสัญญาณ input	16
รูปที่ 2.12 การป้อนสัญญาณ รวมให้ขั้ว input	16
รูปที่ 2.13 ลักษณะสมบัติ โอนย้ายของออปแอมป์	17
รูปที่ 2.14 แหล่งกำเนิดแรงดันที่ฝังในตัวออปแอมป์	18
รูปที่ 2.15 วงจรภายในของออปแอมป์	19
รูปที่ 2.16 วงจรขยายแบบกลับเฟส	20
รูปที่ 2.17 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส	21
รูปที่ 2.18 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง	22
รูปที่ 2.19 วงจรอินทิเกรเตอร์	24
รูปที่ 2.20 โค้ดแอสเซมบลี แสดงรูปแบบการซิงโครไนซ์ของระบบไครฟ์และระบบเรสพอนส์	25
รูปที่ 2.21 แสดงวงจรซิงโครไนซ์ที่มีระบบไครฟ์และระบบเรสพอนส์ด้วยโปรแกรม Simulink	26
รูปที่ 2.22 กราฟแสดงสัญญาณระหว่าง $X, X_r, X-X_r$	27
รูปที่ 2.23 โค้ดแอสเซมบลีแสดงระบบเคออสที่มีการรวมสัญญาณและแยกสัญญาณ	27
รูปที่ 2.24 แสดงวงจรซิงโครไนซ์ที่มีการรวมสัญญาณและแยกสัญญาณด้วยโปรแกรม Simulink	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 2.25 a) กราฟที่ได้จากการวัดค่า $X$	28
b) กราฟที่ได้จากการวัดค่า $X_r$	
c) กราฟสัญญาณข้อมูลที่รับเข้า $i(t)$	
d) กราฟสัญญาณข้อมูลที่ส่งออก $i_r(t)$	
e) กราฟสัญญาณข้อมูลที่มอดูเลชันกับสัญญาณเคออดิก	
f) กราฟการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณเข้า $i(t)$ กับสัญญาณออก $i_r(t)$	
รูปที่ 3.1 วงจรตัวคิ่งคู่ของ Chua จากโปรแกรม Simulink	30
รูปที่ 3.2 กราฟที่ได้จากการพล็อตค่าวงจรรูป3.1 จากโปรแกรม Matlab	30
ของวงจรตัวคิ่งคู่ของ Chua	
รูปที่ 3.3 วงจรตัวคิ่งคู่ของ Chua จากโปรแกรม Pspice	31
รูปที่ 3.4 กราฟที่ได้จากการวัดค่า จากโปรแกรม Pspice ของวงจรตัวคิ่งคู่ของ Chua	31
รูปที่ 3.5 วงจรที่ปรับปรุงขึ้น จากวงจรตัวคิ่งคู่ของ Lorenz โดยโปรแกรม Simulink	32
รูปที่ 3.6 กราฟ $x, y, z$ ที่ได้จากวงจรตัวคิ่งคู่ของ Lorenz โดยใช้โปรแกรม Simulink	33
รูปที่ 3.7 พล็อตกราฟจากค่าที่ทำการจำลอง(Simulate)ได้จากวงจรตัวคิ่งคู่ของ Lorenz	33
รูปที่ 3.8 วงจรที่ปรับปรุงจากวงจรตัวคิ่งคู่ของ Lorenz จากโปรแกรม Pspice	34
รูปที่ 3.9 กราฟที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม Pspice ของวงจรที่ปรับปรุงจาก Lorenz	34
รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน(Lorenz) ทางค่านั่ง โดยโปรแกรม Simulink	35
รูปที่ 3.11 กราฟ $x, y, z$ จากวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)โดยใช้โปรแกรม Simulink	35
รูปที่ 3.12 พล็อตกราฟ x-y จากค่าที่ทำการจำลอง(Simulate)ของวงจรที่ใช้ทำโครงการงาน(Lorenz)	36
รูปที่ 3.13 พล็อตกราฟ x-z จากค่าที่ทำการจำลอง(Simulate)ของวงจรที่ใช้ทำโครงการงาน(Lorenz)	36
รูปที่ 3.14 พล็อตกราฟ y-z จากค่าที่ทำการจำลอง(Simulate)ของวงจรที่ใช้ทำโครงการงาน(Lorenz)	37
รูปที่ 3.15 วงจรทั้งภาคส่งและภาครับ ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน(Lorenz)	37
รูปที่ 3.16 กราฟ $x', y', z'$ จากวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน(Lorenz) โดยใช้โปรแกรม Simulink	38
รูปที่ 3.17 กราฟที่ได้จากการ plot $x-x'$ ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	38
รูปที่ 3.18 Pspice วงจรภาคส่งที่ใช้ในการสร้างโครงการ	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.19 ค่า $V(C1:2)$ (x) ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	39
รูปที่ 3.20 ค่า $V(C2:2)$ (y) ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	39
รูปที่ 3.21 ค่า $V(C3:2)$ (z) ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	40
รูปที่ 3.22 พล็อตแกน $x = V(C1:2)$ แกน $y = V(C2:2)$ ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	40
รูปที่ 3.23 พล็อตแกน $x = V(C1:2)$ แกน $y = V(C3:2)$ ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	40
รูปที่ 3.24 พล็อตแกน $x = V(C2:2)$ แกน $y = V(C3:2)$ ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	41
รูปที่ 3.25 วงจรทั้งภาคส่งและภาครับที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	41
รูปที่ 3.26 ค่า $V(C21:2)$ (x') ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	42
รูปที่ 3.27 ค่า $V(C22:2)$ (y') ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	42
รูปที่ 3.28 ค่า $V(C23:2)$ (z') ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	42
รูปที่ 3.29 กราฟที่ได้จากการ plot x-x' ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)	43
รูปที่ 4.1 วงจรที่ต่อเสร็จแล้ว	44
รูปที่ 4.2 กราฟที่ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ ด้วยออสซิลโลสโคป	45
รูปที่ 4.3 วงจรตัวคิ่งคูดฝั่งส่ง - รับ	46
รูปที่ 4.4 วงจรตัวคิ่งคูดฝั่งส่ง	47
รูปที่ 4.5 วงจรมอดคูดเลนซ์	47
รูปที่ 4.6 วงจรคีมอดคูดเลนซ์	48
รูปที่ 4.7 กราฟที่ได้จากออสซิลโลสโคป จาก ขา6 OP-AMP LF351 ทั้ง 3 ค่า เรียงค่า x,y,z	49
รูปที่ 4.8 ค่าจากออสซิลโลสโคป จาก ขา6 OP-AMP LF351 ทั้ง 3 ค่า เรียงค่า x-y , x-z , y-z	50
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่า x , y , z จากผลที่ได้กับโปรแกรม Matlab และ Pspice	51
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่า x-y , x-z , y-z จากผลที่ได้กับโปรแกรม Matlab และ Pspice	51
รูปที่ 4.11 ค่าจากออสซิลโลสโคป จาก ขา6 OP-AMP LF351 ทั้ง 3 ค่า เรียงค่า x',y',z'	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.12	กล่องภาคส่ง (วงจรวัดคิ่งคูภาคส่งกับวงจรมอดคูเลขัน)	53
รูปที่ 4.13	กล่องภาครับ (วงจรวัดคิ่งคูภาครับกับวงจรมอดคูเลขัน)	53
รูปที่ 4.14	อุปกรณ์โคขรวม	54
รูปที่ 4.15	ค่า $x(\text{บน}) - x'$ (ล่าง)	54
รูปที่ 4.16	ค่า $y(\text{บน}) - y'$ (ล่าง)	55
รูปที่ 4.17	ค่า $z(\text{บน}) - z'$ (ล่าง)	55
รูปที่ 4.18	ค่าที่ได้จากการวัด $x-x'$	55
รูปที่ 4.19	เสียงต้นฉบับที่ยังไม่มีการเข้ารหัส	56
รูปที่ 4.20	สัญญาณเคออดคิกที่นำมา	56
รูปที่ 4.21	เสียงต้นฉบับที่มีการเข้ารหัส	56
รูปที่ 4.22	เสียงที่ได้จากการถอดรหัสด้วยวงจรมอดคูเลขัน	56

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวัน และความก้าวหน้าในเทคโนโลยีการสื่อสารทำให้เราหันมาให้ความสำคัญต่อการสื่อสารผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ก่อให้เกิดการนำเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลมาใช้ในวงการธุรกิจต่างๆ การสื่อสารนั้นมีทั้งข้อมูลทั่วไปและข้อมูลที่เป็นความลับ โดยข้อมูลที่สำคัญหรือเป็นความลับนั้น มีความเสี่ยงในการถูกโจรกรรมข้อมูล จึงมีการนำเทคโนโลยีต่างๆ ที่ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อรักษาความลับของข้อมูล มาใช้เพื่อป้องกันการโจรกรรม

เทคโนโลยีหนึ่งที่ได้นำมาใช้คือ การเข้ารหัสข้อมูล โดยในการติดต่อสื่อสารข้อมูลที่มีความสำคัญหรือข้อมูลที่เป็นความลับ ไม่อยากเปิดเผยต่อสาธารณะ จะมีการนำข้อมูลพวกนี้มาเข้ารหัสเพื่อสร้างความปลอดภัยให้กับข้อมูล แต่ในการเข้ารหัสในปัจจุบันถือเป็นรูปแบบ สเตติก (Static) คือมีรหัสที่ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเป็นรหัสเดิมตลอด ทำให้แฮกเกอร์ หรือ ผู้โจรกรรมสามารถค้นเส้นทางของข้อมูลเพื่อเก็บแพ็คเกจของข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสไว้ นำมาถอดรหัส ซึ่งข้อมูลที่ถูกโจรกรรมจะมีการรหัสที่คงที่ตลอดทำให้สามารถแกะรหัสได้ง่าย ดังนั้นผู้จัดทำโครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเข้ารหัสและระบบตัวคิงคูดเคออดิก และได้ทำสร้างตัวเข้ารหัสจากระบบตัวคิงคูดเคออดิก ซึ่งเป็นการเข้ารหัสแบบเรียลไทม์ (Real-time) มาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูล โดยรหัสรับที่ได้จากระบบตัวคิงคูดเคออดิก จะเปลี่ยนแปลงค่ารหัสรับอยู่เรื่อยๆ ทำให้ยากต่อการแกะรหัสหรือโจรกรรม ทำให้ข้อมูลมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์

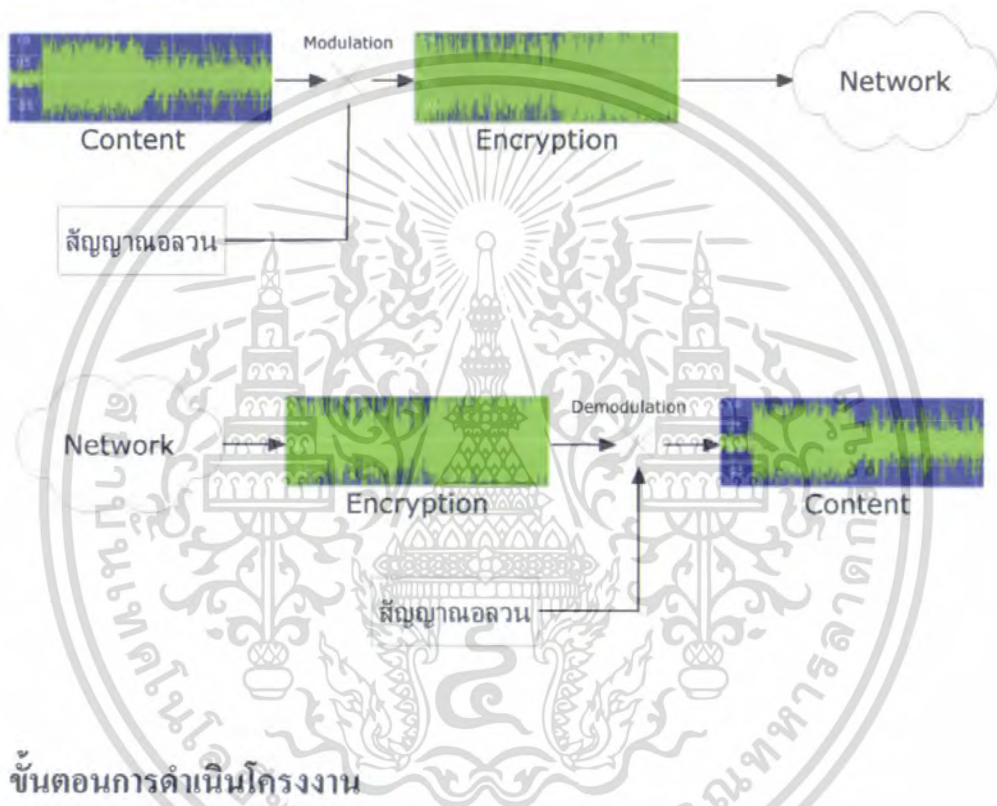
- เพื่อสร้างระบบเข้ารหัสลับที่สามารถรักษาความปลอดภัยของข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น
- เพื่อศึกษาวงจรรูปแบบต่างๆของระบบตัวคิงคูดเคออดิก ที่มีอยู่ในปัจจุบัน
- เพื่อสร้างวงจร ตัวคิงคูดเคออดิก ในรูปแบบของตัวเองขึ้นมา โดยใช้พื้นฐานจากตัวคิงคูดเคออดิก
- สามารถนำไปใช้งานกับข้อมูลที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

ระบบเข้ารหัสโดยใช้ ตัวคั้งคูดเคออดิก สามารถทำการเข้ารหัสข้อมูลเสียงที่ส่งผ่าน ไปยัง  
เครือข่าย โดยไม่สามารถทำการแกะรหัสข้อมูลกลางทางได้

### 1.4 สถาปัตยกรรมของระบบ



### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการงาน

- ศึกษาการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทางไฟฟ้า
- ศึกษาระบบวงจร ตัวคั้งคูดแบบเคออดิก
- ทดลองต่อวงจร ตัวคั้งคูดเคออดิก ของ Chua เพื่อดูการทำงาน
- ศึกษา Simulink ใน โปรแกรม MATLAB® เพื่อใช้ในการจำลองวงจร
- ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวงจรจาก สมการ เป็นวงจร
- ศึกษาระบบวงจร ตัวคั้งคูดเคออดิก ของ ลอเรนซ์
- เริ่มออกแบบวงจร Lorenz
- ใช้โปรแกรม ORCAD PSPICE® ในการทดลองระบบที่จะสร้างก่อนสร้างจริง
- ทดลองต่อวงจร Lorenz
- นำวงจรที่ได้ไปใช้กับข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ตัวดึงดูคเคออสติก

##### 2.1.1 นิยามเคออสติก

เคออส ตามความหมายในพจนานุกรมหมายถึง ความสับสนวุ่นวายไร้ระเบียบ แต่เคออสที่เราได้ศึกษานั้นคือการศึกษาเกี่ยวกับเคออสในทางคณิตศาสตร์ หรือ Deterministic Chaos โดยในความหมายทางคณิตศาสตร์ คือ สภาพหรือกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพ(Unstable) หากมีการกระทบเพียงเล็กน้อย อาจจะทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เป็นเส้นทางคดเคี้ยว วุ่นวายอลวน หรือในบางครั้งอาจจะเกิดการกระโดดข้าม ดังนั้นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจึงไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายให้ถูกต้องแม่นยำได้ [1]

พฤติกรรมแบบอลวน(Chaotic Behavior) เป็นพฤติกรรมที่ดูไร้ระเบียบ ที่ดูเหมือนว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มเอา(Random) แต่เป็น Deterministic ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งที่จริงแล้วแฝงไปด้วยความเป็นระเบียบ(Order)

ระบบที่ประพฤติตัวแบบเคออส จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้น(Sensitively Dependent on Initial Condition) ทำให้ไม่สามารถทำนายได้ในระยะยาว(Long-Term Unpredictable) โดยความลาดคด เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการวัดเงื่อนไขเริ่มต้น จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล(Exponential) เมื่อเวลาผ่านไป เคออสได้มีการค้นพบมานานแล้วตั้งแต่สมัยของ J. H. Poincare(1854-1912) ซึ่งตอนนั้น Poincare ได้พิสูจน์ว่าระบบสุริยจักรวาล เป็นแบบเคออส แต่สมัยนั้นยังไม่บัญญัติศัพท์อลวน(Chaos) ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าเป็น Pathological Case

และจากหลัก Uncertainty Principle ของ Heisenberg ทำให้เราไม่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์(Parameter) ทุกตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เพราะการให้ความแม่นยำอย่างหนึ่งมาก จะส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนในอีกอย่างหนึ่ง และถึงแม้ตัวแปรที่อธิบายระบบของเรามีเพียงตัวแปรเดียว ความแม่นยำของค่าที่วัดได้ก็จะจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง ความไม่แน่นอนที่เหลืออยู่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งทำให้เลขนัยสำคัญที่เราได้ลดลงเรื่อยๆ จนเราทำนายอะไรไม่ได้เลย ดังนั้นเคออส จึงเกิดขึ้นได้ทั้งในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติ

สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้น จะเกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อเวลาผ่านไป เป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อนเริ่มแรก เนื่องจากความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นพฤติกรรมแบบอลวน(Chaotic Behavior) จึงไม่มีในระบบที่เป็นเชิงเส้นเคออส เกิดขึ้น ได้เฉพาะกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) แต่ไม่ใช่ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะเกิดความอลวนเสมอไป จะมีช่วงพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบประพฤติแบบอลวน แต่ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นบางระบบก็เป็นเคออสตลอดเวลา

จุดที่เป็นประเด็นสำคัญอีกอย่างหนึ่งในทฤษฎีเคออส คือความอ่อนไหวอย่างสูงของเงื่อนไขเริ่มต้น กับ Principle of Weak ที่ถือว่าสาเหตุเบื้องต้นเพียงนิดเดียว สามารถก่อให้เกิดผลกระทบอย่างมากได้

### 2.1.2 คุณสมบัติของเคออส

ระบบที่เป็นเคออส จะต้องประกอบไปด้วยลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) มีคุณสมบัติแบบไม่เชิงเส้น คุณสมบัติแบบไม่เชิงเส้นจะมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับคุณสมบัติแบบเชิงเส้น โดยที่ฟังก์ชัน  $f$  จะมีคุณสมบัติเชิงเส้นก็ต่อเมื่อ  $f(x + y) = f(x) + f(y)$  นั่นก็คือในระบบแบบไม่เชิงเส้น ผลลัพธ์ของระบบทั้งหมดไม่เท่ากับผลรวมของผลลัพธ์ที่เกิดจากส่วนย่อยๆ รวมกัน (โดยอาจจะมากหรือน้อยกว่าก็ได้) ความไม่เชิงเส้นนี้เองที่ทำให้ระบบที่แสดงความเป็นอลวนไม่ได้รับการศึกษามากในอดีต เพราะค่อนข้างยากในการที่จะศึกษาและทำความเข้าใจ ข้อพึงระวังก็คือการที่กล่าวว่าระบบเคออส จำเป็นต้องเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ไม่ได้หมายความว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นทุกระบบจะเป็นระบบเคออสเสมอไป
- 2) ไม่ใช่เกิดแบบสุ่ม(คือเป็น Deterministic ไม่ใช่ Probabilistic) หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งก็คือ ในระบบเคออส พฤติกรรมทั้งหลายที่เกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอน เหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าแบบการทอดลูกเต๋า จึงไม่ใช่ ความเป็นเคออส เป็นการสุ่ม การแปลคำนี้เป็นภาษาไทยโดยใช้คำว่า “ทฤษฎีอลวน” จึงเป็นคำแปลที่ไม่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเข้าใจผิดว่าการเป็นเคออส ไม่ใช่การสุ่มจึงมีคนเรียกเคออสว่า Deterministic Chaos
- 3) ไวต่อสภาวะเริ่มต้น(Sensitivity to initial Condition) ฟังก์ชันการเริ่มต้นที่เงื่อนไขต่างกันนิดเดียวอาจทำให้ผลในตอนสุดท้ายต่างกันมาก สาเหตุที่ระบบเคออส ไวต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สภาวะเริ่มต้นก็เพราะว่ามันจะขยายความแตกต่างให้เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วเช่น ที่พบบ่อยก็คือการขยายความแตกต่างให้เร็วขึ้นในระดับเลขยกกำลัง(Exponential) ของเวลา
- 4) ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าในระยะยาวได้(Long-term Prediction is Impossible) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากข้อ 3 เพราะการที่ไวต่อสภาวะเริ่มต้น จะทำให้เราไม่รู้ว่ ระบบที่เราสนใจอยู่จะเป็นอย่างไรในระยะยาว อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติข้อนี้ไม่ได้แปลว่าการทำนายระยะสั้น(Short-term Prediction) จะเป็นสิ่งที่เป็นไปได้

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ระบบเคออส ยังมีสมบัติอีกประการหนึ่ง คือการแสดงลักษณะ “คล้ายกับตัวเอง”(Self similarity) หรือที่เรียกว่า “แฟร็กทัล”(Fractal) นั่นเอง ลักษณะนี้จะปรากฏขึ้นเมื่อเราพล็อตเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในระบบพิกัดที่บ่งบอกถึงสภาวะ(Phase space) ลักษณะคล้ายกับตัวเองนี้ หมายความว่า ไม่ว่าจะมองเส้นทางการเคลื่อนที่นี้จากสเกลเล็กหรือใหญ่แค่ไหน มันก็ยังมีลักษณะเหมือนเดิม อย่างไรก็ตาม ลักษณะคล้ายกับตัวเองแบบแฟร็กทัลนี้ ไม่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดเคออส แต่อย่างใด เพียงแต่มักพบร่วมกันบ่อยครั้งเท่านั้น

### 2.1.3 ประโยชน์ของเคออส

ในการศึกษาทฤษฎีเคออส มีประโยชน์อย่างน้อยใน 3 ทางด้วยกัน คือการใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต ใช้ในการสร้างระบบเคออส และใช้ในการควบคุม-สร้างความเสถียรให้กับระบบ ดังสามารถอธิบายดังต่อไปนี้

#### 1. ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต

อย่างที่กล่าวมาข้างต้นว่า แม้ว่าเราจะไม่สามารถทำนายอนาคตของระบบเคออสในระยะยาวได้ แต่เราก็สามารถทำนายอนาคตของสัญญาณในระยะสั้นได้ หากเราสามารถหาโมเดลที่อธิบายพฤติกรรมของระบบนั้น และทราบสภาวะเริ่มต้นอย่างแม่นยำพอสมควร เช่น ในปัจจุบันได้ใช้เคออสในการวิจัยเพื่อทำนายอนุกรมตามลำดับเวลา(Time-series Data)

#### 2. ใช้ในการสร้างระบบเคออส

ทำไมเราต้องสร้างระบบเคออส ขึ้นมาด้วย ก็เพราะ มีผู้เชื่อว่า “ในธรรมชาติ ความอลวนเป็นสิ่งสากลมากกว่าและคิดว่จะเบียบง่าย ๆ” อย่างเช่น บริษัท มัทสึชิตะยัง

ใช้ทฤษฎีเคออส ควบคุมหัวฉีดของเครื่องล้างจานซึ่งพบว่าสามารถล้างจานได้สะอาดโดยประหยัดน้ำได้มากกว่าเครื่องล้างจานแบบอื่นๆ ทั้งนี้เพราะเส้นทางเคลื่อนที่ของหัวฉีดที่ดูเหมือนไร้ระเบียบทำให้ครอบคลุมพื้นที่ได้ดีกว่าการเคลื่อนที่ตามแบบแผนปกติ

### 3. ใช้ในการควบคุมและสร้างความเสถียรให้กับระบบ

การที่ระบบเคออสนั้นไวต่อสภาวะเริ่มต้นมาก การรบกวนเพียงเล็กน้อยจึงอาจก่อให้เกิดผลขยายได้มากในงานด้านวิศวกรรมควบคุม(Control Engineering) การเติมสัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยที่เหมาะสมสู่ระบบที่เป็นระบบเคออส จึงสามารถใช้ควบคุมให้ระบบนั้นอยู่ในสภาวะเสถียรหรือขับเคลื่อนให้ระบบนั้นไปสู่สภาวะที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากการประยุกต์ใช้หลักๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทฤษฎีเคออส ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้อีกในหลายสาขา เช่น ในด้านการสื่อสาร เราสามารถใช้สัญญาณแบบเคออส ในการเข้ารหัสข้อมูล(Encryption) เพื่อป้องกันคนแอบดูข้อมูล หรือใช้หลักการของทฤษฎีนี้ช่วยให้การหาค่าที่ดีที่สุด(Optimization) ของฟังก์ชันหนึ่ง ได้ค่าที่ดีที่สุดที่แท้จริง(Global Optimum) ได้ง่ายขึ้น เพราะเคออสสามารถช่วยให้หาค่าที่ดีที่สุดเฉพาะบริเวณ(Local Optimum) ได้

## 2.2 วงจรของ Chua(Chua's Circuit)<sup>1</sup>

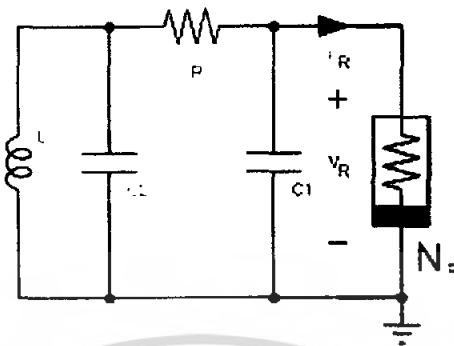
วงจร Chua เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณเคออสที่มีความหลากหลายเนื่องจากความหลากหลายและเป็นสากล วงจร Chua จึงได้รับความสนใจอย่างมาก และกลายเป็นมาตรฐานสำหรับวงจรเคออส สาเหตุสำคัญที่ทำให้วงจร Chua นี้เป็นที่นิยมนั้น เนื่องจากส่วนประกอบของวงจรประกอบไปด้วยอุปกรณ์เพียงแค่อุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 อุปกรณ์ และอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีก 1 อุปกรณ์ [2]

<sup>1</sup> ที่มา : จาก [http://www.cmp.caltech.edu/~mcc/chaos\\_new/Chua.html](http://www.cmp.caltech.edu/~mcc/chaos_new/Chua.html)

เพื่อให้เกิดความสะดวกสำหรับผู้อ่านในบทบทวนพื้นฐาน จึงอ้างถึงบทความต้นฉบับดังกล่าว ณ ที่นี้อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Chua's Circuit



รูปที่ 2.1 วงจร Chua

วงจร Chua ได้แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ตามสมการที่(2.1)

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_1}{dt} &= \frac{1}{R} (v_2 - v_1) - \hat{f}(v_1) \\ C_1 \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{R} (v_1 - v_2) - i_3 \\ L \frac{di_3}{dt} &= -v_2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

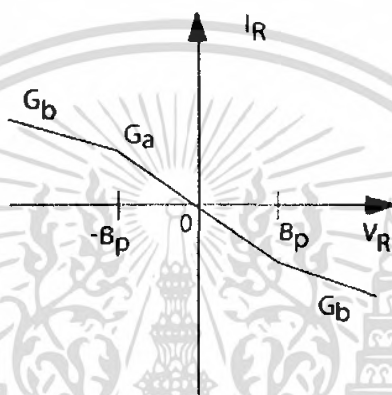
โดยที่

$$i_r = \hat{f}(v_r) = G_b v_r + \frac{1}{2} (G_u - G_b) \{ |v_r + B_p| - |v_r - B_p| \} \quad (2.2)$$

จากสมการที่(2.2) เป็นการแสดงคุณสมบัติของความต้านทานลบแบบ 3-segment(3-segment odd-symmetric voltage-current characteristic) ของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น(Chua ไดโอด) โดยมีความชันเป็น  $G_u, G_b$  และโดยจุดแรงดันพังทลาย(Breakpoint) อยู่ที่  $v_r = -B_p$  และ  $v_r = B_p$  v-i characteristic ของ Chua ไดโอด แสดงดังรูปที่ 2.2

สมการอนุพันธ์(Differential equation) ดังที่แสดงในสมการที่(2.1) จัดเป็น Autonomous dynamical system ซึ่งแสดงว่าเมื่อไม่มีการส่งสัญญาณจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ระบบจะดำเนินไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อยๆ ตามคุณสมบัติธรรมชาติ(Natural Dynamics) เมื่อ  $R$  ,  $L$  และ  $C_1, C_2$  ในวงจร Chua มีค่าเป็นบวกจากจุดที่แสดงถึงพลังงานสะสม ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำงานเพื่อกำเนิดสัญญาณ (Oscillate) และเป็นตัวเดียวที่จะทำให้เกิดการอลวน โดยที่ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ตัวอื่นในวงจร(Passive Linear Elements) ในขณะที่ตัวต้านทานจะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่



รูปที่ 2.2 i-v characteristic ของ Chua ไดโอด

เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรในสมการของสมการสถานะ(State equation) ในสมการที่(2.1) ให้อยู่ในรูปที่ไม่มีมิติ(Dimensionless)

$$\frac{dx}{d\tau} = k\alpha(y - x - f(x)) \quad (2.3)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = k(x - y + z) \quad (2.4)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = -k\beta y \quad (2.5)$$

โดยที่

$$f(x) = bx + \frac{1}{2}(a-b)\{|x+1| - |x-1|\} \quad (2.6)$$

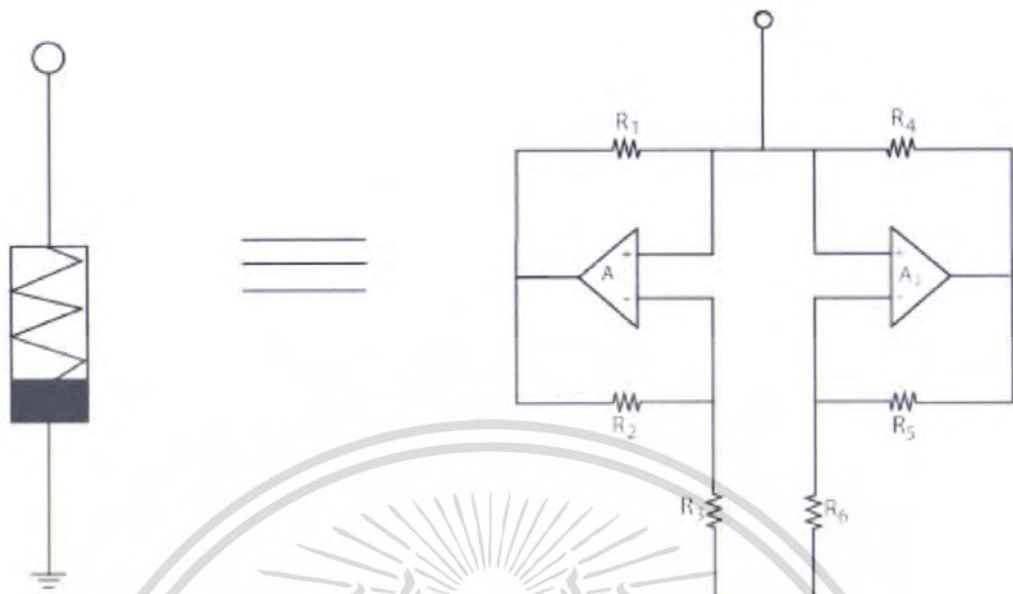
และ

$$\begin{aligned} x &= \frac{\Delta v_1}{B_p}, y = \frac{\Delta v_2}{B_p}, z = i_3 \left( \frac{v_1}{B_p} \right) \\ \alpha &= \frac{\Delta c_2}{c_1}, \beta = \frac{\Delta R^2 C_2}{L}, z = \text{sgn}(RC_2) \\ a &= RG_a, b = RG_b, \tau = \frac{t}{|RC_2|} \end{aligned} \quad (2.7)$$

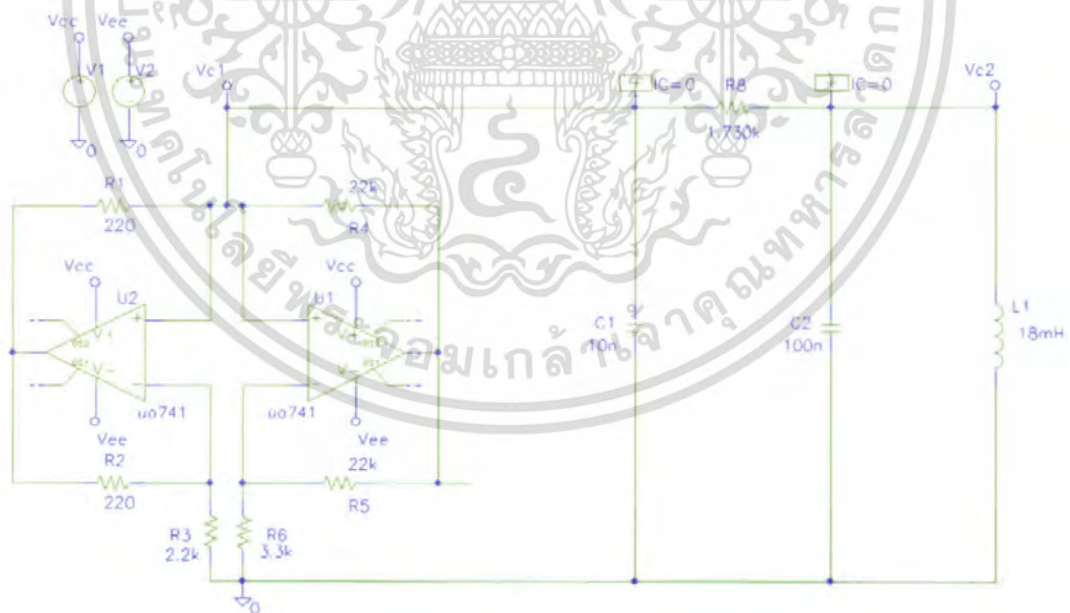
ค่าพารามิเตอร์  $k$  มีค่าเท่ากับ 1 หรือ -1 โดยคำนวณตามทิศทางของเวลา โดยทั้งกรณีที่พารามิเตอร์  $k$  มีค่าเป็น 1 และ -1 จะมิได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกัน ยกเว้นกรณีที่อินทิเกรตระบบ(สมการ(2.3)-(2.5))ย้อนกลับในรูปของเวลา

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าสัญญาณเคออสที่สร้างจากวงจร Chua นั้นจะแปรตามค่าของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว(ตัวเก็บประจุ 2 ตัว ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว(Chua ไดโอด) ซึ่งถ้าต้องการปรับเปลี่ยนสัญญาณก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าต่างๆ ตามสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จากรูปที่ 2.1 วงจร Chua มีตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในวงจร Chua มักจะเรียกว่า Chua ไดโอด โดย Chua ไดโอด จะมีคุณลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น(Nonlinear characteristic) ซึ่งสามารถสร้างได้โดยใช้ Operation Amplifiers(OP-AMP) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3 สำหรับตัวอย่างของวงจร Chua ที่ใช้ ออปแอมป์(OP-AMP) แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถนำเอาความต่างศักย์  $V_{c1}, V_{c2}$  มาเทียบกันแสดงในรูปที่ 2.6

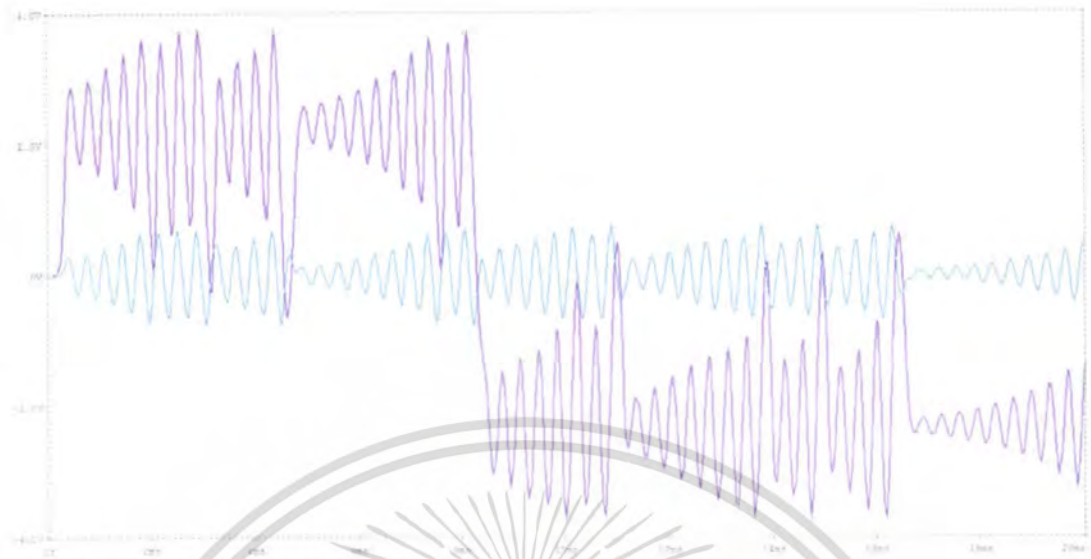


รูปที่ 2.3 Chua ไดโอด



รูปที่ 2.4 วงจร Chua ที่ใช้งานได้ในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 สัญญาณเคออสจาก  $v_{c_1}, v_{c_2}$  เมื่อเทียบกับเวลา



รูปที่ 2.6 สัญญาณเคออสจาก  $v_{c_1}$  เป็นแกน  $y$  และ  $v_{c_2}$  เป็นแกน  $x$

### 2.3 ตัวดึงดูดของ Lorenz

ตัวดึงดูดของ Lorenz คิดขึ้นโดย Edward Lorenz ในปี ค.ศ. 1963 เป็นระบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้น 3 มิติ โดยเป็นแบบจำลองในรูปร่างง่ายของ การพัฒนาความร้อนในบรรยากาศ ระบบนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

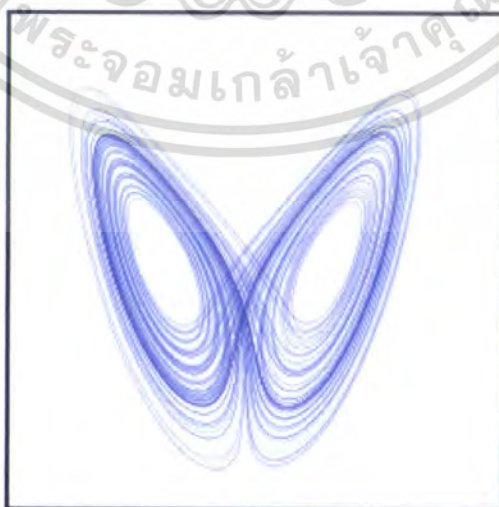
แสดงพฤติกรรมความอลวนที่ค่าพารามิเตอร์บางค่า รวมถึงลักษณะของระบบที่เรียกว่า ตัวดึงดูดแบบประหลาด (Strange Attractor) ซึ่งพิสูจน์โดย W. Tucker ในปี ค.ศ. 2001 ตัวดึงดูดแบบประหลาดในที่นี้เป็น Fractal ที่มีค่ามิติ Hausdorff อยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 Grassberger ได้ประมาณค่ามิติสอดคล้องว่ามีค่าประมาณ  $2.06 \pm 0.01$  และ ค่ามิติ Correlation ประมาณ  $2.05 \pm 0.01$  [3]

ระบบที่มีปรากฏพฤติกรรมตามแบบจำลอง Lorenz นี้คือ เลขเซอร์ ไดนาโม และกึ่งหันน้ำบางชนิด ตัวดึงดูดลอเรนซ์ เขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้ :

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x) \\ \frac{dy}{dt} &= x(r - z) - y \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz\end{aligned}\quad (2.8)$$

โดยที่  $\sigma$  เรียกว่า ตัวเลข Prandtl และ  $r$  เรียกว่า ตัวเลข Reynolds  $\sigma, r, b > 0$  แต่ปกติแล้วจะมีค่า  $\sigma = 10, b = \frac{8}{3}$  และ  $r$  เป็นค่าที่ปรับได้ ระบบจะแสดงพฤติกรรมความอลวนที่ค่า  $r = 28$  แต่แสดงพฤติกรรมโคจรพันกันเป็นวงรอบ ที่ค่า  $r$  อื่นๆ ตัวอย่างเช่น ที่ค่า  $r = 99.96$  วงโคจรจะเป็นรูป  $T(3,2)$  เส้น Torus

รูปร่างของตัวดึงดูดของ Lorenz ที่คล้ายผีเสื้อนี้ เป็นส่วนหนึ่งของจุดกำเนิดของคำว่า Butterfly effect ในทฤษฎีความอลวน



รูปที่ 2.7 วงโคจรของระบบ Lorenz ที่ค่าพารามิเตอร์  $r=28, \sigma = 10, b = 8/3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ออปแอมป์

### 2.4.1 ทฤษฎีออปแอมป์<sup>2</sup>

โอเปอเรชันแนวแอมพลิไฟเออร์(Operational Amplifier) หรือที่นิยมเรียกสั้นๆว่า ออปแอมป์(Op-Amp) นั้นแต่เดิมเป็นชื่อเรียกวงจรรขยายที่คำนวณภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เชิงอุปมา (Analog computer) วงจรนี้มีอัตราขยายสูงมาก และอาศัยการป้อนกลับแบบลบ ผ่านองค์ประกอบพาสซีฟภายนอกในการควบคุมลักษณะคุณสมบัติและกำหนดหน้าที่ของวงจรให้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ใช้ป้อนกลับเท่านั้น และไม่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ภายในของออปแอมป์เลย ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกมากที่จะออกแบบระบบ โดยใช้ออปแอมป์เป็นตัวขยายกำลังงาน โดยตลอด และอาศัยองค์ประกอบที่ใช้ป้อนกลับเป็นตัวกำหนดให้วงจรออปแอมป์ทำหน้าที่ต่าง ๆ กัน เช่น เป็นวงจรรวมสัญญาณ อินทิเกรเตอร์ ดิฟเฟอเรนเชียล [4]

ออปแอมป์รุ่นแรกนั้น ใช้หลอดสุญญากาศ เนื่องจากราคาแพงมากจึงมีที่จำกัดเฉพาะในเครื่องคอมพิวเตอร์เชิงอุปมาเท่านั้น ต่อมาในปี ค.ศ.1962 ได้มีการผลิตออปแอมป์จำหน่ายออกเป็นหน่วย โดยการบรรจุวงจรรานซิสเตอร์ลงในกล่องเดียวกัน หรือ โดยการนำชิ้นผลึก(Chip) ต่างๆ ที่มีทรานซิสเตอร์ ไดโอด ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุที่ยังมิได้บรรจุลงกล่องมาต่อเป็นวงจรออปแอมป์ก่อนที่จะบรรจุลงในกล่องเดียวกัน วิธีหลังนี้เรียกว่า วิธีผสม(hybrid) การบรรจุวงจรรออปแอมป์ชัดเจนขึ้น หลังจากนั้นก็มีการผลิตออปแอมป์แบบ Monolithic บรรจุองค์ประกอบต่างๆของวงจรออปแอมป์ลงบนชิ้นผลึกเดียวกัน การผลิตออปแอมป์แบบโมโนลิทิกนั้น สามารถลดต้นทุนการผลิตไปมากเพราะสามารถผลิตขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากราคาได้ลดไปมาก การใช้ออปแอมป์จึงได้เพิ่มขึ้นรวดเร็ว ออปแอมป์ได้เปลี่ยนฐานะจากหน่วยย่อยของคอมพิวเตอร์เชิงอุปมา มาเป็นองค์ประกอบเชิงอุปมาที่ใช้ทั่วไปทุกหนทุกแห่ง เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าวงจรที่ประกอบสำเร็จนั้น มีขนาดเล็ก มีความเชื่อถือได้สูง ราคาถูก สามารถใช้งานได้ทั่วไป เป็นตัวให้อัตราขยาย เช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่ง ซ้ำยังใช้งานง่ายกว่าวงจรรานซิสเตอร์เป็นอย่างมาก ภายในออปแอมป์นั้นประกอบด้วยทรานซิสเตอร์เป็นสิบๆตัว ที่มีการไบแอสและกำหนดจุดทำงานไว้เรียบร้อยแล้ว

<sup>2</sup> ที่มา . จาก <http://www.schnozzle.org/~paulh/misc/opamp.htm>

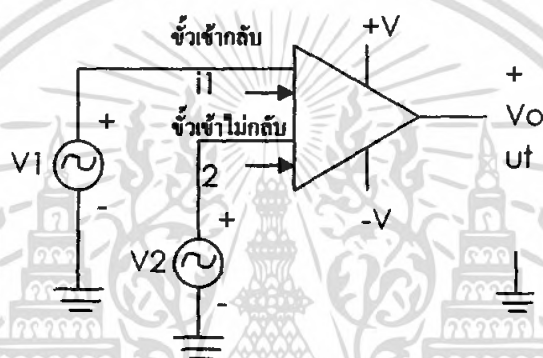
เพื่อให้เกิดความสะดวกสำหรับผู้อ่านในการทบทวนพื้นฐาน จึงอ้างถึงบทความต้นฉบับดังกล่าวมา ณ ที่นี้อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว ไม่ต้องมาออกแบบวงจรไบแอสและกำหนดจุดทำงานให้กับทรานซิสเตอร์แต่ละตัวอีก ลักษณะสมบัติของวงจรก็กำหนด โดยองค์ประกอบพาสซีฟที่ต่อระหว่างขั้วเข้าและขั้วออกเท่านั้น ดังนั้นผู้ออกแบบจะสามารถพัฒนาวงจรที่เที่ยงตรงได้ในเวลาอันสั้น

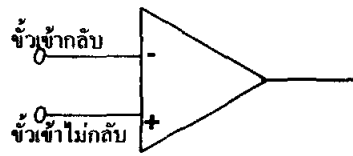
## 2.4.2 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

ออปแอมป์ที่ผลิตออกจำหน่ายในรูปวงจรมวล(Integrated circuit) ทั่วๆไปจะมีขั้วสำหรับสัญญาณเข้า 2 ขั้ว สำหรับสัญญาณขาออก 1 ขั้ว และสำหรับต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรงด้านบวก 1 ขั้ว กับด้านลบอีก 1 ขั้ว ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการขั้วต่างๆของออปแอมป์

ขั้วสำหรับสัญญาณเข้าที่มีเครื่องหมายลบกำกับ เรียกว่า ขั้วเข้ากลับ(inverting input) สัญญาณที่เข้าทางขั้วนี้จะทำให้เกิดสัญญาณออกที่ขั้วออกที่มีมุมเฟส(phase angle) ต่างจากสัญญาณเข้า 180 องศา นั่นคือ หากสัญญาณที่ขั้วนี้เป็นบวกเพิ่มขึ้น จะได้สัญญาณเป็นลบหรือลดลง ส่วนขั้วสัญญาณเข้าอีกขั้วหนึ่งที่มีเครื่องหมายบวกกำกับนั้น เรียกว่า ขั้วเข้าไม่กลับ(non-inverting input) สัญญาณที่เข้าทางขั้วนี้จะทำให้เกิดสัญญาณออกที่มีมุมเฟสตรงกัน ในการใช้สัญลักษณ์โดยทั่วไปนั้น เรามักจะละเลยขั้วที่ต่อไฟตรงบวกและลบเข้าตัวออปแอมป์ในฐานะที่เข้าใจว่าจะต้องมีอยู่เสมอ ทำให้สัญลักษณ์ง่ายขึ้น ดังรูปที่ 2.9



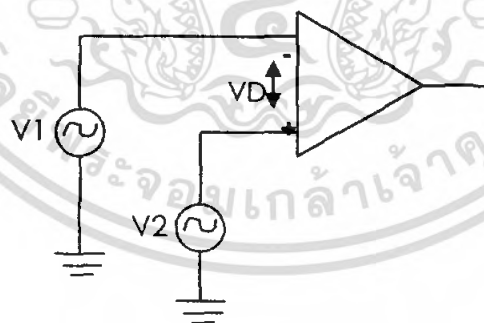
รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์อย่างง่ายของออปแอมป์

การทำงานของออปแอมป์แบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ การทำงานที่ input ด้านเดียว และการทำงานที่ input ทั้งสองด้าน

การทำงานที่ input ด้านเดียว(single ended input) คือการป้อนสัญญาณ input ที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ส่วนขั้วที่เหลือต่อลงกราวด์ ถ้าป้อนสัญญาณ input ที่ขั้วบวกและต่อขั้วลบลงกราวด์ สัญญาณ output ที่ได้รับการขยายสัญญาณ input จะมีมุมอินเฟสกัน ในทางตรงกันข้าม ถ้าป้อนสัญญาณ input ที่ขั้วลบ และต่อขั้วบวกลงกราวด์ จะได้สัญญาณ output ที่มีมุมต่างเฟสกับสัญญาณ input 180 องศา

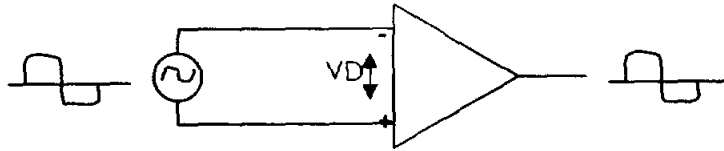
การทำงานที่ input สองด้าน(double ended input) คือการป้อนสัญญาณ input ทั้งสองด้าน แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบดิฟเฟอเรนเชียล และแบบ โหมคร่วม

การทำงานแบบดิฟเฟอเรนเชียลคือ การป้อนสัญญาณ input 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกัน ให้กับขั้ว input ทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 2.10



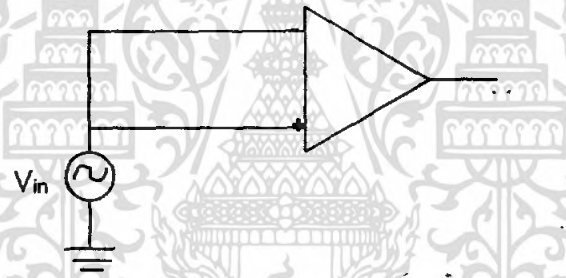
รูปที่ 2.10 การป้อนสัญญาณของออปแอมป์

เนื่องจากขั้ว input ของออปแอมป์เป็นบวกและลบ สัญญาณ input จึงหักล้างกัน ดังนั้น สัญญาณ output จึงเกิดจากการขยายผลต่างของสัญญาณ input ทั้งสองนั้นคือ  $v_o = v_1 - v_2$  ได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสัญญาณ input และ output อินเฟสกัน



รูปที่ 2.11 การหักล้างกันของสัญญาณ input

การทำงานแบบโหมคร่วมคือ การป้อนสัญญาณ input ร่วมให้กับขั้ว input ทั้งสองของออปแอมป์ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การป้อนสัญญาณ ร่วมให้ขั้ว input

ในทางอุดมคติ สัญญาณ input ทั้งสองขั้วต้องได้รับการขยายเท่ากัน ทำให้เกิดสัญญาณที่ขั้วตรงข้ามกันที่ input สัญญาณเหล่านี้หักล้างกันแล้วหยุดหายไป สัญญาณ output จึงเป็น 0 V แต่ในทางปฏิบัติยังคงมีสัญญาณ output เหลืออยู่เล็กน้อย ซึ่งเรียกว่า “สัญญาณโหมคร่วม” ซึ่งในการออกแบบนั้นเราต้องขจัดสัญญาณโหมคร่วมให้มีค่าน้อยที่สุด สรุปว่าอัตราขยายแรงดัน output ออปแอมป์ประกอบด้วย อัตราขยายแรงดัน 2 ส่วน คือ อัตราขยายที่เกิดจากแรงดันดิฟเฟอเรนซ์ เรียกว่า อัตราขยายดิฟเฟอเรนเชียลกับอัตราขยายที่เกิดจากแรงดันร่วมเรียกว่า อัตราขยายโหมคร่วม

#### 2.4.3 คุณสมบัติเชิงอุดมคติของออปแอมป์

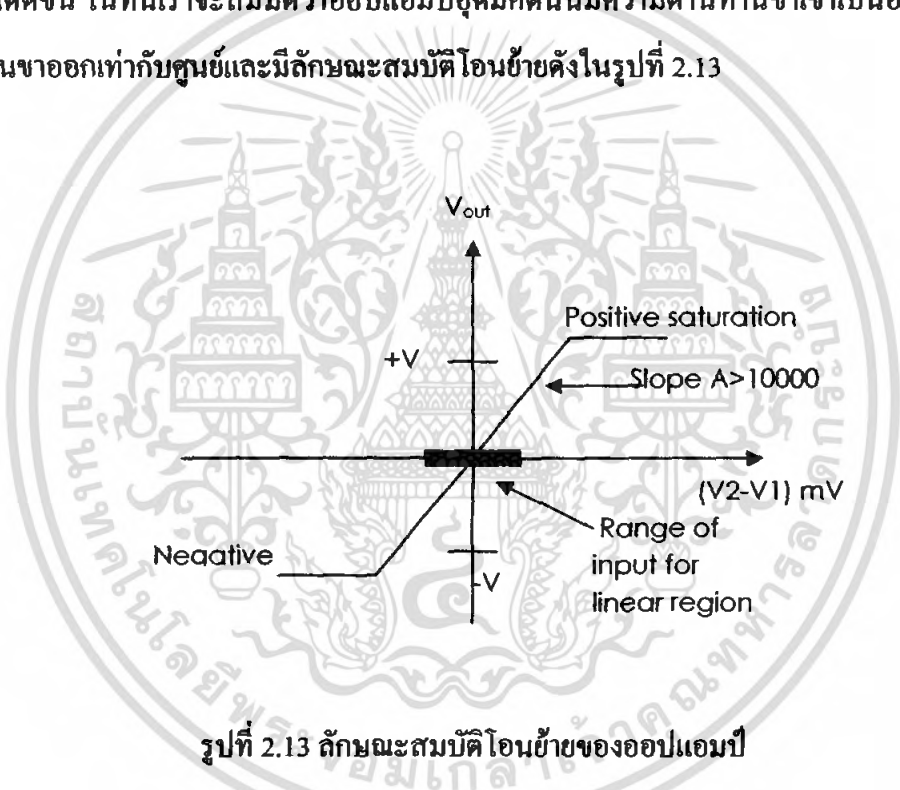
ออปแอมป์ที่เป็นไอซี เป็นวงจรที่มีอัตราการขยายสูง โดยปกติจะมีอัตราการขยายสูงถึงหลายหมื่นหลายแสน และข้อเด่นก็คือเราสามารถกำหนดอัตราขยายให้กับออปแอมป์ได้โดยง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามต้องการด้วยการต่อวงจร ในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ ถ้าหากเราถือว่าออปแอมป์ที่ใช้เป็นออปแอมป์ในอุดมคติจะต้องมีคุณสมบัติเด่นดังนี้

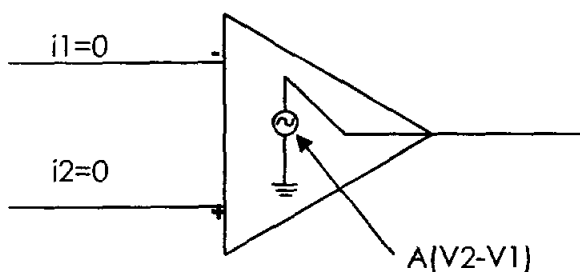
1. มีอัตราขยายแรงดันเป็นอนันต์
2. มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็นอนันต์ หรือกล่าวได้ว่ากระแสอินพุตเป็นศูนย์นั่นเอง
3. มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์
4. มีผลตอบแทนสนองต่อความถี่ได้จากสัญญาณไฟตรงถึงความถี่อนันต์

เราพิจารณาการทำงานของออปแอมป์อุดมคติในวงจรต่างๆเพื่อที่จะได้เข้าใจถึงหลักการของออปแอมป์ได้ดียิ่งขึ้น ในที่นี้เราจะสมมติว่าออปแอมป์อุดมคตินั้นมีความต้านทานขาเข้าเป็นอนันต์ ความต้านทานขาออกเท่ากับศูนย์และมีลักษณะสมบัติโอนย้ายดังในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะสมบัติโอนย้ายของออปแอมป์

การมีความต้านทานทางขาเข้าเป็นอนันต์นั้น หมายความว่ากระแสขาเข้า  $i_1$  และ  $i_2$  เท่ากับศูนย์ทั้งคู่ การมีความต้านทานทางขาออกเท่ากับศูนย์หมายความว่า ลักษณะ โอนย้ายของออปแอมป์สามารถแทนด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันพึ่งพิง(dependent voltage source) ดังรูปที่ 2.14 ลักษณะ โอนย้ายของรูป แสดงช่วงการทำงาน 3 ช่วงของออปแอมป์คือ ช่วงเชิงเส้น 1 เขต และช่วงอิ่มตัว 2 เขต



รูปที่ 2.14 แหล่งกำเนิดแรงดันฟังก์ชันในตัวออปแอมป์

ในช่วงเชิงเส้นนั้น แรงดันออก  $V_{out}$  จะอยู่ระหว่างแรงดันของแหล่งจ่ายไฟทั้งสอง(+V และ -V) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออก  $V_{out}$  และความแตกต่างระหว่างแรงดันเข้า  $(v_2 - v_1)$  นั้นเป็นเชิงเส้น

$$v_o = A(v_2 - v_1) \tag{2.9}$$

โดยที่ A คืออัตราขยายแรงดัน ซึ่งมักมีค่าเกิน 10000 เนื่องจากอัตราขยายมีขนาดใหญ่มาก และช่วงของสัญญาณออกก็มีจำกัด  $|V_{out}| < |V|$  ดังนั้น ช่วงของสัญญาณเข้าในเขตเชิงเส้นจึงมีขนาดเล็กมาก  $|V_2 - V_1| < |V/A|$  ในออปแอมป์ทั่วไป อัตราขยายวงรอบปิด(คือ A นั้นเอง) มักจะมีค่าระหว่าง 10000 ถึงหลายล้าน ดังนั้น สำหรับแหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 10 ถึง 15 โวลต์ ความกว้างของเขตเชิงเส้นสำหรับสัญญาณเข้า จะมีประมาณ 1 mV หรือน้อยกว่านั้น

การจำกัดความการทำงานในเขตเชิงเส้นคือ

1. กระแสขาเข้าเป็นศูนย์
2. แรงดันขาเข้า  $V_1$  และ  $V_2$  เท่ากัน ภายใน 1 mV หรือน้อยกว่านั้น

ในเขตอิมิตัว ความแตกต่างระหว่างแรงดันขาเข้าทั้งสอง จะมีมากกว่าในเขตเชิงเส้น นั่นคือ  $|V_2 - V_1| > |V/A|$  หรือเราอาจกล่าวได้ว่า ถ้า  $|V_2 - V_1| > 1mV$  ออปแอมป์จะอยู่ในสภาพอิมิตัวไปรคสังเกตว่า ถ้า  $V_2 > V_1$  ออปแอมป์จะอิมิตัวทางบวก และถ้า  $V_1 > V_2$  ออปแอมป์จะอิมิตัวทางลบ

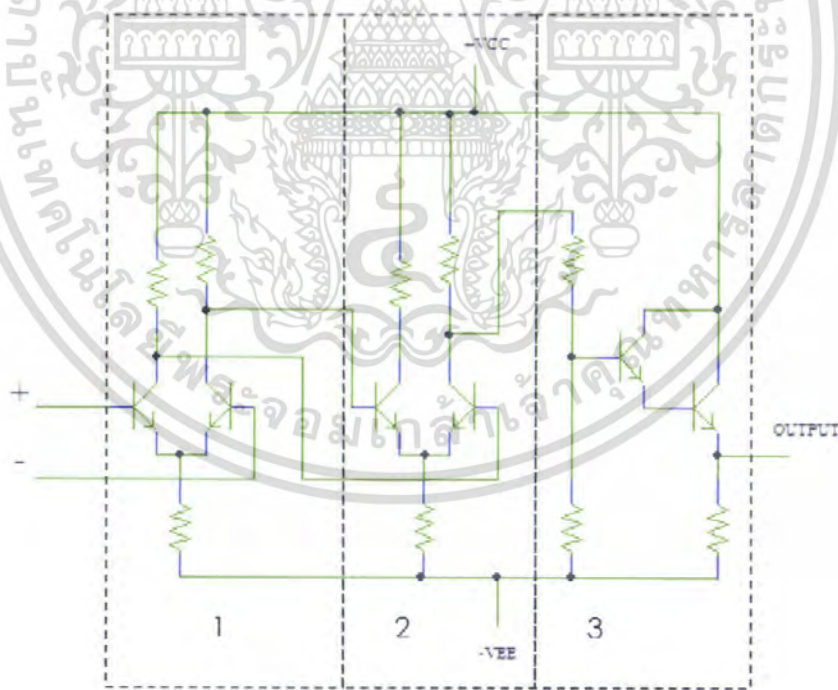
#### 2.4.4 โครงสร้างภายในออปแอมป์

ออปแอมป์ส่วนใหญ่จะมีภาคคั่นๆประกอบด้วยวงจรขยายความแตกต่าง อาจจะมีสองสามภาคเชื่อมต่อกันเพื่อให้มีอัตราขยายสูงๆซึ่งจำเป็นจะต้องมีแหล่งจ่ายไฟทั้งบวกและลบ วงจรขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างมีสองอินพุตทำให้ขั้วเอาต์พุตสามารถเลือกได้ทั้งแบบมีการกลับเฟสและไม่กลับเฟส ในการใช้งานออปแอมป์มักจะมีการป้อนกลับแบบลบจากขั้วเอาต์พุตมายังขั้วลบ(Inverting input) ด้วยตัวต้านทานหรืออิมพีแดนซ์เพื่อควบคุมอัตราการขยายและผลตอบสนองความถี่ให้ได้ตามต้องการเช่นเดียวกับวงจรขยายทั่วไป สัญญาณที่เข้าที่อินพุตและออกมาที่เอาต์พุตจะมีการเลื่อนเฟส(นอกเหนือจากการกลับเฟส) อัตราการเลื่อนเฟสนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่

ในกรณีที่การเลื่อนเฟสมากขึ้นจนเป็น 180 องศา เฟสค่านี้อาจจะไปรวมกับการกลับเฟส 180 องศา ซึ่งจะทำให้เกิดการป้อนกลับแบบเสริม(แทนที่จะเป็นลบ) วงจรขยายในสภาวะเช่นนี้ จะไม่เสถียรภาพ จะเกิดออสซิลเลทที่ความถี่ที่ทำให้การป้อนกลับแบบเสริม การที่เฟสเลื่อนมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นนี้จะจำกัดแถบความถี่ของออปแอมป์ วิธีแก้ อาจจะทำโดยเพิ่มวงจรชดเชยเฟสเข้าไป วงจรชดเชยเฟสส่วนมากจะประกอบด้วยตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ หรืออาจจะเป็นตัวเก็บประจุอย่างเดียว ออปแอมป์ประกอบด้วยวงจรขยายหลายภาคทำงานร่วมกัน ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรภายในของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควงจรแรกเป็นวงจรขยายผลต่าง วงจรขยายผลต่างให้คุณลักษณะการขจัดสัญญาณผลรวมและอิมพีแดนซ์สูง ออปแอมป์บางตัวอาจใช้ FET เป็นภาควงจรแรกเพื่ออินพุตอิมพีแดนซ์ที่สูงขึ้น ออปแอมป์ที่รวมทั้งอุปกรณ์ FET และ BJT เรียกว่า ออปแอมป์ BIFET

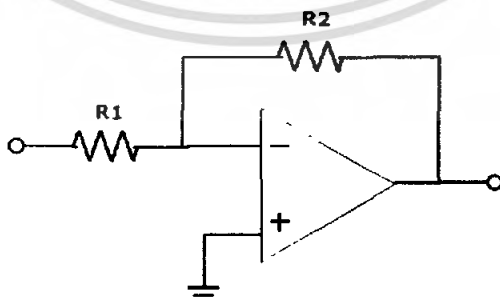
ภาควงจรที่สองในรูปที่ 2.15 เป็นวงจรขยายผลต่างอีกวงจรหนึ่งซึ่งช่วยให้เอาต์พุตผลต่างของภาควงจรแรกมาใช้งานได้ และเพื่อให้ได้อัตราขยายผลต่างและการขจัดสัญญาณผลรวมที่ดีที่สุด

ภาควงจรที่สามในรูปที่ เป็นภาควงจรคอมมอนคอลเล็กเตอร์หรืออิมิตเตอร์ฟอลลอปเวอร์ รูปแบบวงจรนี้เป็นที่รู้จักกันว่า มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ ในภาควงจรนี้สังเกตได้ว่าเอาต์พุตคือเพียงขั้วเดียว ไม่มีเอาต์พุตผลต่างที่เป็นไปได้ ซึ่งมักเรียกว่าเอาต์พุตปลายเดียว(Single ended output) การใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่ต้องการเอาต์พุตปลายเดียว

เอาต์พุตปลายเดียว แสดงมุมเฟสเทียบกราวด์ได้เพียงค่าเดียว วงจรในรูปที่มีอินพุตกลับเฟส(Inverting) และอินพุตไม่กลับเฟส(Non-inverting) อินพุตไม่กลับเฟสมีเฟสตรงกับเอาต์พุต อินพุตกลับเฟสมีเฟสกลับกับเอาต์พุต หรือมีเฟสต่างกับเอาต์พุต 180 องศา

#### 2.4.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานออปแอมป์

การขยายแบบกลับเฟส(Inverting amplifier) จากที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนก่อนว่า เราสามารถกำหนดอัตราขยายได้ตามใจชอบด้วยการป้อนกลับ และวงจรที่ขยายแบบกลับเฟสแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรขยายแบบกลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

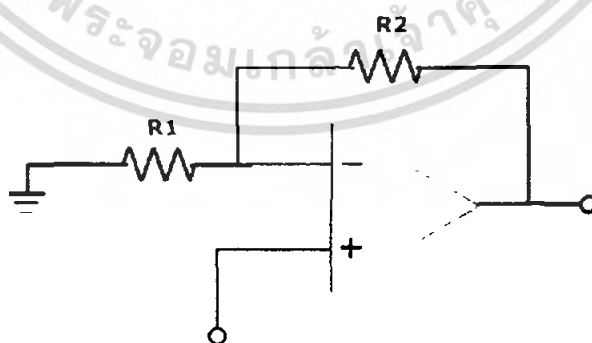
จากวงจร รูปที่ 2.16 ได้  $v_{out}$  คือ

$$\begin{aligned} i_{R_1} + i_{R_2} &= 0 \\ \frac{v_{in}}{R_1} &= -\frac{v_{out}}{R_2} \\ \frac{v_{out}}{v_{in}} &= -\frac{R_2}{R_1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

จากรูปที่ 2.16 อัตราขยายของวงจรสามารถคำนวณได้ด้วยอัตราส่วนของ  $R_2/R_1$  นั่นคือ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับผลคูณของ  $R_2/R_1$  กับแรงดันอินพุต สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในลักษณะที่เฟสกลับกับอินพุต เพราะเราทำการป้อนสัญญาณเข้าทางอินเวอร์ทติ้งอินพุต

ส่วนหนึ่งที่จะต้องทำก็คือค่า  $R_2$  ควรจะเลือกให้มีค่าใกล้เคียงค่า  $R_1$  และ  $R_2$  ขนานกันเพื่อลดผลการผิดพลาดเนื่องจากแรงดันออฟเซตที่อาจเกิดขึ้นจากกระแสไบแอส

โดยปกติถ้าป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไฟสลับ เอาต์พุตที่ได้จะขึ้นอยู่กัอินพุต จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองต่อความถี่ของออปแอมป์ก็มีส่วนสำคัญ ดังนั้นการใช้งานจึงต้องระวังไม่ให้เกินขอบเขตด้านความถี่ โดยปกติจะกำหนดค่าไว้ในรูปแบบของผลการคูณของอัตราขยายต่อความถี่ที่ค่าสูงสุดไว้ วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส จากรูปที่ 2.17 เป็นรูปของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส ซึ่งมีค่าความต้านทานอินพุตสูงมาก และอัตราขยายแรงดันของวงจรจะกำหนดด้วยค่าตัวต้านทาน โดยจะเท่ากับอัตราส่วนระหว่าง  $R_1 + R_2$  กับ  $R_1$



รูปที่ 2.17 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

จากวงจร รูปที่ 2.17 ได้  $v_{out}$  คือ

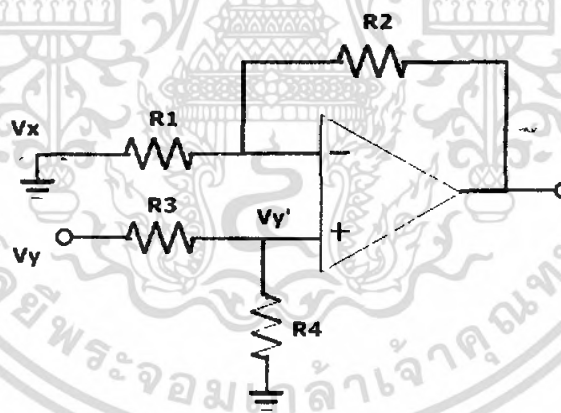
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 i_{R_1} + i_{R_2} &= 0 \\
 \frac{v_m}{R_1} &= \frac{v_m - v_{out}}{R_2} \\
 \frac{v_{out}}{v_m} &= \frac{R_2 + R_1}{R_1}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

สิ่งที่ทำให้วงจรนี้แตกต่างจากวงจรมอดูลัสคือ เอาต์พุตที่เกิดขึ้นจะมีเฟสเดียวกับสัญญาณอินพุต นอกจากนี้วงจรนี้จะยังให้ค่าความต้านทานอินพุตสูงมาก

ในขณะที่ค่าอินพุตไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่าจะทำให้เอาต์พุตเกิดการอิมิตชันที่นั่นหมายความว่าระดับแรงดันเอาต์พุตจะเป็นค่าเท่ากับแรงดันไฟเลี้ยงด้านบวกทันที

วงจรมอดูลัสสัญญาณผลต่าง ดังรูปที่ 2.18 โดยวงจรเป็นส่วนประกอบที่สมบูรณ์ของสัญญาณของวงจรมอดูลัสสัญญาณผลบวก โดยจะสามารถนำเอาแรงดันสองแรงดันมาหักล้างกันได้



รูปที่ 2.18 วงจรมอดูลัสสัญญาณผลต่าง

จากวงจร รูปที่ 2.18 จะได้สมการ

$$v_{out} = v_y - v_x \tag{2.12}$$

หา  $v_{out}$  ด้านบน จากผลของสมการที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.13)$$

จะได้  $v_{outx}$

$$v_{outx} = -\frac{R_2}{R_1} v_x \quad (2.14)$$

หา  $v_{out}$  ด้านล่างจาก ผลของสมการที่ 2.11

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} \quad (2.15)$$

หา  $v_{in}$  หรือ  $v'_y$

$$v'_{y'} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_y \quad (2.16)$$

จะได้  $v_{outy}$

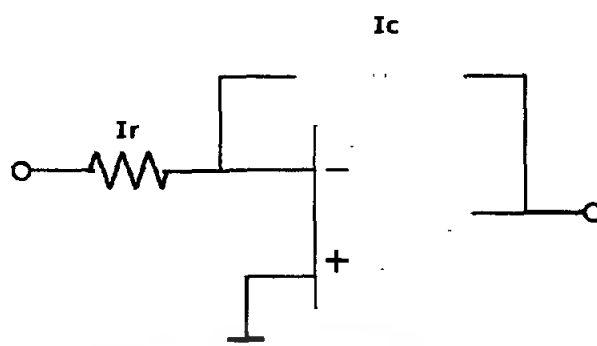
$$v_{outy} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} v'_{y'} \quad (2.17)$$

$$v_{outy} = \left( \frac{R_2 + R_1}{R_1} \right) \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) v_y \quad (2.18)$$

เพราะฉะนั้นจะได้  $V_{out}$  ของวงจรคือ

$$v_{out} = -\frac{R_2}{R_1} v_x + \left( \frac{R_2 + R_1}{R_1} \right) \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) v_y \quad (2.19)$$

วงจรนี้สามารถประยุกต์ใช้งานได้ในลักษณะเป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณความแตกต่าง หรือใช้ตารางสอบระดับแรงดันสองค่าได้



รูปที่ 2.19 วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรอินทิเกรเตอร์ ใช้ตัวเก็บประจุป้อนสัญญาณมายังขั้วเข้ากลับ วงจรนี้สามารถอินทิเกรเตอร์แรงดันที่แปรค่าตามเวลาได้ [5] สมการที่รู้จักกันดีของตัวเก็บประจุ คือ

$$v = \frac{Q}{c} = \frac{1}{c} \int i dt \quad (2.20)$$

เมื่อดิฟเฟอเรนเชียลทั้งสองข้าง จะได้กระแสที่ได้ผ่าน C คือ

$$i = c \frac{dv}{dt} \quad (2.21)$$

จากนั้น สมการของกระแสวงจรรูปที่ คือ

$$\frac{v_i}{R} = -c \frac{dv_{out}}{dt} \quad (2.22)$$

$$\text{เมื่อ } v_i = 0, i_i = 0$$

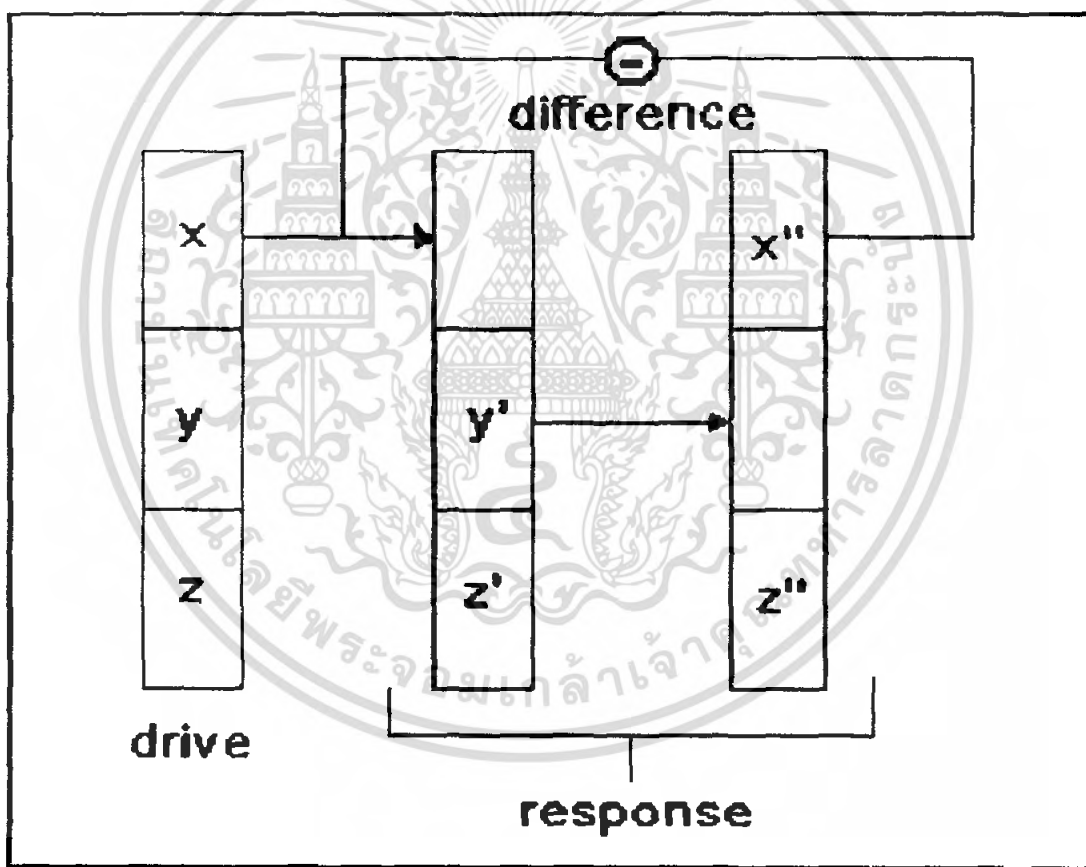
เมื่ออินทิเกรตทั้งสองข้างแล้ว หาค่าของ  $v_{out}$  จะได้

$$v_{out} = -\frac{1}{R} \int v_i dt \quad (2.23)$$

นั่นคือ แรงดันขาออกเท่ากับค่าคงตัว  $-1/RC$  คูณอินทิกรัลของแรงดันขาเข้ากับเวลา

## 2.5 หลักการชิ่งโครไนซ์ของระบบเคอดติก

ระบบเคอดติกนั้นมีความสามารถทางด้านการสื่อสารและทางด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ดังนั้นในระบบเคอดติกจึงต้องมีการชิ่งโครไนซ์เกิดขึ้น ปกติแล้วระบบเคอดติก จะมีความสามารถในการชิ่งโครไนซ์ด้วยตัวมันเอง โดยเมื่อมันถูกแยกออกเป็นระบบย่อย 2 ระบบ คือ ตัวส่งข้อมูล (Transmitter) หรือเรียกว่าระบบไครพี (Drive system) และตัวรับข้อมูล (Receiver) หรือเรียกว่าระบบเรสพอนส์ (Response system) ซึ่งจะทำการชิ่งโครไนซ์กันด้วยสัญญาณที่ใช้ในระบบร่วมกัน ความสามารถในการชิ่งโครไนซ์ของระบบเคอดติกนั้นมีความแข็งแกร่งมาก (Robust)



รูปที่ 2.20 โค้ดอะแกรมการชิ่งโครไนซ์ของระบบไครพีและระบบเรสพอนส์

จากสมการของวงจร Lorenz อย่างง่ายในระบบไครฟ์ สามารถนำไปเขียนเป็นสมการของระบบเรสพอนส์ได้ดังนี้

สมการของระบบไครฟ์

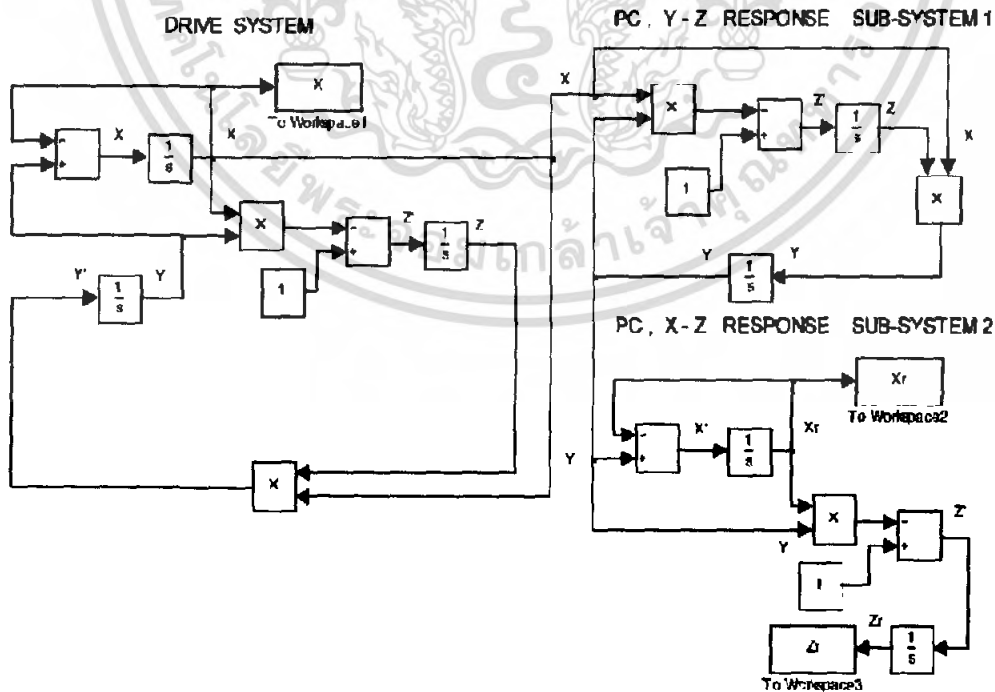
$$\begin{aligned} x' &= -y - x \\ y' &= -xz \\ z' &= xy + 1 \end{aligned}$$

สมการของระบบเรสพอนส์

$$\begin{aligned} y'_2 &= -xz_2 & x'_1 &= -y - x_1 \\ z'_2 &= xy_2 + 1 & z'_1 &= x_1y + 1 \end{aligned}$$

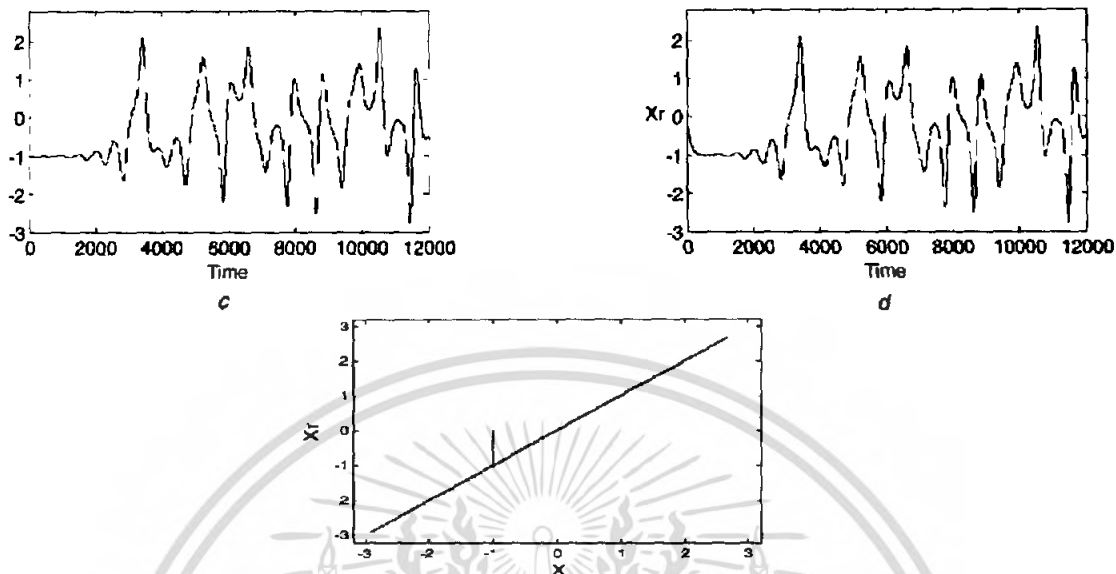
จากทฤษฎีการซิงโครไนซ์ของ Pecora และ Carroll จะได้ค่า

$$|x_1 - x|, |z_1 - z|, |y_2 - y|, |z_2 - z| \rightarrow 0 \text{ เมื่อ } t \rightarrow \infty$$

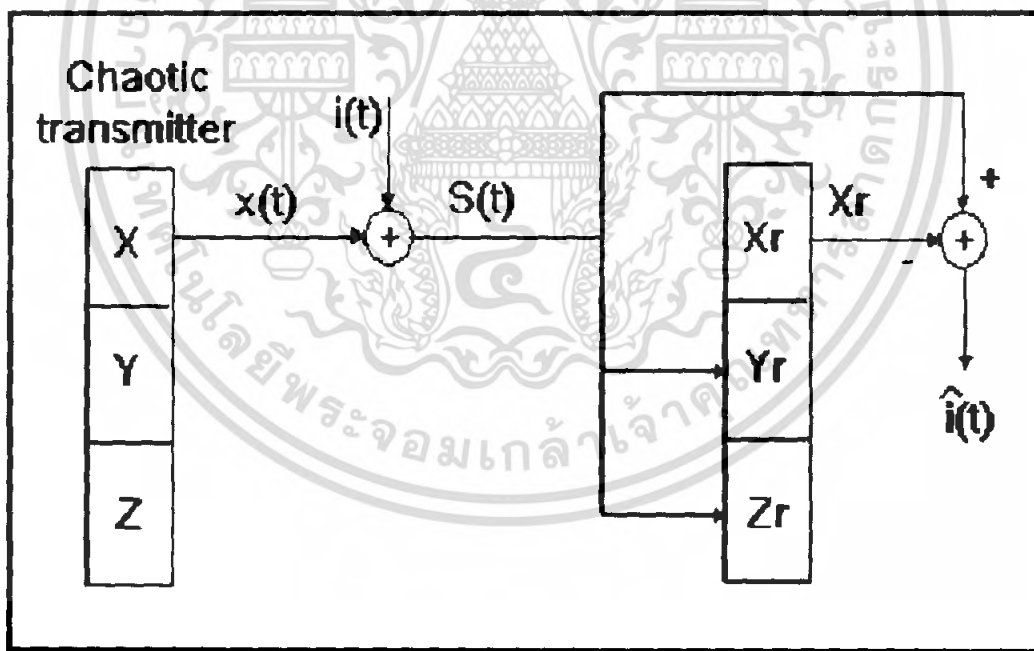


รูปที่ 2.21 วงจรซิงโครไนซ์ที่มีระบบไครฟ์และระบบเรสพอนส์ด้วยโปรแกรม Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 กราฟสัญญาณระหว่าง  $X, X_r, X-X_r$



รูปที่ 2.23 ไคอะแกรมระบบเคออสที่มีการรวมสัญญาณและแยกสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

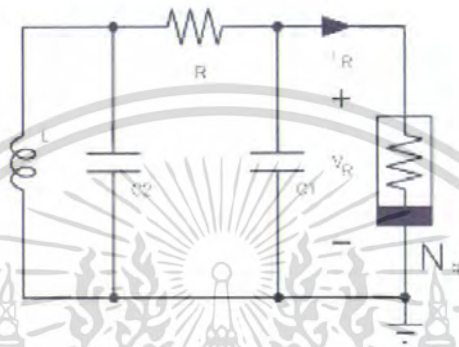


### บทที่ 3

#### วิธีการออกแบบ

#### 3.1 ใช้ Simulink ในโปรแกรม MATLAB® สร้างวงจรตัวดึงดูดของ Chua จากสมการ

##### Chua's Circuit



$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R}(v_2 - v_1) - f(v_1)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R}(v_1 - v_2) - i_3$$

$$L \frac{di_3}{dt} = -v_2$$

โดยที่

$$i_r = \hat{f}(v_R) = G_b v_R + \frac{1}{2}(G_a - G_b)\{|v_R + B_p| - |v_R - B_p|\}$$

จากสมการ Chua ข้างต้น สามารถนำมาสร้างเป็นวงจรในโปรแกรม Simulink ได้ดังนี้

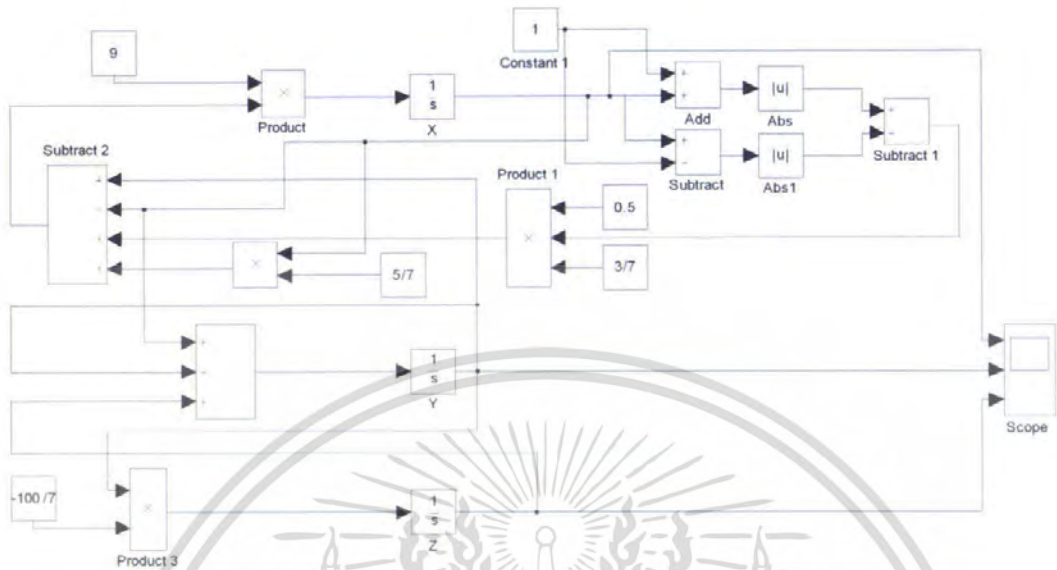
$$x' = A(y - x - bx) + \frac{1}{2}(a - b)\{|x + 1| - |x - 1|\}$$

$$y' = x - y + z$$

$$z' = -By$$

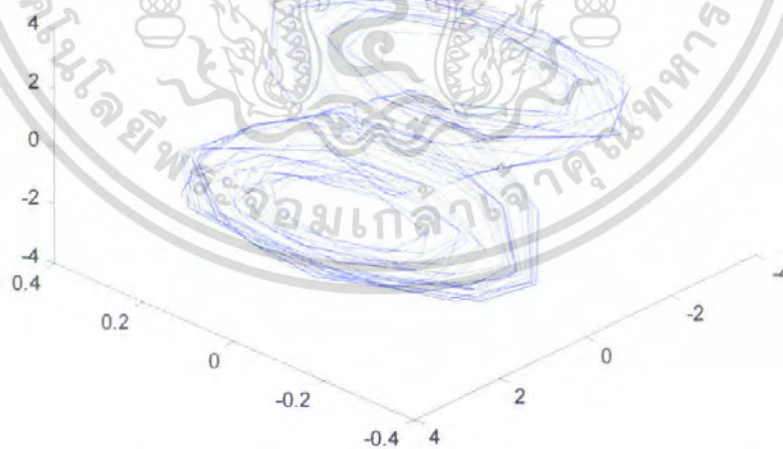
$$A = 9, B = \frac{100}{7}, a = \frac{8}{7}, b = \frac{5}{7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 วงจรตัวคิ่งคูดของ Chua จาก โปรแกรม Simulink

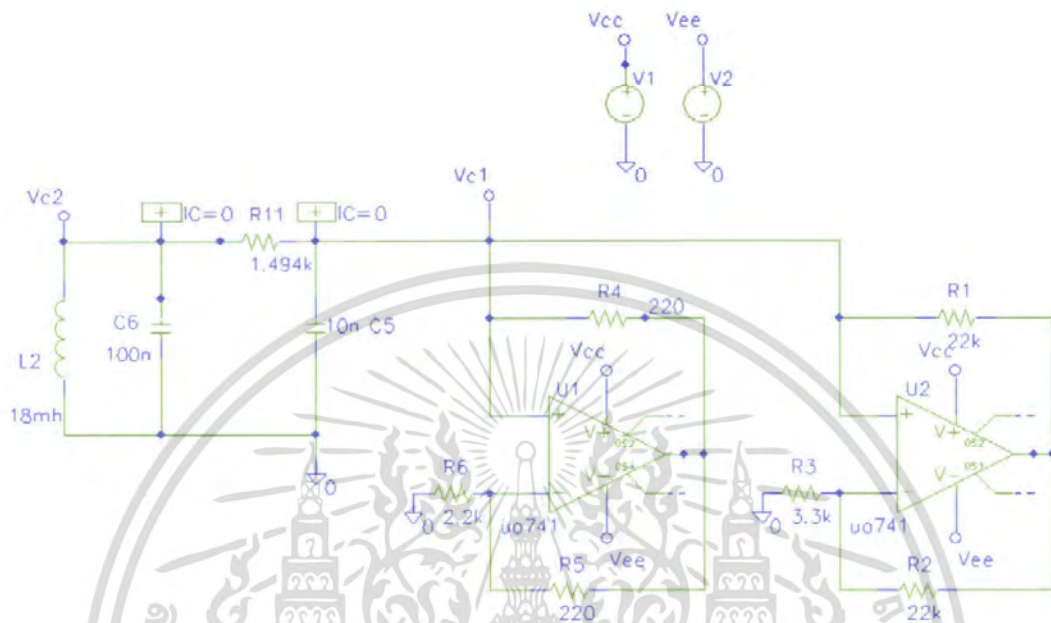
ทำการพล็อตกราฟจากค่าที่ได้จากการรันวงจรข้างต้น ได้กราฟดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟวงจรตัวคิ่งคูดของ Chua ที่ได้จากการพล็อตค่าวงจรรูป 3.1 จาก MATLAB<sup>®</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ทดลองเขียนวงจรตัวดึงคูชของ Chua โดยใช้ Pspice



รูปที่ 3.3 วงจรตัวดึงคูชของ Chua จากโปรแกรม Pspice

รูปที่ 3.4 กราฟที่ได้จากการวัดค่าวงจรตัวดึงคูชของ Chua จากโปรแกรม ORCAD PSPICE<sup>®</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

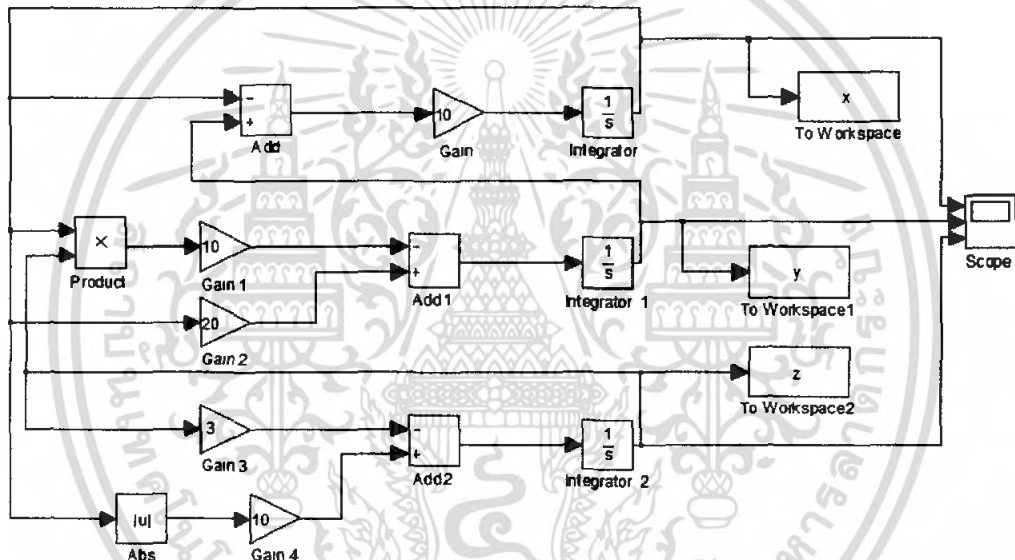
### 3.3 สร้างวงจรที่ปรับปรุงขึ้นจากวงจรตัวดึงดูดของ Lorenz

โดยใช้โปรแกรม Simulink จากสมการดังนี้

$$x' = 10(y - x)$$

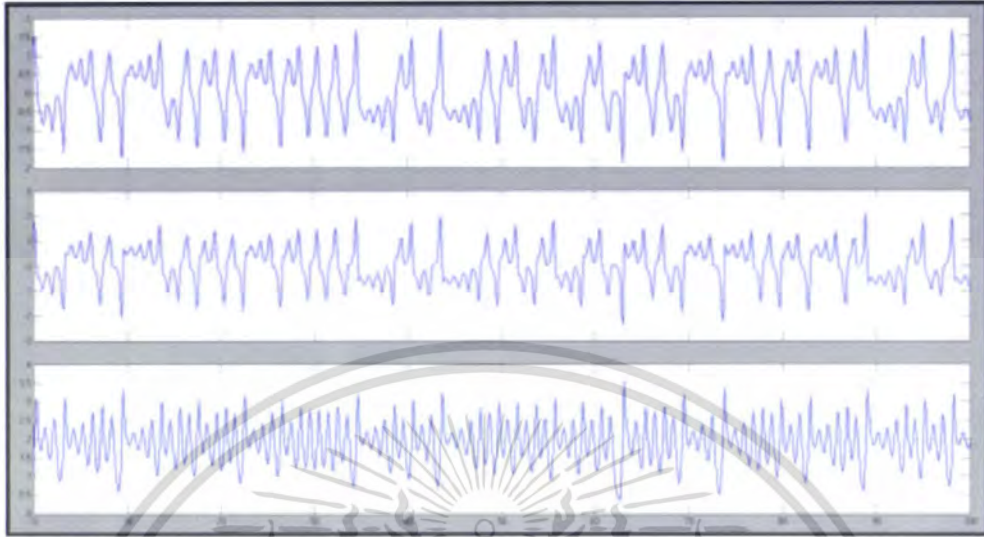
$$y' = 20x - 10xz$$

$$z' = -3z + 10\text{abs}(x)$$



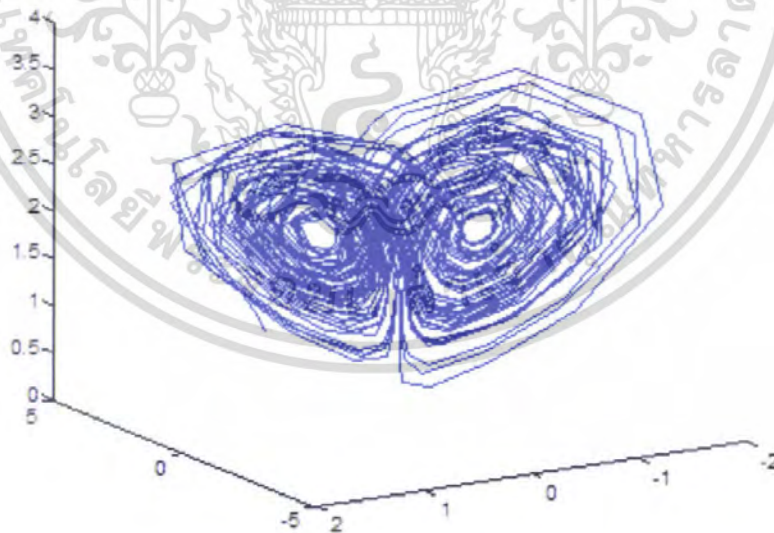
รูปที่ 3.5 วงจรที่ปรับปรุงขึ้น จากวงจรตัวดึงดูดของ Lorenz โดยโปรแกรม Simulink

พล็อตกราฟที่ได้จาก  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ได้กราฟดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ที่ได้จากวงจรตัวดึงดูดของ Lorenz โดยใช้โปรแกรม Simulink

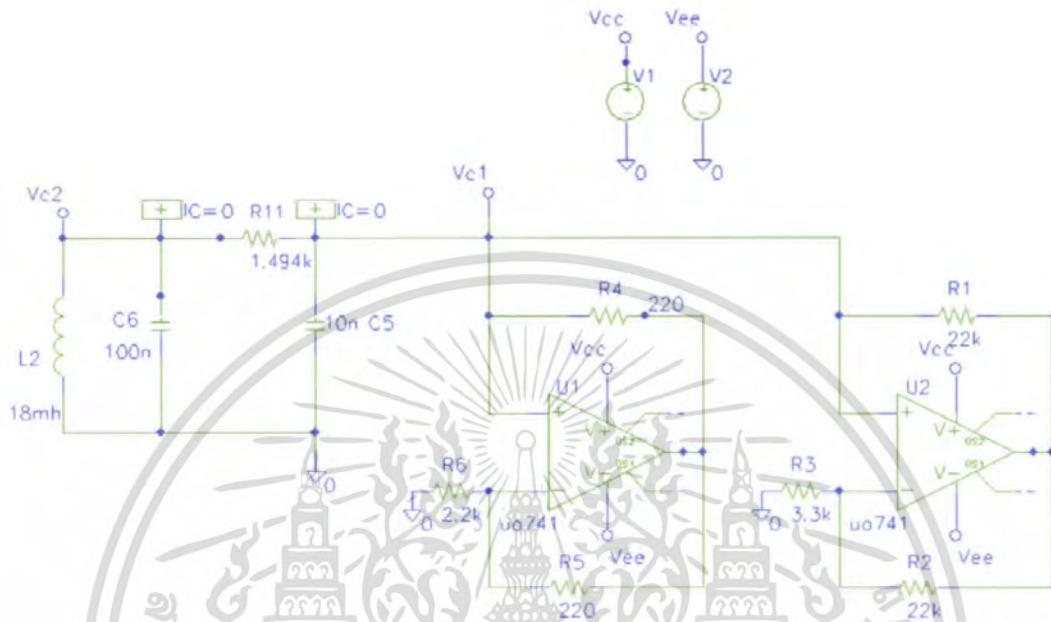
ทำการพล็อตกราฟจากค่าที่ได้จากการรันวงจรข้างต้น ได้กราฟดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟจากค่าที่ทำการจำลอง(Simulate)ได้ จากวงจรตัวดึงดูดของ Lorenz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ทดลองเขียนวงจรที่ปรับปรุงขึ้นจากวงจรตัวดึงดูดของ Lorenz



รูปที่ 3.8 วงจรที่ปรับปรุงจากวงจรตัวดึงดูดของ Lorenz จากโปรแกรม ORCAD PSPICE<sup>®</sup>

รูปที่ 3.9 กราฟที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม ORCAD PSPICE<sup>®</sup> ของวงจรที่ปรับปรุงจาก Lorenz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

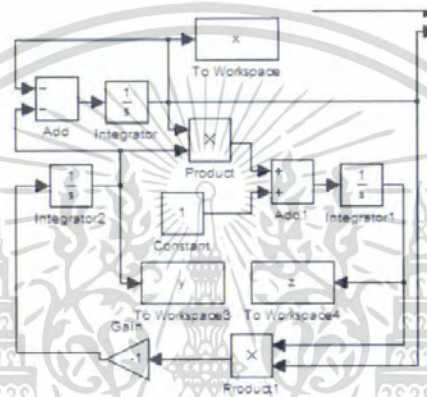
### 3.5 วงจรที่ใช้ทำโครงการ

โดยใช้โปรแกรม Simulink จากสมการดังนี้

$$x' = -y - x$$

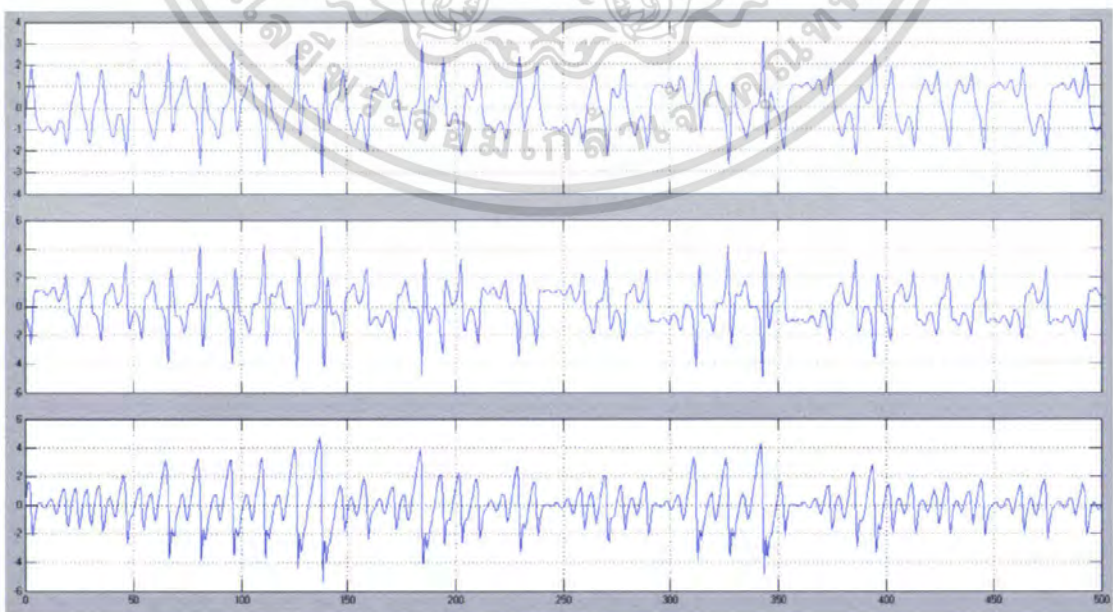
$$y' = -xz$$

$$z' = xy + 1$$



รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้ในการทำโครงการ(Lorenz) ทางด้านส่ง โดยโปรแกรม Simulink

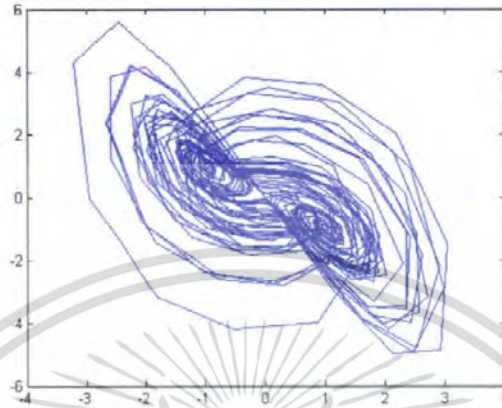
พล็อตกราฟที่ได้จาก x, y และ z ได้กราฟดังรูปที่ 3.9



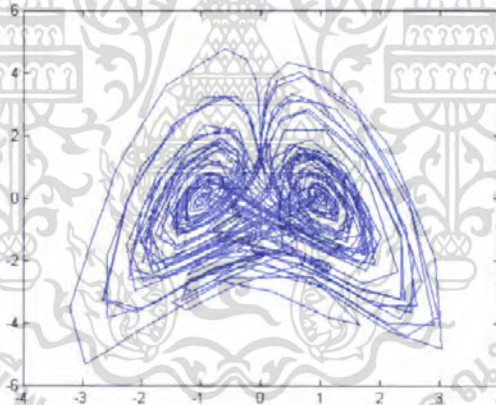
รูปที่ 3.11 กราฟ x, y, z จากวงจรที่ใช้ในการทำโครงการ(Lorenz) โดยใช้โปรแกรม Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการพล็อตกราฟจากค่าที่ได้จากการรันวงจรข้างต้น ได้กราฟดังรูปที่ 3.12 -3.14

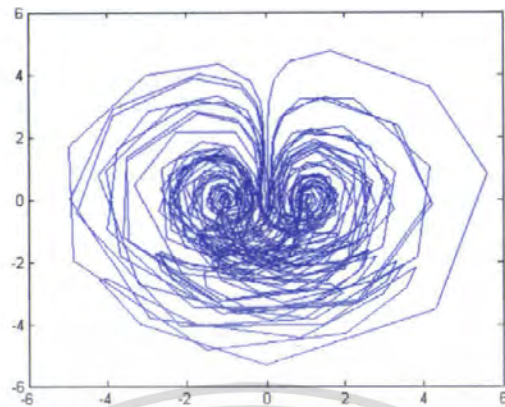


รูปที่ 3.12 กราฟ x-y จากค่าที่ทำการจำลอง(Simulate) ของวงจรที่ใช้ทำโครงการ(Lorenz)



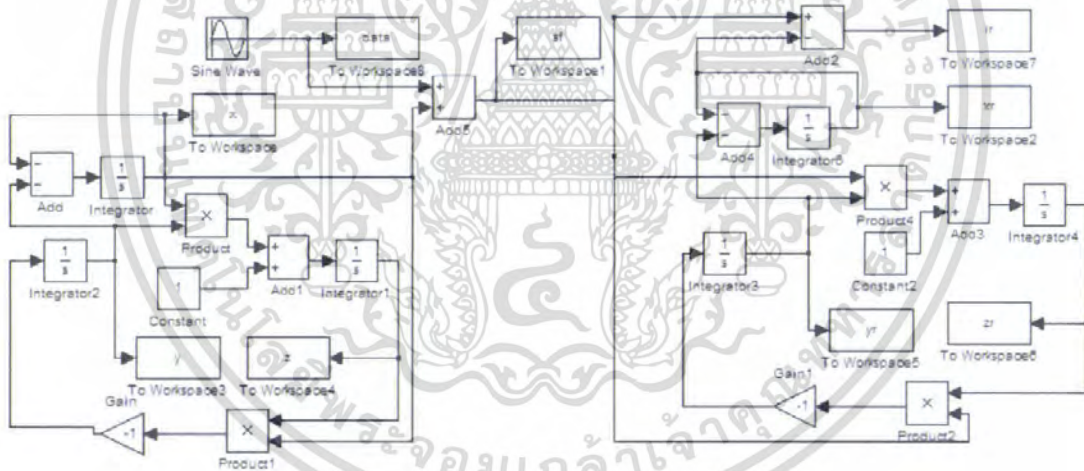
รูปที่ 3.13 กราฟ x-z จากค่าที่ทำการจำลอง(Simulate) ของวงจรที่ใช้ทำโครงการ(Lorenz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 กราฟ y-z จากค่าที่ทำการจำลอง(Simulate)ของวงจรที่ใช้ทำโครงการ(Lorenz)

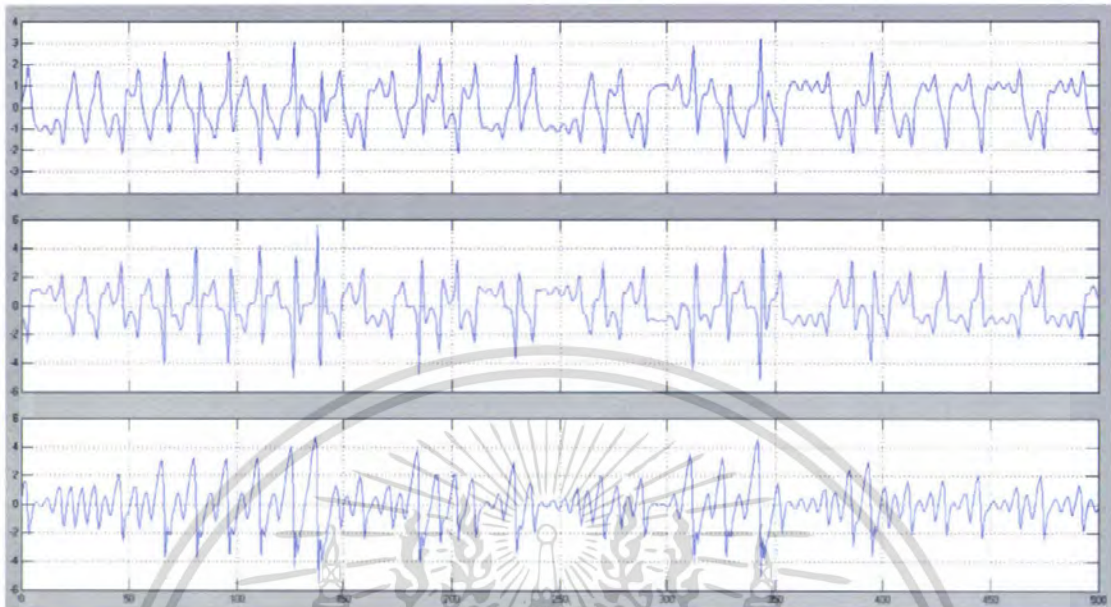
เมื่อนำวงจรตัวตั้งคามาต่อเป็นวงจรที่มีทั้งภาคส่งและภาครับจะได้ ดังนี้



รูปที่ 3.15 วงจรทั้งภาคส่งและภาครับ ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการ(Lorenz)

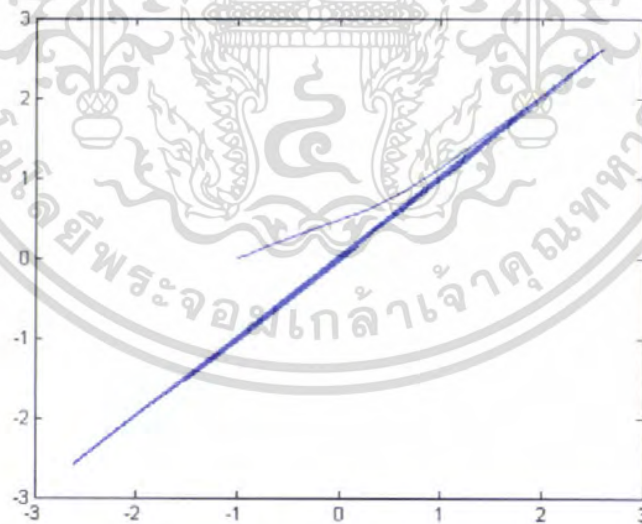
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พล็อตกราฟที่ได้จาก  $x'$ ,  $y'$  และ  $z'$  ได้กราฟดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กราฟ  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  จากวงจรที่ใช้ในการทำโครงงาน(Lorenz) โดยใช้โปรแกรม Simulink

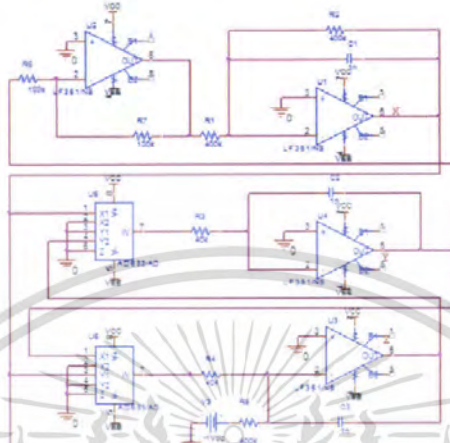
วัดค่าการซิงโครไนซ์โดยการ Plot ค่า  $x-x'$  ได้



รูปที่ 3.17 กราฟที่ได้จากการ plot  $x-x'$  ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงงาน (Lorenz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

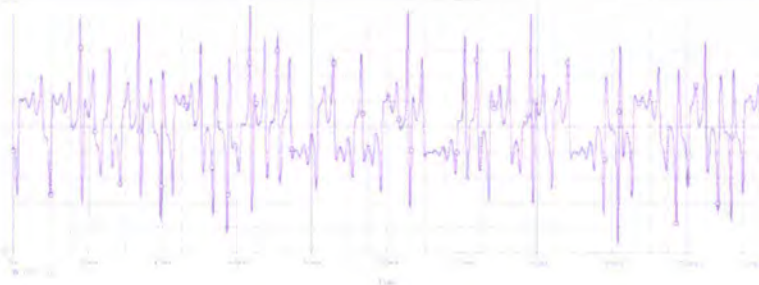
### 3.6 ทดลองเขียนวงจรที่ใช้ในการทำโครงการ โดยใช้ ORCAD PSPICE®



รูปที่ 3.18 ORCAD PSPICE® วงจรภาคส่งที่ใช้ในการสร้างโครงการ

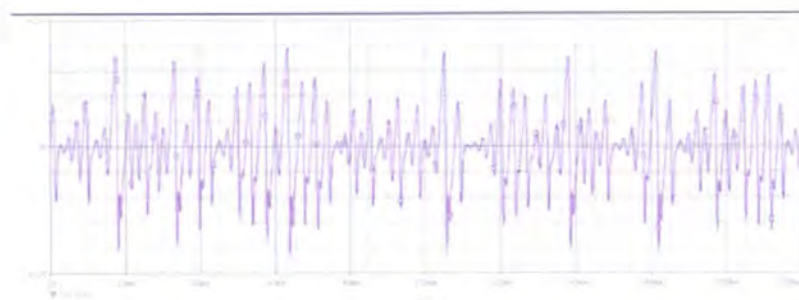
พล็อตกราฟที่ได้จาก x, y และ z ได้กราฟดังรูป

รูปที่ 3.19 ค่า V(C1:2)) (x) ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการ (Lorenz)

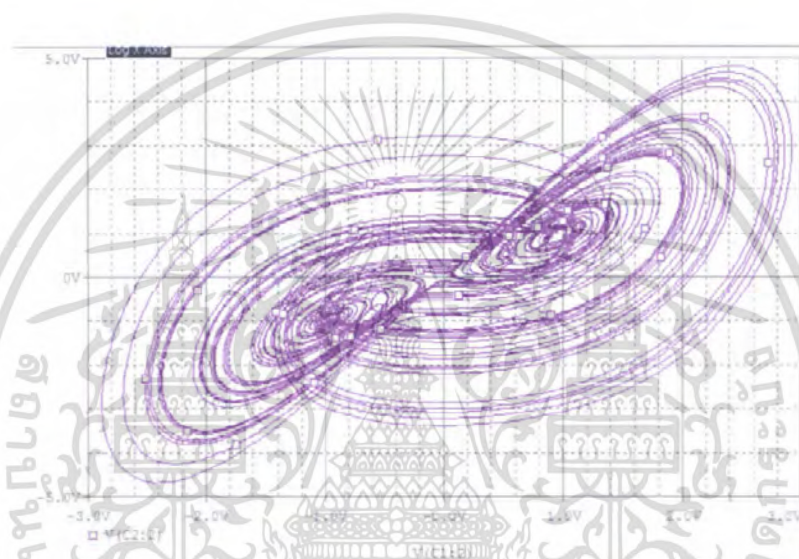


รูปที่ 3.20 ค่า V(C2:2)) (y) ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการ (Lorenz)

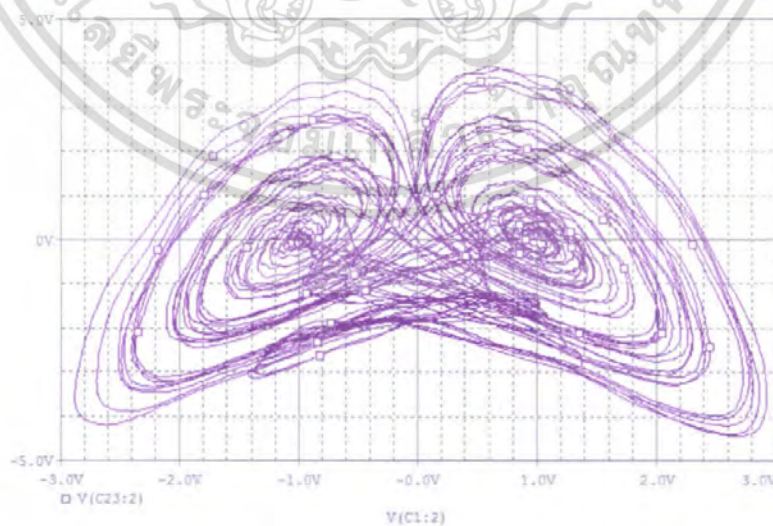
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ค่า  $V(C3:2)$  ( $z$ ) ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงงาน (Lorenz)

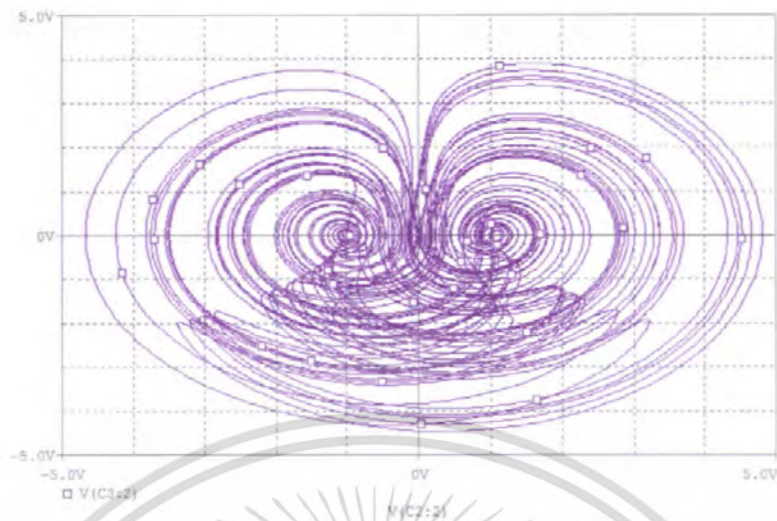


รูปที่ 3.22 แกน  $x = V(C1:2)$  แกน  $y = V(C2:2)$  ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงงาน (Lorenz)



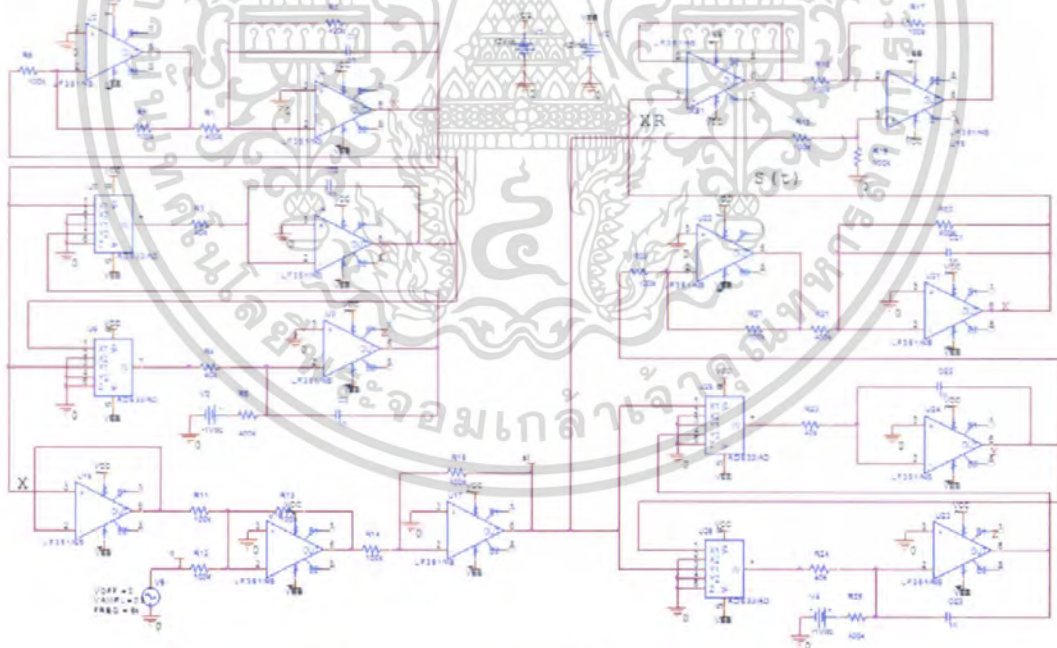
รูปที่ 3.23 แกน  $x = V(C1:2)$  แกน  $y = V(C3:2)$  ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงงาน (Lorenz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 แกน  $x = V(C2:2)$  แกน  $y = V(C3:2)$  ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)

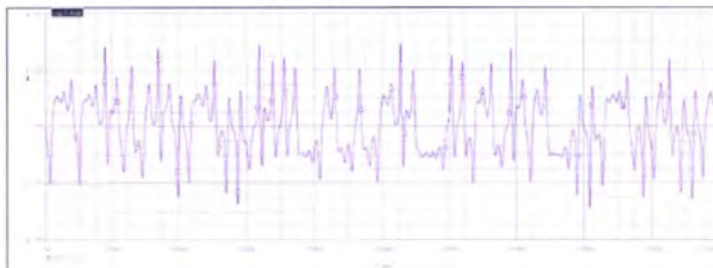
เมื่อนำวงจรตัวคิ่งคูมาต่อเป็นวงจรที่มีทั้งภาคส่งและภาครับจะได้ดังนี้



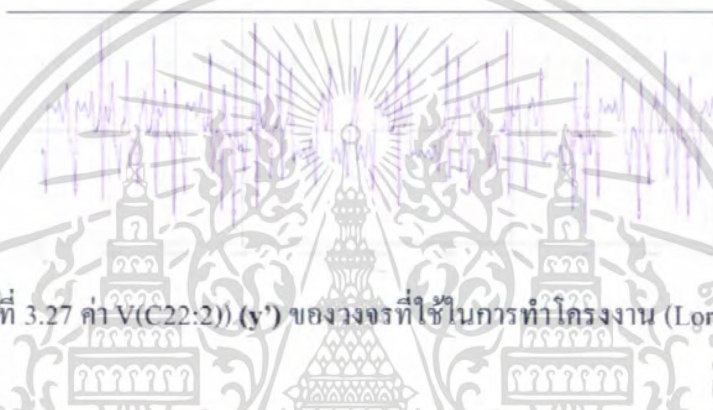
รูปที่ 3.25 วงจรทั้งภาคส่งและภาครับที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พล็อตกราฟที่ได้จาก  $x'$ ,  $y'$  และ  $z'$  ได้กราฟดังรูป



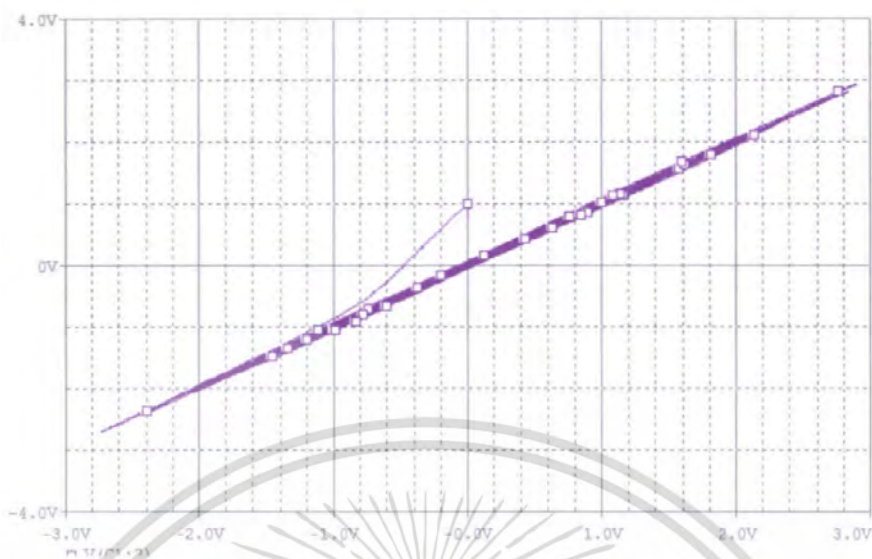
รูปที่ 3.26 ค่า  $V(C21:2)$  ( $x'$ ) ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงงาน (Lorenz)



รูปที่ 3.27 ค่า  $V(C22:2)$  ( $y'$ ) ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงงาน (Lorenz)

รูปที่ 3.28 ค่า  $V(C23:2)$  ( $z'$ ) ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงงาน (Lorenz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 กราฟที่ได้จากการ plot  $x-x'$  ของวงจรที่ใช้ในการทำโครงการงาน (Lorenz)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจร Chua

จากการออกแบบและสร้างวงจรในทางทฤษฎี สามารถสร้างวงจรในทางปฏิบัติได้ดังนี้

##### ค่าที่ใช้ทางทฤษฎี

##### ค่าที่ใช้ทางปฏิบัติ

##### 4.1.1 ตัวต้านทาน (Resistor)

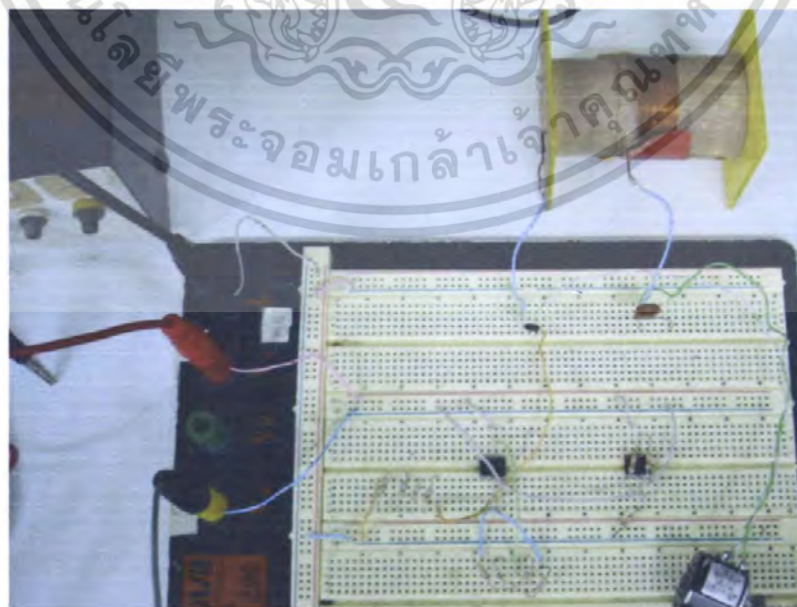
1.1	$220\ \Omega \times 2$	$216.1\ \Omega \times 2$
1.2	$2.2\ \text{k}\Omega \times 2$	$2.256\ \text{k}\Omega \times 2$
1.3	$22\ \text{k}\Omega$	$23.78\ \text{k}\Omega$
1.4	$3.3\ \text{k}\Omega$	$3.05\ \text{k}\Omega$
1.5	Variable Resistance $1.494\ \Omega$	$1.059\ \text{k}\Omega$

##### 4.1.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

2.1	$10\ \text{nF}$	$10.15\ \text{nF}$
2.2	$100\ \text{nF}$	$102.9\ \text{nF}$

##### 4.1.3 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

3.1	$18\ \text{mH}$	$18.03\ \text{mH}$
-----	-----------------	--------------------



รูปที่ 4.1 วงจรที่ต่อเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

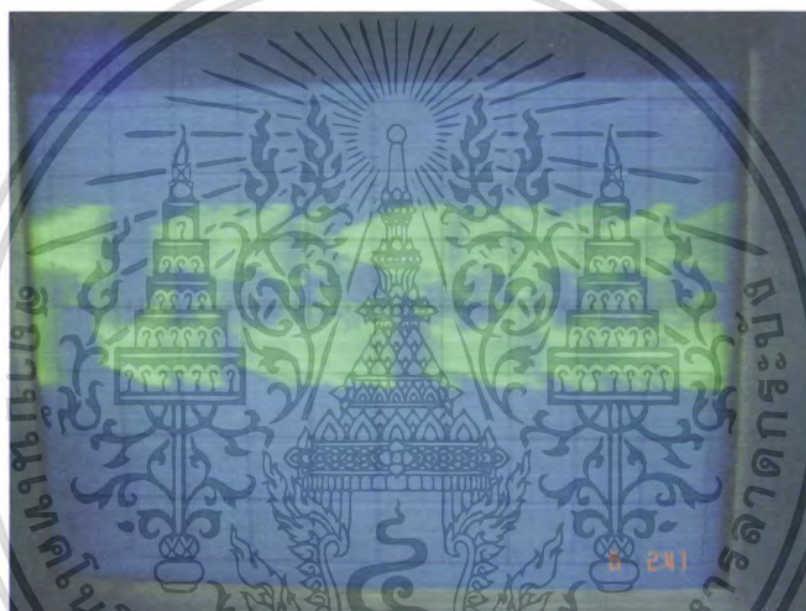
## 4.2 ผลที่ได้จากการทดลองด้วยวงจร Chua

กราฟที่ได้จากวงจรของ Chua (Chua's Circuit) โดยการวัดค่าความต่างศักย์ในแนวแกน X,Y ที่ขาตัวต้านทานปรับค่าได้(Variable resistor) โดยกำหนดค่าดังนี้

ตัวต้านทานปรับค่าได้ 1.059 k $\Omega$

แกน X 0.5 VOLTS/DIV

แกน Y 2 TIMES/DIV



รูปที่ 4.2 กราฟที่ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ ด้วยขอสซิล โลต โทป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรที่ใช้ในการทำโครงการ

จากการออกแบบและสร้างวงจรในทางทฤษฎี สามารถสร้างวงจรในทางปฏิบัติได้ดังนี้

#### 4.3.1 วงจรตัวคิ่งคูดของ Lorenz ทางด้านฝั่งรับและฝั่งส่ง

##### 4.3.1.1 เซมิคอนดักเตอร์

1.1	OP-AMP LF351	8	ตัว
1.2	AD633	4	ตัว

##### 4.3.1.2 ตัวต้านทาน (Resistor)

2.1	20 k $\Omega$	8	ตัว
2.2	100 k $\Omega$	4	ตัว
2.3	200 k $\Omega$	12	ตัว
2.4	Variable Resistance 500 k $\Omega$	2	ตัว

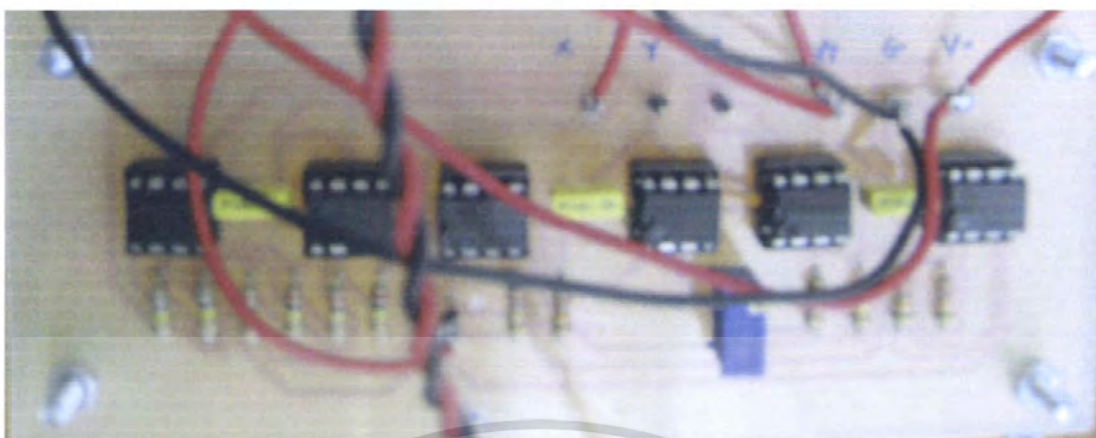
##### 4.3.1.3 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

3.1	1 nF	6	ตัว
-----	------	---	-----



รูปที่ 4.3 วงจรตัวคิ่งคูดฝั่งส่ง – รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรตัวคิ่งคูดฝั่งส่ง

#### 4.3.2 วงจรมอดดูเลขขึ้น

##### 4.3.2.1 เซมิคอนดักเตอร์

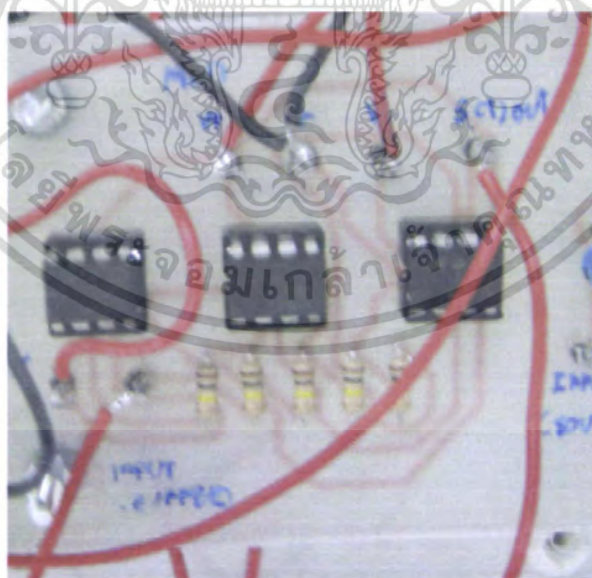
1.1 OP-AMP LF351

ตัว

##### 4.3.2.2 ตัวต้านทาน (Resistor)

2.1 100 k $\Omega$

ตัว



รูปที่ 4.5 วงจรมอดดูเลขขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 วงจรคีมอดคูเดชั่น

#### 4.3.3.1 เซมิคอนดักเตอร์

1.1 OP-AMP LF351 3 ตัว

#### 4.3.3.2 ตัวต้านทาน (Resistor)

2.1 100 k $\Omega$  4 ตัว



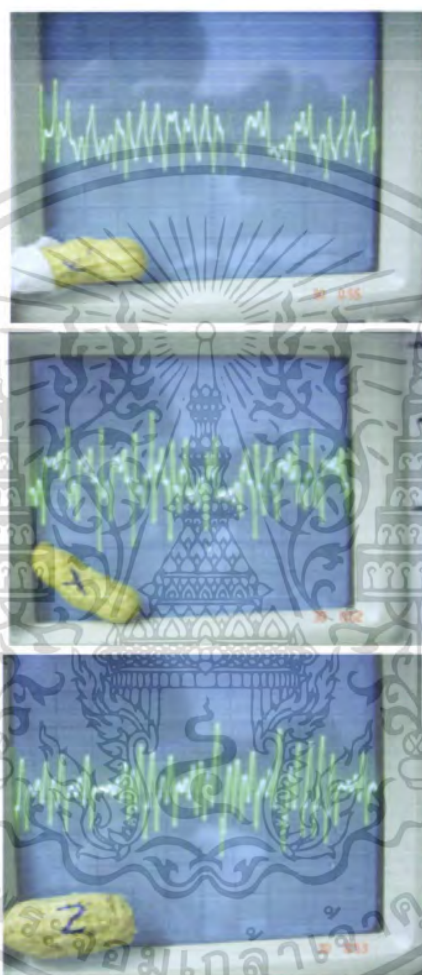
รูปที่ 4.6 วงจรคีมอดคูเดชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 ผลการทดลองวงจรตัวดึงคูต

### 4.4.1 ผังส่ง

#### 4.4.1.1 ใช้ออสซิลโลสโคปวัดค่า V-Output จาก OP-APM 351 ทั้ง 3 ตัว



รูปที่ 4.7 กราฟที่ได้จากออสซิลโลสโคป จาก ขา6 OP-AMP LF351 ทั้ง 3 ค่า เรียงค่า x,y,z

โดยมีการกำหนดค่าของออสซิลโลสโคปไว้ดังนี้

1. แกน X      0.2 VOLTS/DIV
2. แกน Y      10ms TIMES/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



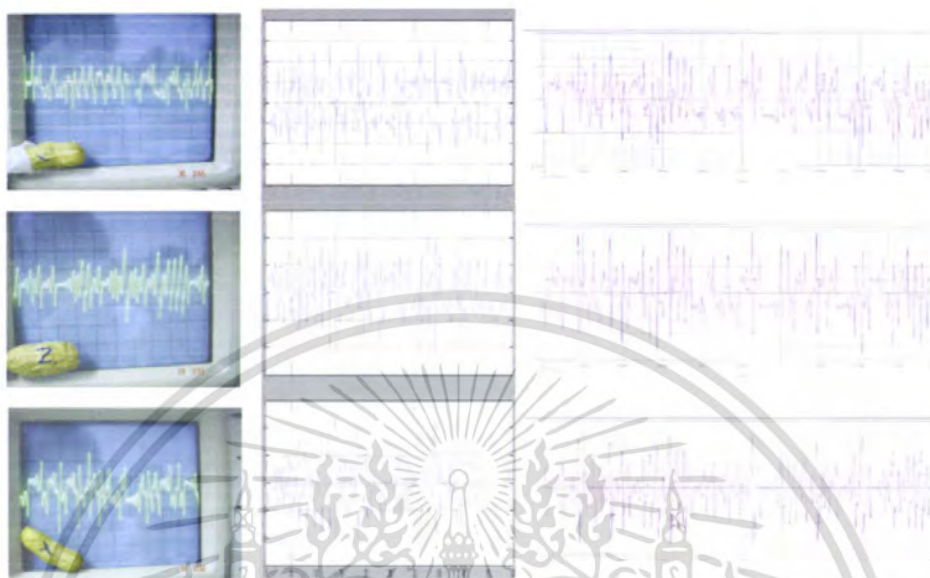
รูปที่ 4.8 ค่าจากออสซิลโลสโคป จาก ขา6 OP-AMP LF351 ทั้ง 3 ค่า เรียงค่า x-y , x-z , y-z

โดยมีการกำหนดค่าของออสซิลโลสโคปไว้ดังนี้

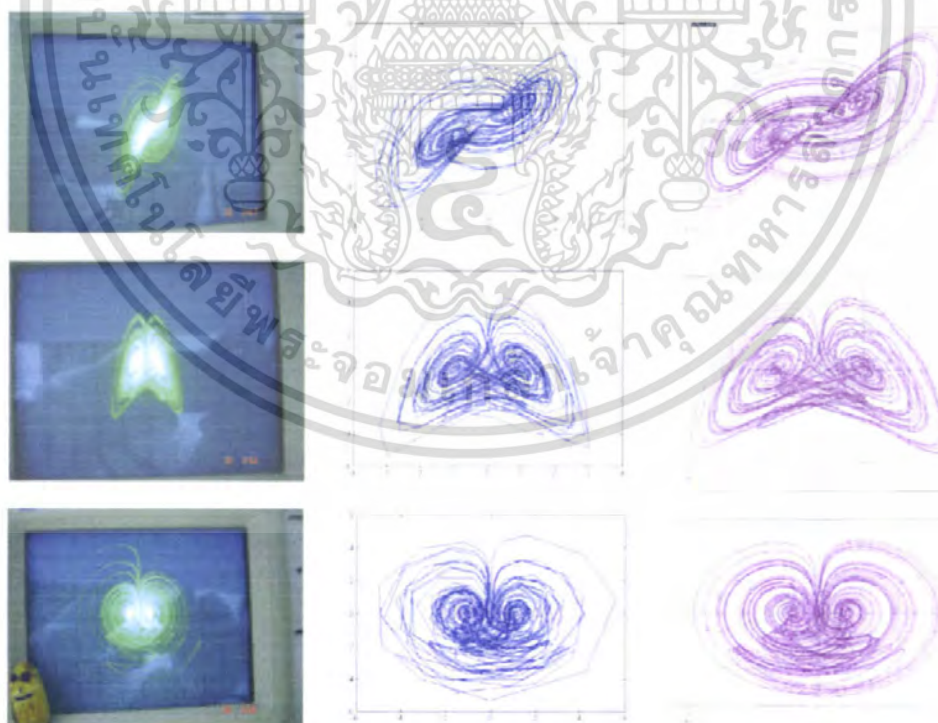
1. แกน X      0.2 VOLTS/DIV
2. แกน Y      0.2ms TIMES/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1.2 ทำการเปรียบเทียบกราฟจากผลที่ได้ทางทฤษฎีกับปฏิบัติ



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่า  $x$ ,  $y$ ,  $z$  จากผลที่ได้กับโปรแกรม MATLAB<sup>®</sup> และ ORCAD PSPICE<sup>®</sup>



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่า  $x$ - $y$ ,  $x$ - $z$ ,  $y$ - $z$  จากผลที่ได้จากโปรแกรม MATLAB<sup>®</sup> และ ORCAD PSPICE<sup>®</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 ตัวคิ่งดูดภาครับ

##### 4.4.2.1 ใช้ข้อสซิดโลสโคปวัดค่า V-Output จาก OP-APM 351 ทั้ง 3 ตัว

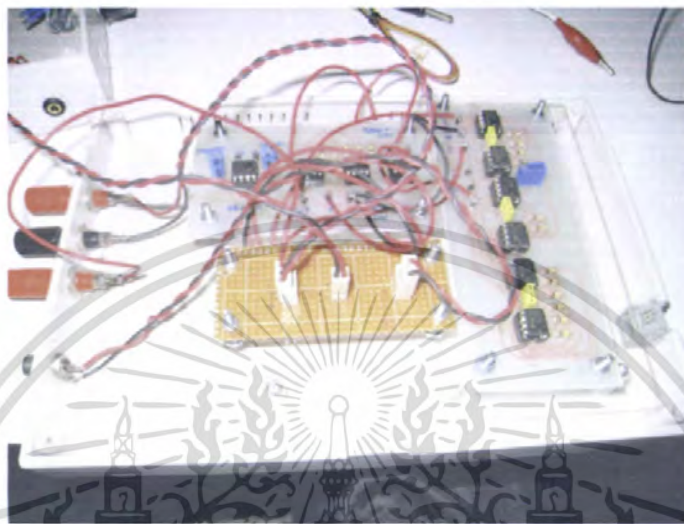


รูปที่ 4.11 ค่าจากข้อสซิดโลสโคป จาก ขว6 OP-AMP LF351 ทั้ง 3 ค่า เรียงค่า  $x',y',z'$

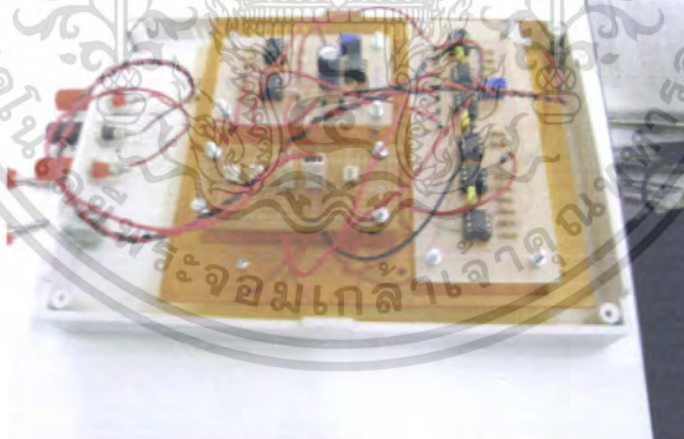
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 วงจรทั้งหมดเมื่อต่อทั้งภาคส่งและภาครับเข้าด้วยกันและใส่เสียงเพื่อทดลองวงจร

##### 4.4.3.1 วงจรภาคส่งและรับ

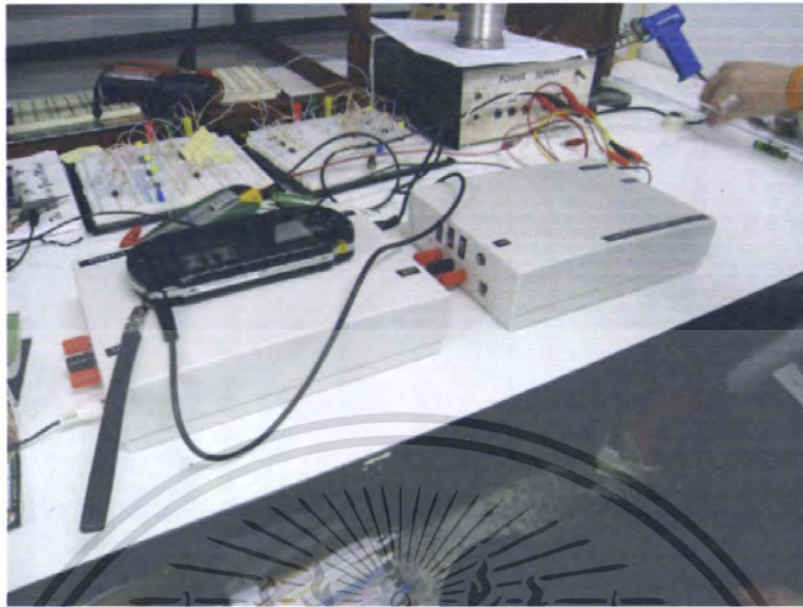


รูปที่ 4.12 กล้องภาคส่ง (วงจรตัวคิ่งคูภาคส่งกับวงจรมอดคูเลขัน)



รูปที่ 4.13 กล้องภาครับ (วงจรตัวคิ่งคูภาครับกับวงจรมอดคูเลขัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



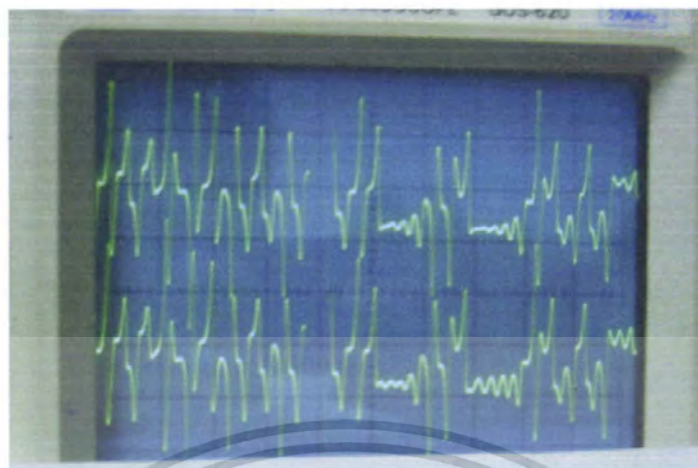
รูปที่ 4.14 อุปกรณ์โดยรวม

4.4.3.2 ใช้ข้อซซิลโลสโคปวัดค่า V-Output จาก OP-APM 351 ทั้ง 3 ตัว ทั้งส่งและรับ



รูปที่ 4.15 ค่า  $x(\text{บน}) - x'(\text{ล่าง})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

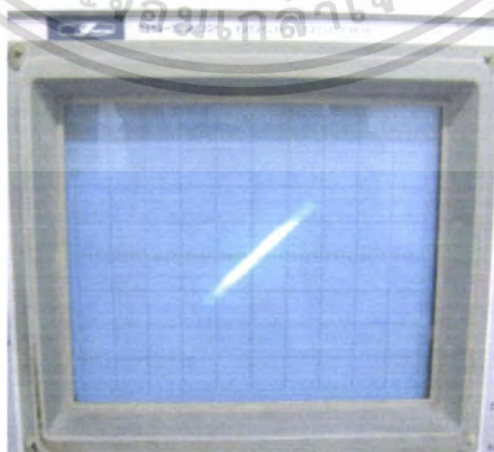


รูปที่ 4.16 ค่า  $y(\text{บน}) - y'(\text{ล่าง})$



รูปที่ 4.17 ค่า  $z(\text{บน}) - z'(\text{ล่าง})$

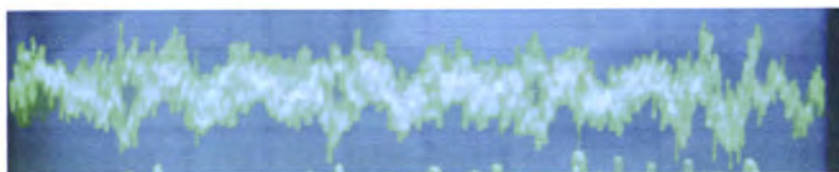
#### 4.4.3.3 ใช้ออสซิลโลสโคปวัดค่าการชิงโครไนซ์โดยเทียบค่า $x-x'$ ได้



รูปที่ 4.18 ค่าที่ได้จากการวัด  $x-x'$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 เสียงที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.19 เสียงคั่นฉบับที่ยังไม่มีการเข้ารหัส



รูปที่ 4.20 สัญญาณเคออดิกที่นำมา



รูปที่ 4.21 เสียงคั่นฉบับที่มีการเข้ารหัส



รูปที่ 4.22 เสียงที่ได้จากการถอดรหัสด้วยวงจรรีเสทพอนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุป

#### 5.1 สรุปการพัฒนาโครงการ

จากการศึกษาและทดลองสร้างวงจรตัวคึงคูดของ Chua และวงจรตัวคึงคูดที่ปรับปรุงขึ้น จากวงจรตัวคึงคูดของ Lorenz เราสามารถสร้างสัญญาณที่เป็นตัวคึงคูด ขึ้นมาได้ด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator), วงจรดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Voltage Amplifier), วงจรมัลติพลายเออร์ (Multiplier) และวงจรเรกติไฟเออร์ (Full-wave Rectifier) และเมื่อทำการสร้างวงจรที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณเสียง จะต้องใช้วงจรมอดูเลชัน (Modulation), วงจรดีมอดูเลชัน (Demodulation) และระบบเคออสติกที่มีการซิงโครไนซ์ (Synchronized chaotic systems) เมื่อนำสัญญาณเสียงผ่านเข้าวงจรแล้วทำการทดลองคักฟังเสียงระหว่างทาง จะได้ยินแต่เสียงที่ฟังไม่รู้เรื่องและไม่สามารถถอดรหัสได้ถ้าไม่มีวงจรเคออสติกที่ซิงโครไนซ์กัน จึงมีความปลอดภัยในข้อมูลข่าวสารที่เป็นความลับมากกว่าการส่งข้อมูลทั่วไป

#### 5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านเทคนิค

ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดลองคือ ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทางทฤษฎีกับค่าที่ใช้ในการทดลองทางปฏิบัติมีค่าไม่ตรงกัน เนื่องจากไม่สามารถหาอุปกรณ์ที่มีค่าตรงกับค่าทางทฤษฎีได้ จึงได้ทำการใช้อุปกรณ์ที่มีค่าใกล้เคียงกันมาทำการทดลองทางด้านปฏิบัติแทน ทำให้ผลการทดลองที่ได้จากการต่อวงจรจริง มีความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองที่ได้จากการต่อวงจรด้วยโปรแกรม ORCAD PSPICE<sup>®</sup> และในการเข้ารหัสของวงจรตัวคึงคูดนั้น วงจรตัวคึงคูดที่ได้ทำการสร้างนั้น ยังมีเสียงรบกวน (Noise) อยู่บ้าง เนื่องจากการซิงโครไนซ์ของวงจรยังมีค่า Error อยู่ ทำให้สัญญาณที่ได้รับมีสัญญาณของตัวคึงคูดหลงเหลืออยู่

### 5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ

การศึกษาและพัฒนาระบบเข้ารหัสลับเสียงด้วยตัวคิ่งคูดเคออดิก นั้น เราได้ทำการศึกษา การเข้ารหัสลับด้วยสัญญาณเสียงเพียงอย่างเดียว ซึ่งเราสามารถนำระบบเคออดิกต่าง ๆ นั้นไป เข้ารหัสสัญญาณรูปแบบอื่นๆ เช่น เอกสารข้อมูล สัญญาณภาพ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้การส่งข้อมูลที่ เป็นความลับ มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Rabinder N. Madan, "CHUA'S CIRCUIT A Paradigm for CHAOS", World Scientific., Dec 1993.
- [2] Chua's Circuit - [http://www.cmp.caltech.edu/~mcc/chaos\\_new/Chua.html](http://www.cmp.caltech.edu/~mcc/chaos_new/Chua.html)
- [3] Lorenz Attractor - <http://www.schnozzle.org/~paulh/misc/lorenz.htm>
- [4] Op-Amp - <http://www.schnozzle.org/~paulh/misc/opamp.htm>
- [5] Integrator Op-Amp - [http://www.wisc-online.com/objects/index\\_tj.asp?objID=SSE5303](http://www.wisc-online.com/objects/index_tj.asp?objID=SSE5303)
- [6] Rectifier Circuit - <http://sound.westhost.com/appnotes/an001.htm>
- [7] L. M. Pecora and T. L. Carroll, "Synchronization in chaotic systems", Phys. Rev. Lett., vol. 64, pp. 821-824, Feb. 1990.
- [8] L. M. Pecora and T. L. Carroll, "Driving system with chaotic signals", Phys. Rev. A., vol. 44, pp. 2374-2383, Aug. 1991.
- [9] T. L. Carroll and L. M. Pecora, "Synchronizing chaotic circuits", IEEE Trans. Circuits Sysf., vol. 38, pp. 453-456, Apr. 1991
- [10] K. M. Cuomo, A. V. Oppenheim, and S. H. Isabelle, "Spread spectrum modulation and signal masking using synchronized chaotic systems", MIT Res. Lab. Electron. TR 570, Feb. 1992.
- [11] K. M. Cuomo and A. V. Oppenheim, "Synchronized chaotic circuits and systems for communications", MIT Res. Lab. Electron. TR 575, Nov. 1992.
- [12] K. M. Cuomo and A. V. Oppenheim, "Chaotic signals and systems for communications", IEEE ICASSP III, pages 137-140, 1993.
- [13] K. M. Cuomo and A. V. Oppenheim, "Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications", Phys. Rev. Lett., vol. 71, no. 1, p. 65-68, July 1993
- [14] Kevin M. Coumo, Alan V. Oppenheim, and Steven H. Strogatz, "Synchronization of Lorenz-based chaotic circuit with applications to communications", vol. 40, no. 10, pp. 626-633, Oct. 1993
- [15] Hsin-Chieh Chen a, Jen-Fuh Chang b, Jun-Juh Yan b, and Teh-Lu Liao a, "EP-based PID control design for chaotic synchronization with application in secure Communication", pp. 1169-1177, 2008

- [16] I. Pehlivan and Y. Uyarog̃ lu, “Simplified chaotic diffusionless Lorenz attractor and its application to secure communication systems”, IET Commun., pp. 1015–1022, 2007
- [17] A. B. Oruc, G. Alvarez, F. Montoya Instituto de Física Aplicada, “Security problems with a SC-CNN-based chaotic masking secure communication system”, C.S.I.C.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้