สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# รายงานวิจัย

# ชุดทดลองการเรียนรู้ระบบอลวนโดยวงจรต่อร่วมกับคอมพิวเตอร์

# Laboratory Setup for Chaotic System Studyby Circuit in cooperate with Computer

ผู้วิจัย ผศ.กฤดากร กล่อมการ

RCH
Q
172.5
.C45
ก2731
ฉ. 2
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 121171
วัน, เดือน, ปี 25 ส.ค. 2555

หนังสือเป็นสมบัติของท่าน
โปรดช่วยกันรักษา
www.lib.kmitl.ac.th
สำนักหอสมุดกลาง โทร. 0 2329 8231

b 18408985
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ชุดทดลองการเรียนรู้ระบบอลวนโดยวงจรต่อร่วมกับคอมพิวเตอร์

**Laboratory Setup for Chaotic System Study by Circuit in cooperate with Computer**

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
ประจำปี 2554 จำนวนเงิน 64,900 บาท
ระยะเวลาทำงานวิจัยตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 - 30 กันยายน 2554

ผู้วิจัย ผศ.กฤดากร กล่อมการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เสนอการชุดทดลองการเรียนระบบอลวน โดยงานวิจัยเสนอการสร้างระบบการทดลองสาธิต 3 รูปแบบคือ

1. การสร้างชุดทดลองซิงโครไนซ์สัญญาณอลวนแบบปีกผีเสื้อ
2. การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบง่ายที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์โดยผ่านคอมพิวเตอร์
3. สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้หลายรูปแบบ โดยออกแบบเป็นลักษณะโมดูล

ซึ่งแต่ละรูปแบบสามารถเป็นชุดทดลองกับนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าสำหรับเรียนรู้ระบบอลวนในระดับ ปริญญาตรีได้

**Abstract**

This research paper proposed the design and construction of laboratory setup for chaotic system by three experiment sets. The demonstrate sets consist of

1. The butterfly-chaotic synchronized demonstration system,
2. The simple chaotic circuit in cooperate with computer adjust parameter,
3. The module based chaotic circuit which generates many pattern signal.

All system can be use as experiment set for undergraduate student in electrical engineering to study about chaotic and nonlinear system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | |
|---|---|
| 1. บทนำ | 1 |
| 2. ทฤษฎีในงานวิจัย | 3 |
| 3. ชุดทดลองสัญญาณอลวนสำหรับการซิงโครไนซ์ | 12 |
| 4. ชุดทดลองสัญญาณอลวนแบบเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ | 27 |
| 5. ชุดทดลองกำเนิดสัญญาณอลวนได้หลายรูปแบบ | 44 |
| 6. เอกสารอ้างอิง | 50 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

**หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย**

พฤติกรรมอลวน (Chaotic Behavior) เป็นพฤติกรรมเกิดจากระบบพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเมื่อพิจาราณาคุณสมบัติในโดเมนของเวลาแล้วพบว่ามีลักษณะคล้ายสัญญาณเชิงสุ่ม (random) แต่คุณสมบัติของระบบพลวัตที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์อลวนนั้น เป็นระบบที่เจาะจง (deterministic) โดยสัญญาณที่เกิดขึ้นนี้จะมีลักษณะขึ้นกับค่าเริ่มต้น (initial valve) ดังนั้นทำให้ระบบพลวัติแบบอลวนมีความสามารถทำการ Synchronize ทางเวลากับระบบระบบพลวัติแบบอลวนที่มีคุณสมบัติเหมือนกันได้

สำหรับการประยุกต์ระบบอลวนทางวิศวกรรมนั้น ได้มีใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น งานที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมระบบควบคุมเช่นการใช้พฤติกรรมอลวนในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สำรวจ การควบคุมระบบการหมุนของเครื่องซักผ้า การควบคุมการฉีดน้ำสำหรับเครื่องล้างจานเพื่อให้ประหยัดพลังงาน งานที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ได้แก่การใช้ฟังก์ชันอลวนสำหรับการเข้ารหัสสัญญาณเพื่อลดขนาดของข้องมูล และด้วยคุณสมบัติที่สามารถทำการ Synchronize ได้นั้น สัญญาณที่เกิดจากระบบอลวนจึงถูกนำมาใช้ในงานเข้ารหัสลับและการสื่อสารแบบกระจายสเปคตัมได้เช่นกัน และด้วยคุณสมบัติสัญญาณคล้ายกับสัญญาณรบกวนแต่สามารถควบคุมพฤติกรรมได้นั้น สัญญาณอลวนจึงสามารถนำมาใช้แทนที่สัญญาณรบกวน โดยใช้ประโยชน์ สำหรับการลด Harmonic ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง หรือเป็นสัญญาณทดสอบเป็นต้น

จากประโยชน์การใช้งานดังกล่าว จึงทำให้ต้องมีการเรียนรู้ระบบอลวนและพฤติกรรม แก่นักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ ในระดับปริญญาตรี ในสาขาที่เกี่ยวข้องเช่น วิศวกรรมควบคุม, คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม เพื่อให้เข้าใจระบบ พฤติกรรมและทฤษฎีอลวนเพื่อประยุกต์ ในด้านต่างๆได้

แต่ในทางปฏิบัติพฤติกรรมของระบบอลวนนี้ เกิดขึ้นจากระบบที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear System) ซึ่งการเรียนการสอนในเรื่องระบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้น มักไม่มีการเรียนการสอนในรายวิชาบังคับพื้นฐานสำหรับนักศึกษา ดังเช่นวิชา Electronics Circuits, Feedback Control, Signal and System ซึ่งเป็นวิชาพื้นฐานปกติสำหรับนักศึกษาในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าโดยทั่วไป รวมทั้งเอกสารตำราที่มีส่วนใหญ่มักเริ่มต้นด้วยเนื้อหาที่นักศึกษาส่วนใหญ่ไม่คุ้นเคย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอ การสร้างชุดทดลองสำหรับการเรียนรู้พฤติกรรมระบบอลวนด้วยวงจรอิเลอทรอนิคส์ต่อร่วมกับคอมพิวเตอร์ โดยสามารถใช้ในประกอบวิชาบรรยายและวิชาปฏิบัติสำหรับการเรียนรู้พฤติกรรมระบบอลวน ในระดับปริญญาตรี ซึ่งสามารถทำให้นักศึกษาได้เข้าใจพฤติกรรมของระบบ, วิธีการสร้างสัญญาณ และการ Synchronize รวมถึงประยุกต์ในการควบคุม โดยผู้วิจัยจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการพัฒนาวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนขึ้นมาเพื่อให้นักศึกษาในระดับปริญญาตรี ที่มีความรู้พื้นฐานในระบบเชิงเส้นเบื้องต้นจากวิชา Feedback Control, Signal and System สามารถเข้าใจพฤติกรรมของระบบอลวนได้ พร้อมทั้งการต่อเชื่อมระบบทดลองกับคอมพิวเตอร์ เพื่อให้นักศึกษาสามารถเข้าใจคุณสมบัติทางพฤติกรรมต่างๆ ของระบบเช่น โดเมนทางเวลา, ทางความถี่, อนุกรมทางเวลา คุณสมบัติ Lyapunov exponents, ลักษณะวงโคจร (Point care) และคุณสมบัติทาง Bifurcation ของระบบ

**1. 1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย**

1.1.1 สร้างต้นแบบชุดทดลองการเรียนรู้ระบบพฤติกรรมอลวน

1.1.2 สร้างองค์ความรู้เรื่องการทดลองระบบอลวนให้กับนักศึกษาระดับปริญญาตรี

1.1.3 เผยแพร่เรื่องการทดลองในการเรียนรู้ทดลองระบบอลวนให้กับระดับอุดมศึกษาอื่นๆ ในประเทศ

**1.2. งานเสนอโครงการวิจัย**

สร้างเครื่องต้นแบบการทดลองขึ้น 1 ชุดโดยประกอบด้วย

1.2.1 ชุดโมดูลทดลองสัญญาณอลวนสำหรับการ Synchronize เพื่อแสดงคุณสมบัติทางการสื่อสาร

1.2.2 ชุดทดลองสัญญาณอลวนแบบเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์

1.2.3 ชุดกำเนิดสัญญาณอลวน แบบโมดูลย่อย ซึ่งประกอบด้วยชุดอุปกรณ์เชิงเส้น และอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น โดยแต่ละชุดสามารถประกอบเป็นระบบที่สามรถกำเนิดสัญญาณอลวนตามแต่ผู้สอนหรือผู้เรียนรู้จะกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎีในงานวิจัย

**ระบบบอลวน** ค้นพบโดยบังเอิญโดย ศาสตรจารย์ Edward N. Lorenz [1] นักอุตินิยมวิทยาแห่งสถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมซซาซูเซท ในปี พ.ศ. 2506 โดยเวลานั้น Lorenz ได้พยายามสร้างแบบจำลองทางอุตุนิยมวิทยาด้วยสมการอนุพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นขนาดลำดับ 3 ตัว x, y, z ของความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ ความกดอากาศ ความเร็วลมโดยในสมการมีตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น(quadratic nonlinear) อยู่ 2 เทอม และให้ประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ โดยเริ่มประมวลผลด้วยทศนิยม 6 หลัก แต่เนื่องจากขณะนั้นคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำ Lorenz จึงได้ลดหลักทศนิยมของค่าเริ่มต้นของการคำนวณด้วยเลขทศนิยมจาก 6 หลักเหลือ 3 หลักโดยคิดว่าเลขทศนิยมที่ตัดทิ้งจะไม่มีนัยสำคัญแต่ผลของการคำนวณ แต่เมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง พบว่าผลของการคำนวณด้วยค่าเริ่มต้นด้วยทศนิยม 3 หลัก ได้เปลี่ยนแปลงจากการคำนวณครั้งก่อนไปอย่างมากมายหรือเพียงกำหนดค่าเริ่มต้นต่างกันเล็กน้อยผลของสมการอนุพันธ์ ที่ Lorenz จำลองขึ้นนี้จะให้ผลแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวได้ว่าระบบที่จำลองขึ้นนี้ไวต่อค่าเริ่มต้นและเมื่อทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร x ต่อ y และx ต่อ z จะมีลักษณะรูปร่างที่แปลกประหลาดมีลักษณะเป็นแอทแทรกเตอร์(attractor)โดย ลักษณะของ x ต่อ z มีลักษณะคล้ายปีกผีเสื้อ ภายหลังมีผู้เรียกว่าแอทแทรกเตอร์แบบ Lorenz และ Lorenz เรียกปรากฏการณ์ที่ค้นพบโดยบังเอิญนี้ว่าผลกระทบของผีเสื้อ (Butterfly effect) โดยความหมายในระบบอุตุนิยมวิทยาเป็นระบบที่อ่อนไหวมากเพียงผีเสื้อขยับปีกที่ Hong Kong ก็อาจเกิดปรากฏการณ์ Tornado หรือสภาวะสับสนอลหม่านที่ California ได้

สำหรับหัวใจระบบอลวนที่สำคัญคือเคออสติกแอทแทรกเตอร์โดยหลังจากที่ Lorenz ได้ค้นพบแอทแทรกเตอร์แรกแล้ว ต่อมา Rosslor [2] ได้ค้นพบแอทแทรกเตอร์ จากการจำลองปรากฏการทางเคมี โดยมีเทอมตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้นเพียงเทอมเดียว และในขณะต่อมา Rosslor [3] ได้นำเสนอเคออสติกแอทแทรกเตอร์ ขนาด 4 มิติ หรือ ไฮเปอร์เคออสติก โดยการเพิ่มลำดับของสมการจากลำดับ 3 เป็น ลำดับ 4

คุณลักษณะของเคออสติกแอทแทรกเตอร์ [4]

1. มีความไวต่อค่าเริ่มต้น
2. มีลักษณะคล้ายสัญญาณรบกวนในโดเมนของเวลา
3. สเปคตรัมกำลังของสัญญาณมีลักษณะย่านกว้าง

สำหรับการสร้างเคออสติกแอทแทรกเตอร์ในวงการวิศวกรรมไฟฟ้านั้น Chua [5] ได้นำเสนอการสร้างวงจรเพื่อกำเนิด สัญญาณเคออสโดยวงจรประกอบด้วย ความต้านทาน 1 ตัว ตัวเก็บประจุ 2 ตัว ความเหนี่ยวนำ 1 ตัวและอุปกรณ์สร้างความต้านทานลบไม่เป็นเชิงเส้น 1 ชุด โดยวงจรนี้สามารถกำเนิดสัญญาณเคออสได้ทั้งแบบ 1 สกอร์ และ 2 สกอร์ โดยปรับที่ตัวต้านทาน และเราเรียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรที่ Chua ประดิษฐ์ขึ้นว่า วงจรของ Chua (Chua's Circuit) พร้อมขณะเดียวกัน Matsumoto[6] ผู้ที่ทำการร่วมวิจัยกับ Chua ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณเคออสแบบ 4 มิติ หรือ ไฮเปอร์เคออสขึ้นจริง โดยสร้างขึ้นจากวงจรที่มีลักษณะคล้ายวงจรของ Chua โดยเพิ่มลำดับของสมการอนุพันธ์โดยเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ

การประยุกต์ใช้งานของ เคออสติกแอทแทรกเตอร์ นั้น หลังจาก Pecora [7] ได้แสดงให้เห็นว่าระบบเคออสของ Lorenz และ Rosslor สามารถซิงโครไนซ์ (Synchronization) เข้าด้วยกัน โดยมีภาคส่งเรียกว่า ตัวขับ (drive) และภาครับเรียกว่าตัวตอบสนอง (Response) แล้ว ต่อมา Cuomo [8] ได้นำเอาหลักการดังกล่าวไปใช้ในการประยุกต์การสื่อสารแบบปลอดภัยโดยนำสัญญาณเสียง ทำการบวกเข้า (masking) กับตัวขับซึ่งเป็นระบบ Lorenz และเมื่อสัญญาณนี้ส่งผ่านไปในช่องสัญญาณผู้ดักฟังสัญญาณไม่สามารถฟังได้ ยกเว้นจะมีตัวถอดรหัสหรือภาครับที่สามารถตอบสนองกับสัญญาณเคออสเพื่อจะถอดรหัสออกมาได้ โดยต่อมา Yang [9]ซึ่งเป็นผู้ร่วมวิจัยกับ Chua ได้เสนอการเข้ารหัสลับของสัญญาณ โดยนอกจากจะใช้การซิงโครไนซ์ ของวงจรของ Chua แล้วยังเพิ่มตัวเข้ารหัสลับที่วงจรของ Chua เพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งของระบบ อีกหนึ่งชุด และในขณะเดียวกัน Itoh [10] ได้นำประโยชน์จากคุณสมบัติที่สัญญาณเคออสมีย่านความถี่กว้างไปประยุกต์ใช้กบการสื่อสารแบบกระจายสเปคตรัม และด้วยคุณสมบัติที่คล้ายสัญญาณรบกวน Yalcin [11] ได้ทำการสร้าง การกำเนิดบิตสุ่มจริงจากแอทแทรกเตอร์โดยการนำการเคลื่อนที่ของวงโคจรของแอทแทรกเตอร์ผ่านจุดสมดุลมากำเนิดบิตสุ่ม

หลังจากการค้นพบวงจรของ Chua ซึ่งมีผู้นำไปประยุกต์ใช้งานดังกล่าวมาแล้ว ได้มีผู้สร้างแอทแทรกเตอร์แบบใหม่ๆ โดยอาศัยพื้นฐานจากสมการของ Lorenz โดย Chen [12] ได้ค้นพบแอทแทรกเตอร์แบบใหม่จากการควบคุมระบบ Lorenz ให้ไม่มีเสถียรภาพ หรือการต่อต้านการควบคุม (anti-control) โดยCgiเราเรียกวิธีการนี้ว่า Chaotification ซึ่งแอทแทรกเตอร์ของ Chen มีเทอมตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น 2 เทอมเช่นเดียวกันกับ Lorenz แต่สัมประสิทธิ์ ของสมการต่างจาก Lorenz และในเวลาต่อมา Lu [13] ซึ่งเป็นผู้ร่วมวิจัยกับ Chen ได้เสนอแอทแทรกเตอร์ ที่ปรับพารามิเตอร์ได้เพื่อแสดงลักษณะเหมือนกับ Lorenz และ Chen โดยขณะเวลาเดียวกันได้มีผู้เสนอ[14] การสร้างวงจรสร้างแอทแทรกเตอร์ ปีกผีเสื้อแบบ Lorenz โดยใช้เทคนิคการคูณแบบสวิชท์แทนการคูณแบบเชิงเส้น สำหรับการสร้างแอทแทรกเตอร์แบบง่ายนั้น Sprott[15] ได้เสนอรูปแบบสมการอนุพันธ์ลำดับ 3 รวมกับตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบง่ายๆ ที่สามารถสร้างได้โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสมการของ Sprott ให้กำเนิดรูปแบบแอทแทรกเตอร์ที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อนมาก

สำหรับการสร้าง แอทแทรกเตอร์ที่มีความซับซ้อนเพื่อประยุกต์ใช้ในการเข้ารหัสลับหรือสื่อสารแบบปลอดภัยนั้น Suyken [16]ได้นำเสนอการสร้าง แอทแทรกเตอร์ แบบหลายสกอร์ จากวงจรของ Chua โดยเพิ่มท่อนของความต้านทานลบ เพื่อเพิ่มจุดสมดุลในระบบ และ Tang [17] ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสนอการสร้างวงจรหลายสกอร์จากวงจรของ Chua เช่นเดียวกัน โดยการสร้างวงจรต้านทานลบเป็นค่าฟังก์ชัน sin(x) สำหรับการสร้างวงจรเพื่อกำเนิดแอทแทรกเตอร์แบบ 4 มิตินั้น Li [18] ได้นำเสนอการสร้างไฮเปอร์เคออสติกแอทแทรกเตอร์โดยเพิ่มขนาดลำดับและป้อนกลับสมการของ Lorenz โดย Chen [19] และ Lu [20] ได้ใช้เทคนิคแบบเดียวกันเพื่อสร้างไฮเปอร์เคออสติกแอทแทรกเตอร์จากแอทแทรกเตอร์ของ Lu และแอทแทรกเตอร์ของ Chua แบบหลายสกอร์ตามลำดับ

เคออสแอทแทรกเตอร์ (Chaotic attractor) หรือ แอทแทรกเตอร์แบบประหลาด (strange attractor) เป็นเส้นทางโคจร (trajectory) ที่มีขอบเขตอยู่ใน space ขนาด 3 มิติ โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ [4]

1. ถ้าให้ $A$ เป็นขนาดขอบเขตใน 3 มิติแล้ว ทุกๆ เส้นทางโคจรใน $A$ จะอยู่ใน $A$ ตลอดไป และถ้าค่าเริ่มต้นนอกขอบเขตของ $A$ แล้วในเวลาต่อมาเส้นทางโคจรจะต้องอยู่ใน $A$ เราเรียกคุณสมบัติแบบนี้ว่าคุณสมบัติดึงดูด (attractor) หรือเรียกว่าแอทแทรกเตอร์ถ้า $A \subset R^n$ และ $U$ เป็นค่าใกล้เคียง นอกบริเวณ $A$ แล้ว $x$ จะเป็นเส้นทางโคจรของแอทแทรกเตอร์

$$\begin{aligned} &\forall x \in U : \varphi(x,t) \in U \qquad for \quad t \geq 0 \\ &\lim_{t \to 0} \ \varphi(x,t) = A \end{aligned} \tag{2.1}$$

2. เคออสติกแอทแทรกเตอร์ มีความไวขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้น (Sensitive dependence on the initial conditions) ถ้าให้ $x$ เป็นเส้นทางโคจรของแอทแทรกเตอร์และ $s$ เป็นเซ็ทที่แสดงว่าไวต่อค่าเริ่มต้นแล้ว

$$\begin{aligned} &\exists \delta > 0 \ \ \forall x(0) \Leftarrow s, \ \ \varepsilon > 0, \ \ \exists y \in s : \\ &|x(0) - y(0)| < \varepsilon, \ \ |x(t) - y(t)| > \delta \end{aligned} \tag{2.2}$$

3. เคออสติกแอทแทรกเตอร์ไม่สามารถแยกเป็นเซ็ทย่อยได้ (Indecomposebility) แม้แต่ให้ attractor ห่างกันเล็กน้อยดังนั้น attractor มีรายคาบยาวมากๆ

สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญที่แสดงว่าแอทแทรกเตอร์เป็นเคออส คือคุณสมบัติที่ไวต่อค่าเริ่มต้น ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นให้ต่างกันเพียงเล็กน้อย เส้นทางโคจรก็จะให้ลักษณะที่ต่างกันโดยสิ้นเชิงนั้น เราสามารถวัดค่าความไวนี้ได้โดย Lyapunov exponents ซึ่งแสดงเส้นทางโคจรของ $x$ เมื่อ เวลา $t$ ได้คือ

$$|x(t)| = |x(0)|e^{\lambda} \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\lambda$ เป็นค่า Lyapunov เนื่องจากเคออสติกแอทแทรกเตอร์เกิดขึ้นในมิติขนาด 3 มิติ ดังนั้นเงื่อนไขที่แสดงความไวต่อค่าเริ่มต้น ของสมการที่ (2.2) ค่า Lyapunov ของทิศทางของการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ (x,y,z) จะต้องมี ค่าเป็น บวก 1 ค่าเพื่อแสดงทิศทางการแยกจากกัน(stretch) ของเส้นโคจรของแอทแทรกเตอร์ และเพื่อให้แอทแทรกเตอร์อยู่ในขอบเขตจะต้องมีค่า Lyapunov เป็นลบหนึ่งค่าเพื่อแสดงการพับเข้า(fold) และมีค่า Lyapunov เป็น 0 อยู่หนึ่งค่าเพื่อแสดงทิศทางของการไหลของแอทแทรกเตอร์ หรือกล่าวได้ว่า ค่า ถ้าแอทแทรกเตอร์เกิดขึ้นใน 3 มิติและเป็นเคออสแล้ว ถ้า $\lambda_1$ เป็น Lyapunov ที่มากที่สุด และ $\lambda_3$ เป็นค่า Lyapunov ที่น้อยที่สุดแล้วค่า Lyapunov ของระบบจะแสดงค่า $\lambda_1 > \lambda_2 = 0 > \lambda_3$ ซึ่งมีค่า (+,0,–) โดยในระบบที่มีขอบเขตค่า $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 < 0$ และในระบบ 4 มิติ ค่า Lyapunov ของระบบจะแสดงค่า $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 = 0 > \lambda_4$ หรือมีค่า Lyapunov ที่เป็นบวกสองค่า (+,+,0,–)

**5.1 แอทแทรกเตอร์แบบ Lorenz**

เป็นเคออสแอทแทรกเตอร์แรกที่รู้จักกันที่ค้นพบโดย E.N. Lorenz [1] จากการสร้างแบบจำลองพยากรณ์อุตุนิยมวิทยาของการแปรผันของสภาวะอากาศ โดยแบบจำลองแสดงได้โดยสมการอนุพันธ์ลำดับ 3 คือ

$$x' = -ax + ay \qquad (2.4.1)$$

$$y' = rx - y - xz \qquad (2.4.2)$$

$$z' = -bz + xy \quad . \qquad (2.4.3)$$

จากสมการเป็นการแสดงการไหลของอากาศจากการนำความร้อน โดยอากาศร้อนจะไหลขึ้นที่สูงและอากาศเย็นจะตกสู่ระดับล่างเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก โดยการเคลื่อนที่ในลักษณะวงแหวน ตัวแปร $x$ ขึ้นอยู่กับการนำความร้อน และตัวแปร $y$ และ $z$ จะเป็นการวัดการกระจายของความร้อนรอบๆ วงแหวนในงานวิจัย Lorenz ได้ให้ $a$=10 , $b$ = 8/3 และค่า $r$ กำหนดให้เป็นพารามิเตอร์ควบคุมโดยปรับให้มีขนาดต่างๆ

จากสมการ (4) หาจุดสมดุลของระบบโดย $x' = y' = z' = 0$ จะได้ $y = x, z = r - 1$ และ $x^2 = y^2 = b(r-1)$ ดังนั้นระบบจะมีจุดสมดุลอยู่ 3 จุดคือที่ $P^{\circ} = (0,0,0)$ และ $P^{\pm} = (\pm\sqrt{b(r-1)}, \pm\sqrt{b(r-1)}, r-1)$ โดยจุดสมดุลที่ $P^{+}$ และ $P^{-}$ จะเกิดขึ้นเมื่อค่า $r > 1$ จากสมการที่ (4) เพื่อหาคุณสมบัติของระบบ ทำการหาค่า Jacobian matrix ซึ่งแสดงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial fx}{\partial x} & \frac{\partial fx}{\partial y} & \frac{\partial fx}{\partial z} \\ \frac{\partial fy}{\partial x} & \frac{\partial fy}{\partial y} & \frac{\partial fy}{\partial z} \\ \frac{\partial fz}{\partial x} & \frac{\partial fz}{\partial y} & \frac{\partial fz}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

โดยค่า Jacobian matrix ของสมการที่ (2.4) มีค่า

$$J = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ r-z & -1 & -x \\ y & x & -b \end{bmatrix}. \tag{2.6}$$

สมการคุณสมบัติของระบบหาได้จาก $|J - \lambda I|$ โดยที่จุดสมดุล $P^{\circ}$ มีสมการคุณสมบัติคือ

$$\lambda^3 + (a+b+1)\lambda^2 + (a - ar + ab + b)\lambda + ab(1-r) \tag{2.7}$$

และที่จุดสมดุล $P^{\pm}$ มีสมการคุณสมบัติคือ

$$\lambda^3 + (a+b+1)\lambda^2 + b(a+r)\lambda + 2ab(r-1) \tag{2.8}$$

ค่า eigen ซึ่งเป็นค่าแสดงพฤติกรรมของระบบหาได้จากให้ $|J - \lambda I| = 0$ ดังนั้นที่จุดสมดุล $P^{\circ}$ ในกรณี $r < 1$ ค่า eigen ทั้งหมด 3 ค่าจะเป็นค่าจริงและเป็นลบหรืออยู่ด้านซ้ายของระนาบ S (S Plane) และถ้าหาก $r > 1$ แล้วระบบจะมีค่า eigen 1 ค่าเป็นค่าจริงบวกอยู่ด้านขวาของระนาบ S โดยถ้าหากให้ index $n$ แสดงจำนวนค่ารากอยู่ด้านขวาของระนาบ S แล้ว เมื่อ $r > 1$ ระบบจะมีค่า index = 1 และที่จุดนี้เส้นทางโคจรจะมีทั้งเคลื่อนที่เข้าและออก ( Saddle point index 1) สำหรับที่จุดสมดุล $P^{\pm}$ จะเกิดขึ้นเมื่อ $r > 1$ ดังนั้น ถ้าให้ $a_1 = (a+b+1)$ , $a_2 = (a+r)b$ , $a_3 = 2ab(r-1)$ แล้วจากเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz ระบบจะมีเสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขเมื่อ $a_1 > 0$ , $a_2 > 0$ , $a_3 > 0$ หรือ $a_1 a_2 - a_3 > 0$ ซึ่งเขียนได้

$$(a+b+1)(a+r)b - 2ab(r-1) > 0 \tag{2.9}$$

ดังนั้นที่จุดสมดุล $P^{\pm}$ ระบบจะมีเสถียรภาพถ้า

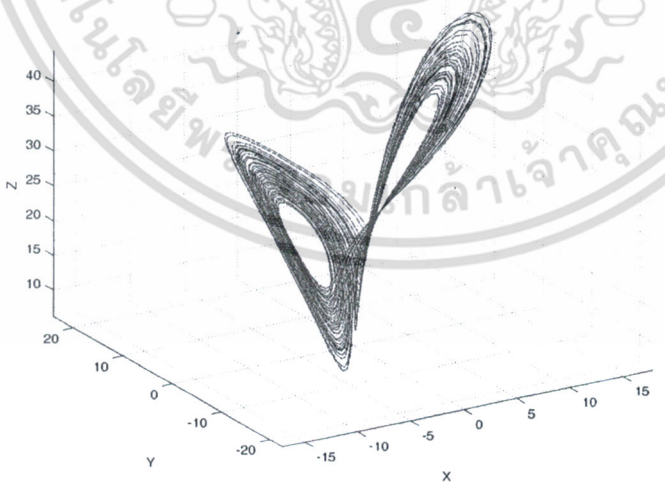
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r < \frac{a(a+b+3)}{a-b-1} \tag{2.10}$$

และในทางตรงกันข้ามถ้าให้ $a=10$ , $b=8/3$ และถ้าให้ $r > \frac{470}{19}$ ซึ่งทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพที่จุดสมดุล $P^{\pm}$ จะมีค่ารากเป็นบวก 1 ค่าอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ S และมีรากเป็น $\sigma \pm jw$ 1 คู่อยู่ด้านขวามือของระนาบ S ซึ่งที่จุดสมดุล $P^{\pm}$ นี้ เส้นโคจรจะแสดงการไหลเข้าและหมุนออกหรือเรียกว่า eigen มีลักษณะเป็น Spiral saddle index 2 ดังนั้นจากจุดสมดุลถ้าที่ $P^{\circ}$ แทนการไหลเข้าและไหลออกและที่จุด $P^{\pm}$ แทนการไหลเข้าและหมุนออกแล้ว หลังจากค่าเริ่มต้นเส้นทางโคจรไม่สามารถออกจากแอทแทรกเตอร์ได้ ดังนั้นเมื่อแอทแทรกเตอร์ไหลออกจากจุดสมดุล $P^{\circ}$ แล้วจะไหลเข้าสู่สมดุล $P^{+}$ หรือ $P^{-}$ และที่สองจุดนี้จะแทนจุดหมุนออกซึ่งอาจจะหมุนรอบจุดสมดุลนี้หรือไหลกลับเข้าสู่จุดสมดุล $P^{\circ}$ ซึ่งพฤติกรรมนี้จะเกิดการไหลวนในลักษณะหลากหลายหรือแสดงสภาวะเคออส (Chaotic attractor) และเพื่อแสดงว่าระบบ Lorenz เป็นระบบที่มีขอบเขตค่า divergence ของการไหลของแอทแทรกเตอร์ต้องอยู่ในเงื่อนไข

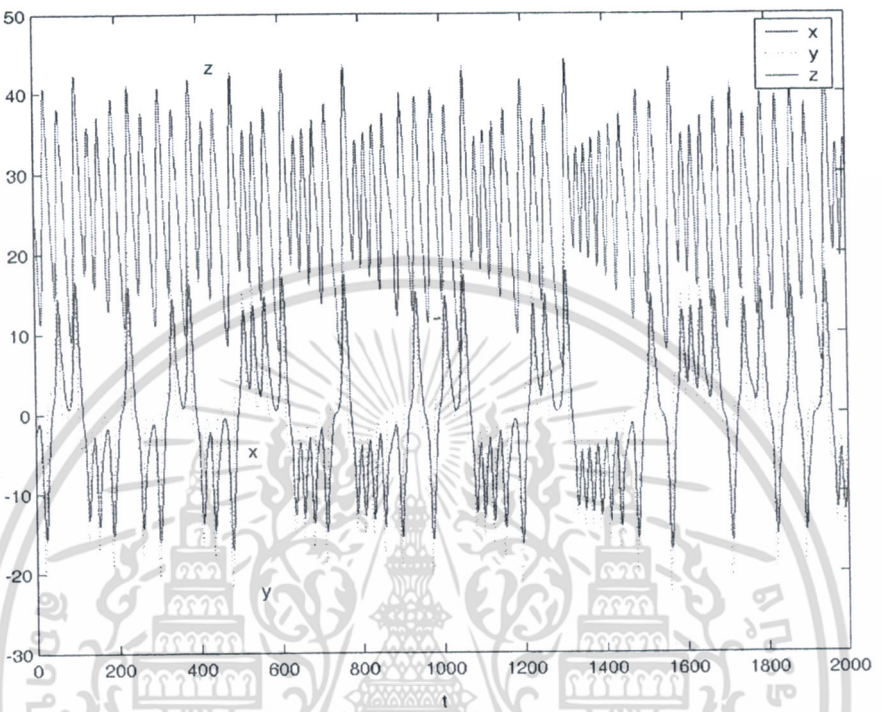
$$\nabla F = \frac{\partial Fx}{\partial x} + \frac{\partial Fy}{\partial y} + \frac{\partial Fz}{\partial z} < 0 \tag{2.11}$$

และสำหรับค่า Lyapunov ของระบบหาได้จาก [28] ซึ่งระบบ Lorenz มีค่า $\lambda_1 = 0.9, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -14.57$




รูปที่ 2.1 แอทแทรกเตอร์แบบ Lorenz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.2 แอทแทรกเตอร์แบบ Lorenz ในแกนเวลา

**5.2 แอทเทรกเตอร์ของ Chen**

เป็นเคออสติกแอทแทรกเตอร์ค้นพบโดย Chen [12] โดยเกิดจากการควบคุมระบบ Lorenz ให้ไปในทิศทางที่ขาดเสถียรภาพยิ่งขึ้นหรือ ทำให้ระบบที่เป็นเคออสอยู่แล้วให้เป็นเคออสมากขึ้น ซึ่งโดยกระทำด้วยการให้ค่าควบคุมเข้าที่ $y'$ ของระบบ Lorenz หรือแสดงได้

$$x' = -ax + ay \qquad (2.12.1)$$

$$y' = cx - y - xz + u \qquad (2.12.2)$$

$$z' = -bz + xy \quad . \qquad (2.12.3)$$

โดยค่าควบคุมมีค่า $u = k_1 x + k_2 y + k_3 z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.12) เราสามารถหาจุดสมดุลของระบบโดยให้ $x' = y' = z' = 0$ แล้วจะได้จุดสมดุลจุดแรกคือที่ $P^{\circ} = (0,0,0)$ และเมื่อให้ $x = y$ จะได้ $z = \frac{1}{b}x^2$ ดังนั้นระบบจะมีจุดสมดุลอีก 2 จุดที่ $P^{\pm}$ คือ $x = y = \frac{1}{2}k_3 \pm \frac{1}{2}\sqrt{k^3 + 4(b + k_1 + k_2 - 11)}$ , $z = \frac{1}{b}x^2$ จากสมการ(2.12) หาค่า Jacobian matrix ของระบบได้คือ

$$J = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c + k_1 - z & k_2 - 1 & k_3 - x \\ y & x & -b \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

โดยที่จุดสมดุล (0,0,0) ค่า $k_3$ ไม่มีผลต่อการเกิดค่า eigen เลือกให้ $k_3 = 0$ ดังนั้นค่าสมการคุณสมบัติที่จุดสมดุล $P^{\pm}$ มีค่า

$$\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 \tag{2.14}$$

โดย $a_1 = (a + b - k_2 + 1)$, $a2 = (ab - ac + a + b + az + x^2 - k_1 a - k_2 a - k_2 b)$ และ $a3 = (ab - abc + ax^2 + axy + abz - k_1 ab - k_2 ab)$ จากเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz เพื่อให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ ระบบ Chen เลือกให้ $k_1 = a$ $k_2 = 1 + c$ ดังนั้นได้ค่าตัวควบคุมใหม่คือ $u = -ax + (1 + c)y$ ทำให้สมการของระบบ Chen แสดงได้

$$x' = -ax + ay \tag{2.15.1}$$

$$y' = (c - a)x - ay - xz \tag{2.15.2}$$

$$z' = -bz + xy \tag{2.15.3}$$

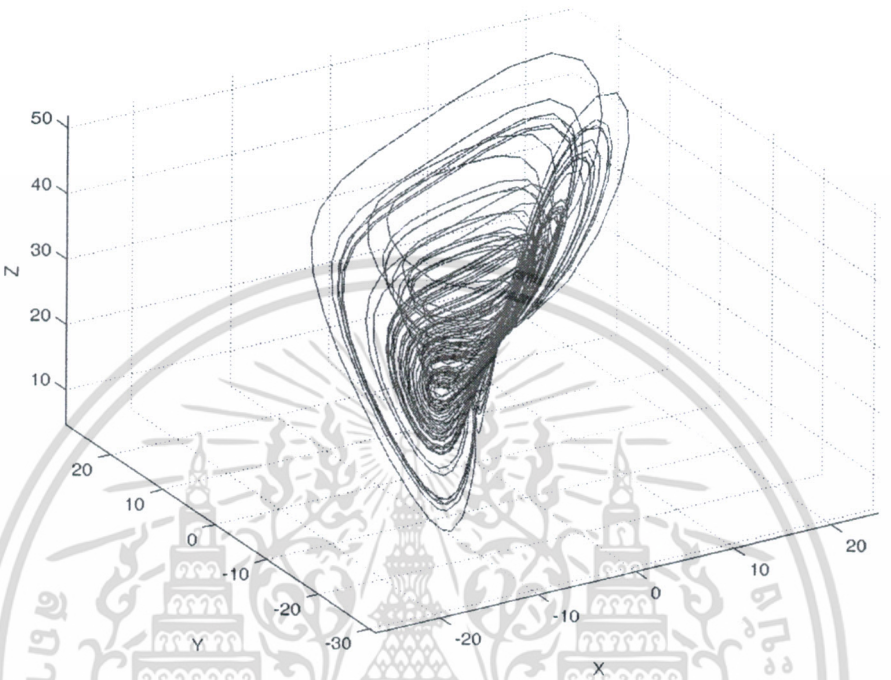
จากสมการเพื่อให้ระบบเป็นระบบ dissipative

$$\nabla F = \frac{\partial Fx}{\partial x} + \frac{\partial Fy}{\partial y} + \frac{\partial F}{\partial z} = -a + c - b < 0 \tag{2.16}$$

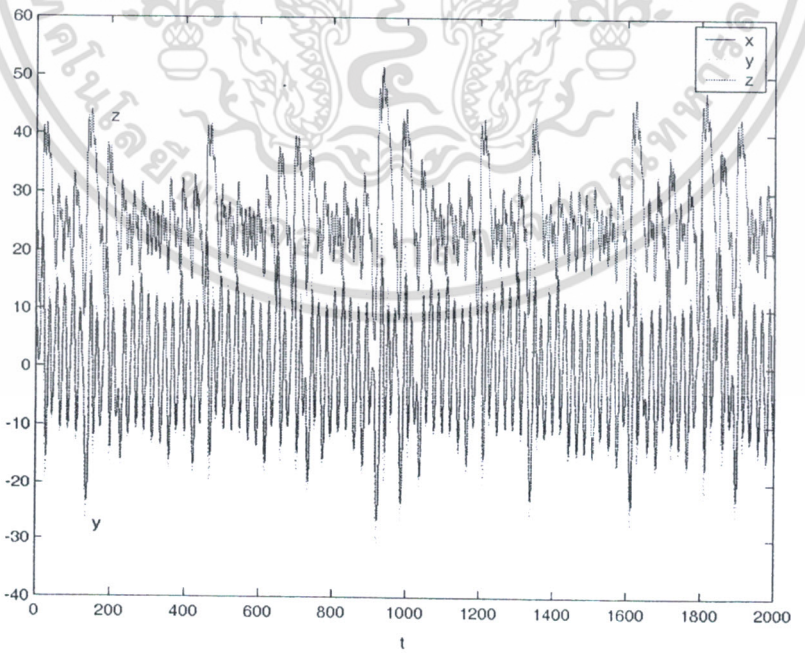
ระบบ Chen เลือกให้ $a = 35, b = 8/3, c = 28$ ซึ่งเป็นที่อยู่สมดุล $P^{\circ}$ จะมีค่า eigen เป็น saddle index 1 และที่จุดสมดุล $P^{\pm}$ มีค่า eigen เป็น spiral saddle index 2 และระบบมีค่า $\lambda_1 = 2.18, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -11.85$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ Chen เลือกให้ $a = 35, b = 8/3, c = 28$ ซึ่งเป็นที่อยู่สมดุล $P^{\circ}$ จะมีค่า eigen เป็น saddle index 1 และที่จุดสมดุล $P^{\pm}$ มีค่า eigen เป็น spiral saddle index 2 และระบบมีค่า $\lambda_1 = 2.18, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -11.85$




รูปที่ 2.1 แอทแทรกเตอร์แบบ Chen




รูปที่ 2.2 แอทแทรกเตอร์แบบ Chen ในแกนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

# ชุดทดลองสัญญาณอลวนสำหรับการซิงโครไนซ์

ในบทนี้แสดงการออกแบบสร้างสัญญาณอลวนที่สามารถทดลองการซิงโครไนซ์โดยการสร้างแอทแทรกเตอร์ที่ส่มารถปรับค่าได้ระหว่าง Lorenz และ Chen ขึ้นมาด้วยกันจากนั้นทดลองทำการชิงโครไนซ์เข้าด้วยกันเพื่อแสดงประโยนช์ในการสื่อสารแบบเข้ารหัสลับ

## 3.1 การสร้างเคออสติกแอทแทรกเตอร์แบบที่แสดงพฤติกรรมได้ทั้งรูปแบบ Lorenz และ Chen

จากแอทแทรกเตอร์ของ Lorenz เมื่อสังเกตค่า $x, y$ แล้วมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นในบทวิจัยนี้จึงเสนอรูปแบบแอทแทรกเตอร์ใหม่โดยประมาณ $xy \approx |x|$ และตัดเทอม $y$ ออกจากสมการ $y'$ ซึ่งแสดงระบบใหม่ได้

$$x' = -ax + ay \qquad (3.1.1)$$

$$y' = rx - kxz \qquad (3.1.2)$$

$$z' = -bz + k|x| \qquad (3.1.3)$$

โดยค่า $k$ เป็นค่าคงที่เพื่อใช้ scale ขนาดของแอทแทรกเตอร์ จากสมการ (16) ระบบมีจุดสมดุลที่ $P^{\circ} = (0,0,0)$ , $P^{\pm} = (\pm\frac{br}{k^2}, \pm\frac{br}{k^2}, \frac{r}{k})$ และค่า Jacobian matrix ของสมการ (3.1) แสดงได้

$$J = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ -kz + r & 0 & -kx \\ k\,\mathrm{sgn}(x) & 0 & -b \end{bmatrix}$$

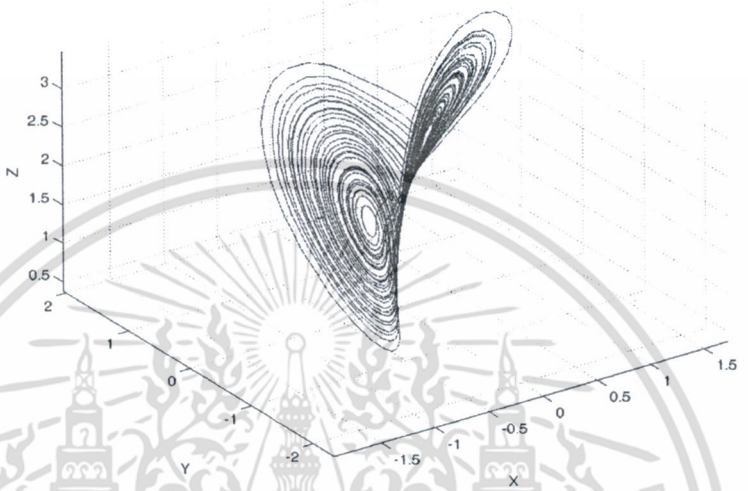
ซึ่งค่าของสมการคุณลักษณะหาได้จาก $|J - \lambda I|$ มีค่า

$$\lambda^3 + (a+b)\lambda^2 + (ab - ar + kaz) + k^2 a|x| - k^2 a|x| - arb + kabz \qquad (3.2)$$

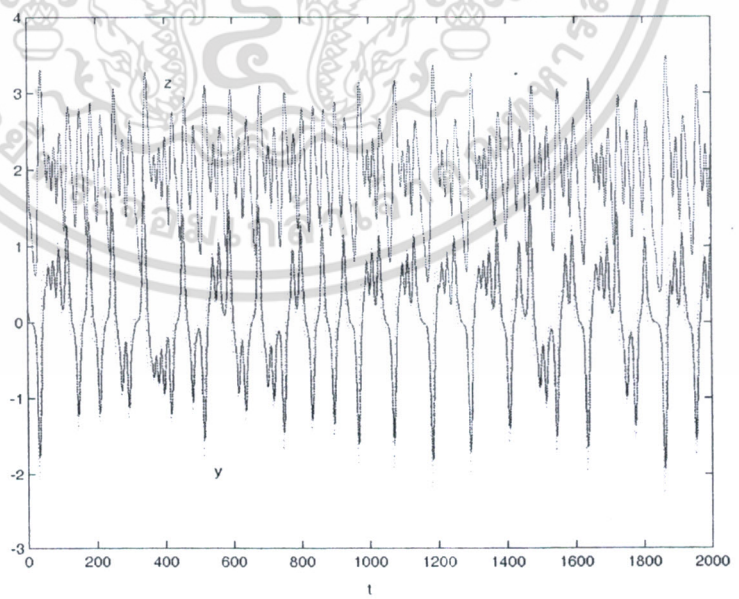
จากเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz เลือกให้ที่จุดสมดุล $P^{\circ}$ เป็น saddle point index 1 และให้จุดสมดุล $P^{\pm}$ เป็น spiral index 2 และทำการหาค่า Lyapunov เพื่อให้ $\lambda_1 = +, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -$ แล้ว ที่พารามิเตอร์ $a = 10$ , $r = 20$ , $b = 3$ และ $k = 10$ ระบบจะแสดงลักษณะแอทแทรกเตอร์เป็น Lorenz และโดยมีค่า Lyapunov ของระบบเท่ากับ $\lambda_1 = 0.704, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -13.7$ และที่พารามิเตอร์ขนาดเดียวกันแต่ปรับค่า $r = 50$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบแสดงลักษณะแอทแทรกเตอร์แบบ Chen โดยมีค่า Lyapunov เท่ากับ $\lambda_1 = 1.84, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -14.83$

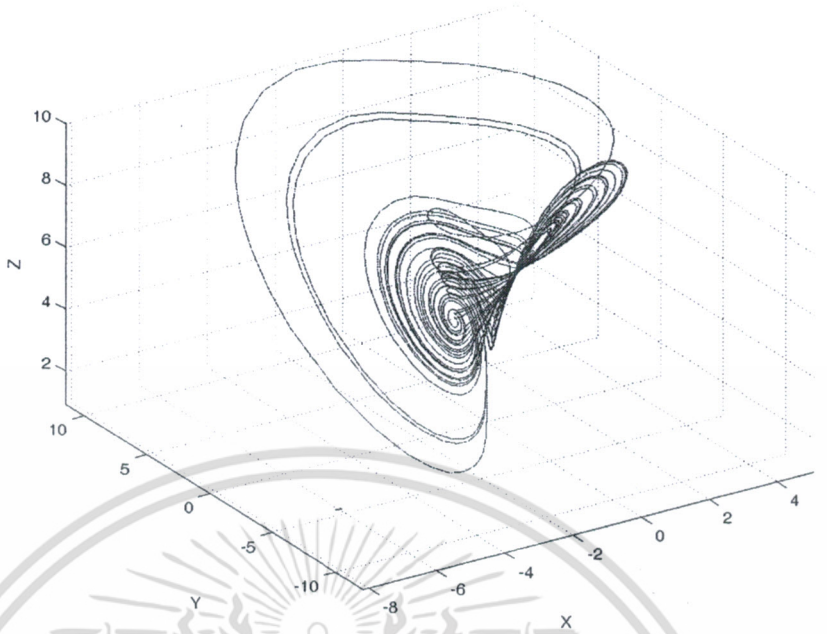



รูปที่ 3.1 แอทแทรกเตอร์แบบปรับได้โดยปรับเป็น Lorenz

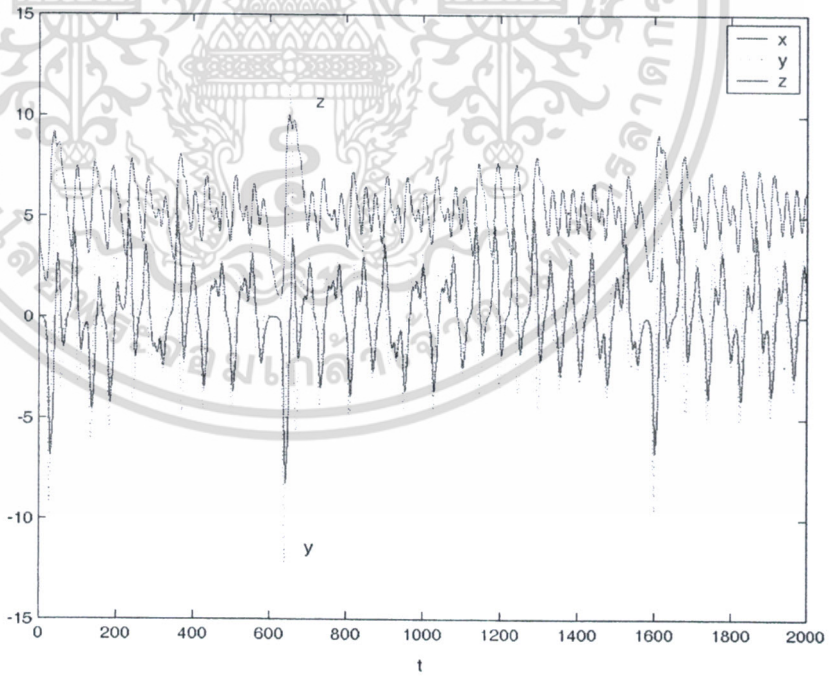



รูปที่ 3.2 แอทแทรกเตอร์แบบปรับได้โดยปรับเป็นLorenz ในแกนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 3.3 แอทแทรกเตอร์แบบปรับได้โดยปรับเป็น Chen

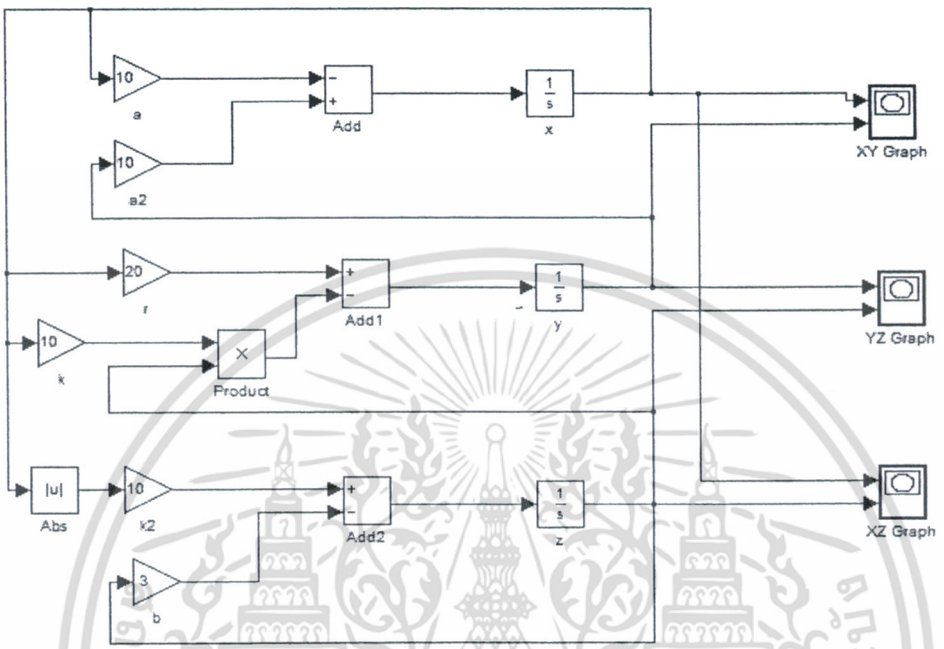



รูปที่ 3.4 แอทแทรกเตอร์แบบปรับได้โดยปรับเป็น Chen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมอลวนโดยใช้โปรแกรม Matlab

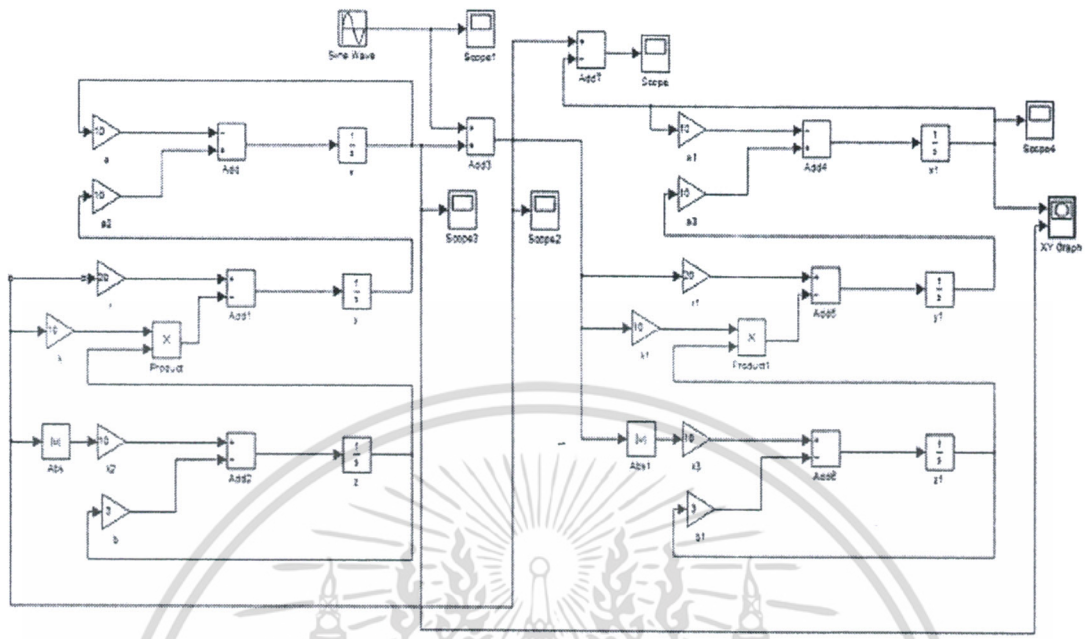
เพื่อการเรียนรู้ในโมดูลนี้การเริ่มต้นการทดลองกระทำโดยการเริ่มต้นที่การออกแบบจากมการที่ 3.1 โดยโปรแกรม Simulink แสดงได้ดังรูป



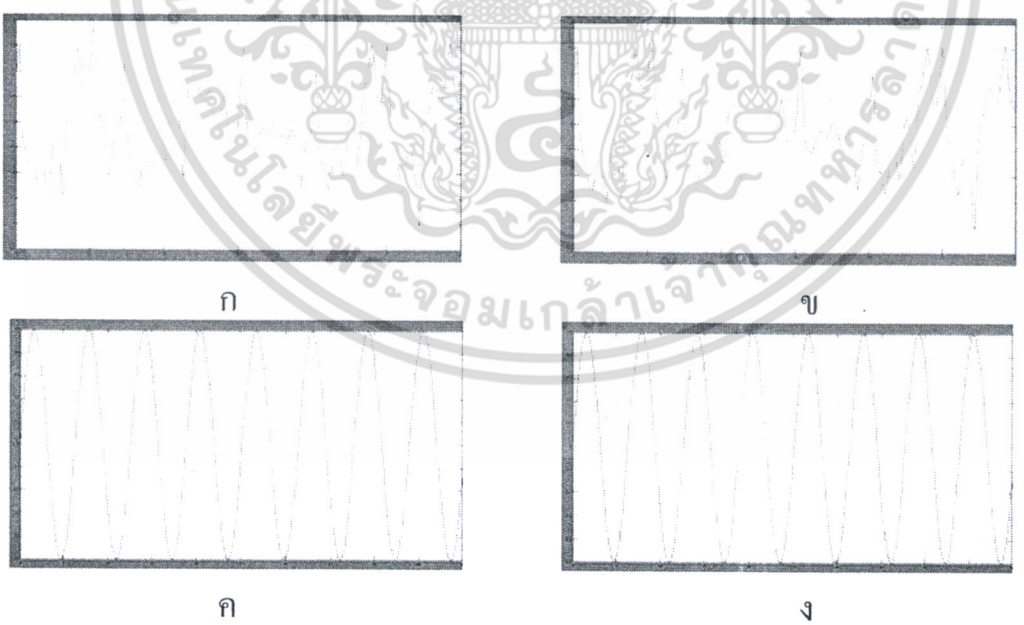

รูปที่ 3.5 แบบจำลองการสร้างสัญญาณเคออสของสมการ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองซิงโครไนซ์โดยการขับสัญญาณเข้าที่ x,z




รูปที่ 3.6 แบบจำลองการสร้างวงจรทั้งภาคส่งและภาครับ

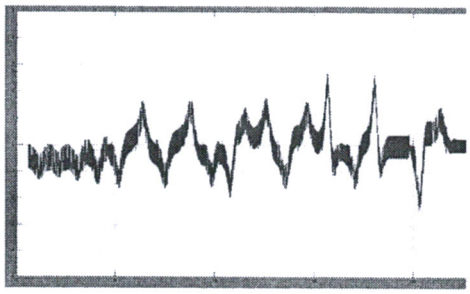


ก ข

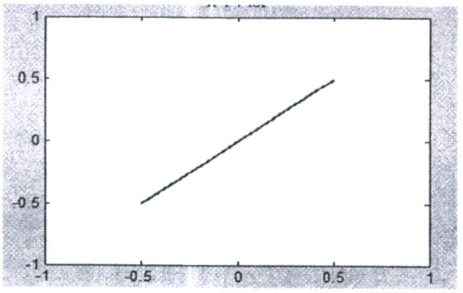
ค ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จ



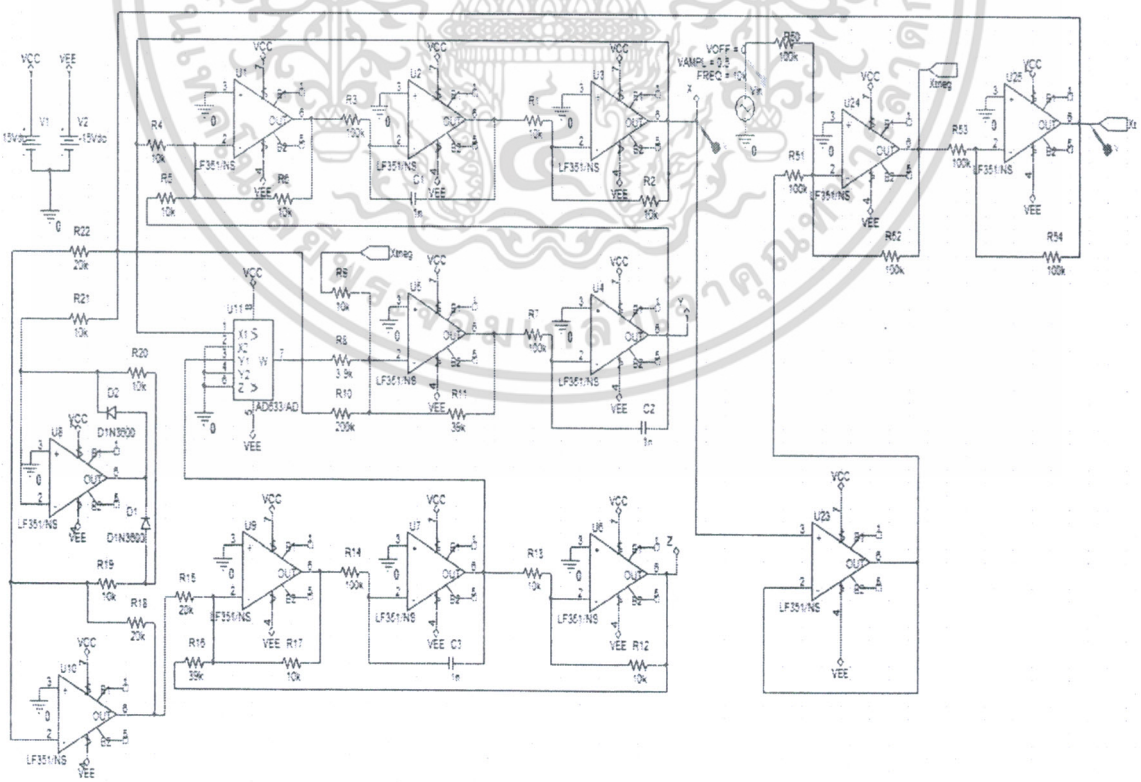

ฉ

รูปที่ 3.7 ผลการจำลอง

ก. กราฟที่ได้จากการวัดค่า $x$ ข. กราฟที่ได้จากการวัดค่า $x_r$ ค. กราฟสัญญาณข้อมูลที่รับเข้า $i(t)$ ง. กราฟสัญญาณข้อมูลที่รับเข้า $i_r(t)$ จ. กราฟสัญญาณข้อมูลที่มอดูเลชั่นกับสัญญาณเคออติค ฉ. กราฟการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณเข้า $i(t)$ กับสัญญาณออก $i_r(t)$

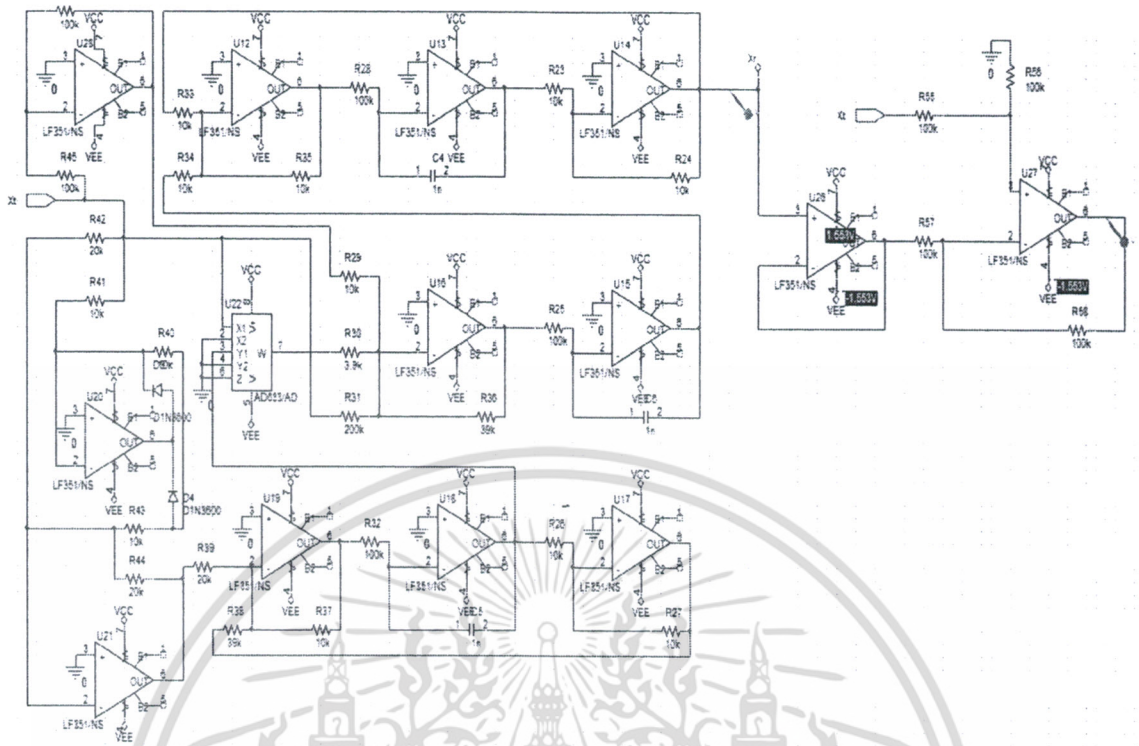
**3.3 ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมอลวนโดยใช้โปรแกรม Pspice**

จากรูป 3.6 แสดงการการวงจรได้

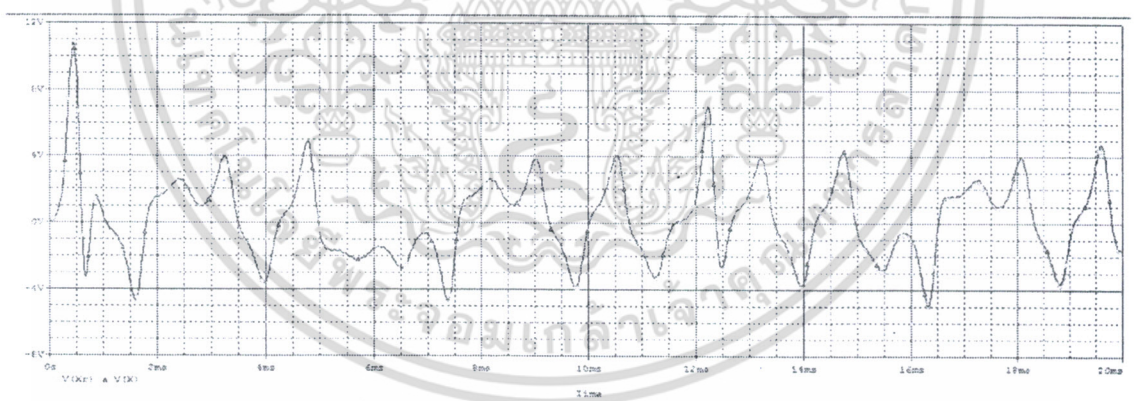



รูปที่ 3.8 การจำลองวงจรภาคส่ง โดยใช้โปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
121171

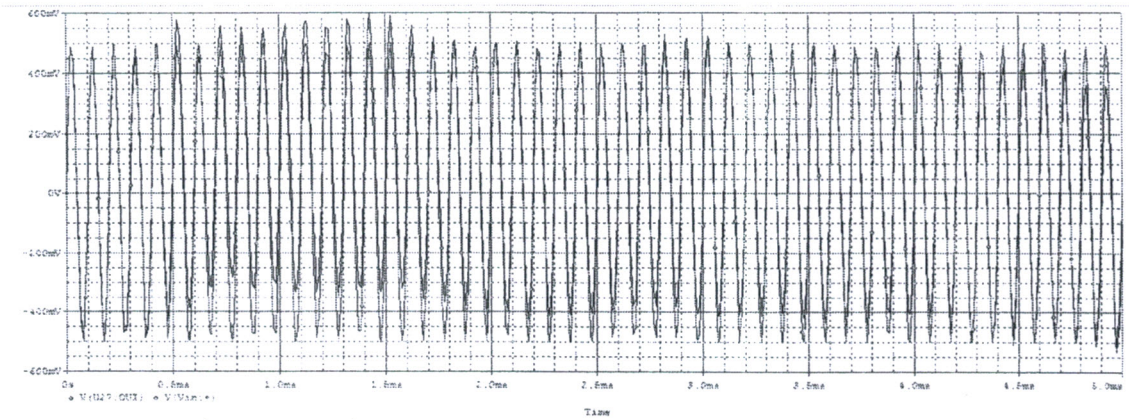


รูปที่ 3.9 การจำลองวงจรภาครับ โดยใช้โปรแกรม Pspice

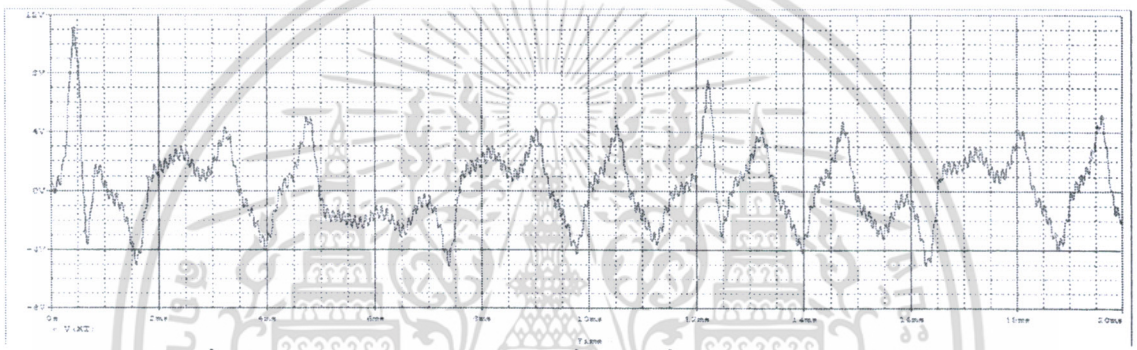


รูปที่ 3.10 กราฟที่ได้จากการวัดค่า $x$ กับ $x_r$

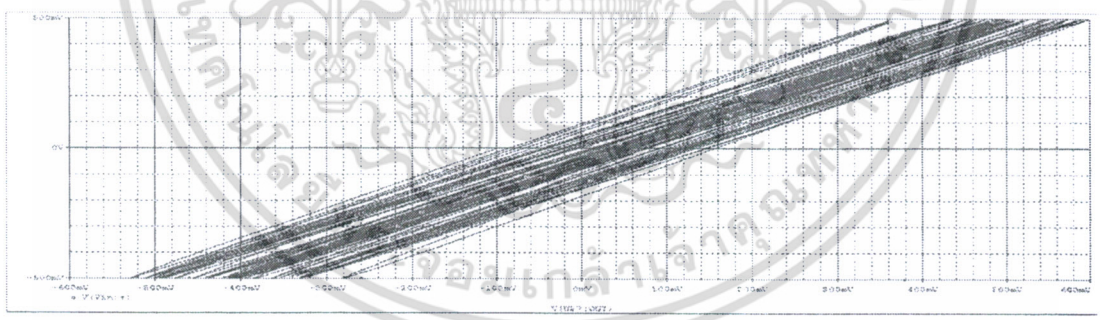
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 กราฟที่ได้จากการวัดค่า $i(t)$ กับ $i_r(t)$ ขนาดแอมพลิจูด 0.5 V



รูปที่ 3.12 กราฟสัญญาณข้อมูล i(t) ที่มอดูเลชั่นกับสัญญาณเคออติค x



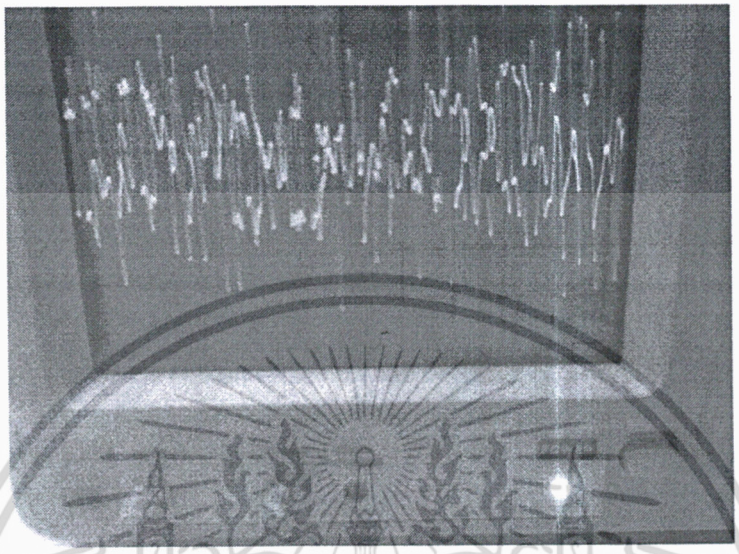
รูปที่ 3.13 กราฟการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณเข้า $i(t)$ กับสัญญาณออก $i_r(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

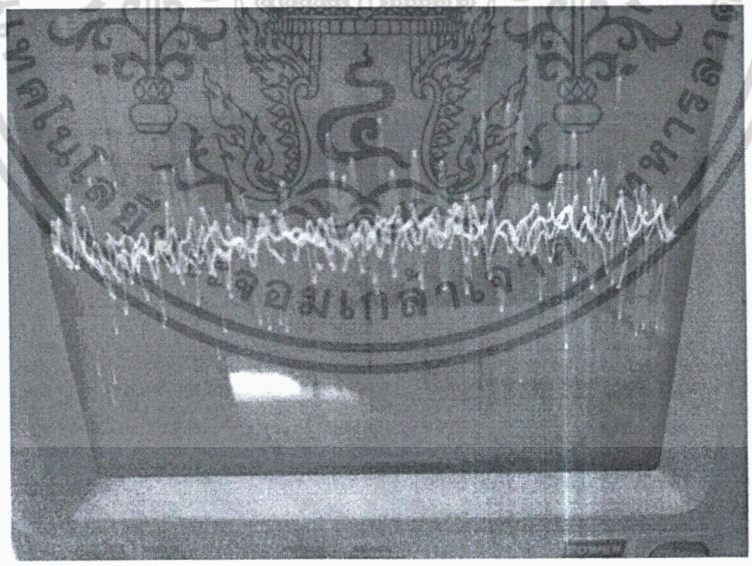
**3.4 ผลที่ได้จากการทดลอง**

**วงจรภาคส่ง**

ใช้ออสซิลโลสโคปวัดค่า V-Output จาก OP-AMP ทั้งสเตท *x,y,z*

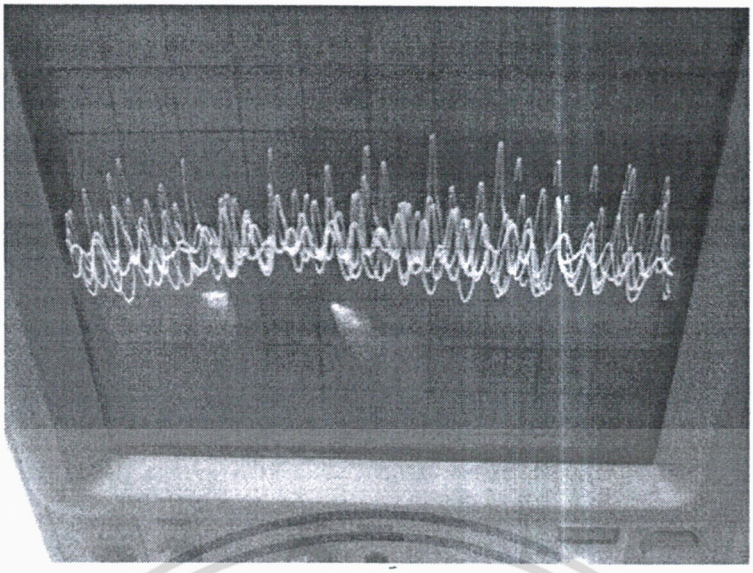


รูปที่ 3.14 กราฟค่า x ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.15 กราฟค่า *y* ที่ได้จากออสซิลโลสโคป

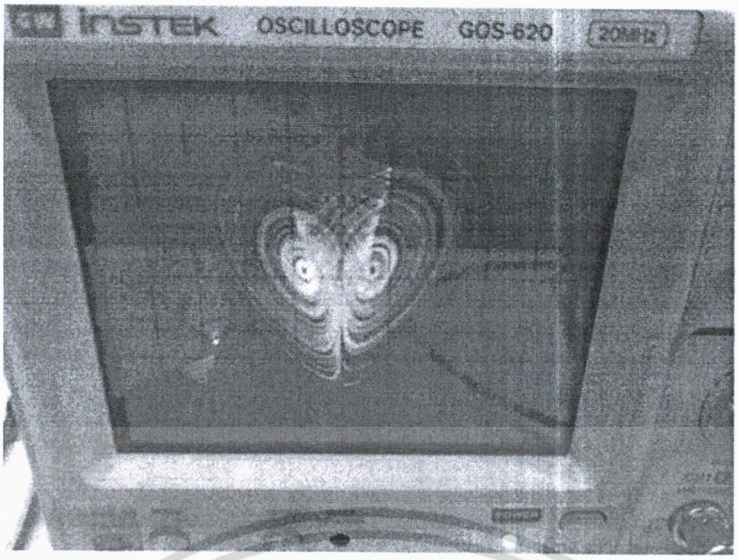
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 กราฟค่า $z$ ที่ได้จากออสซิลโลสโคป

รูปที่ 3.17 กราฟค่า $x$-$y$ ที่ได้จากออสซิลโลสโคป

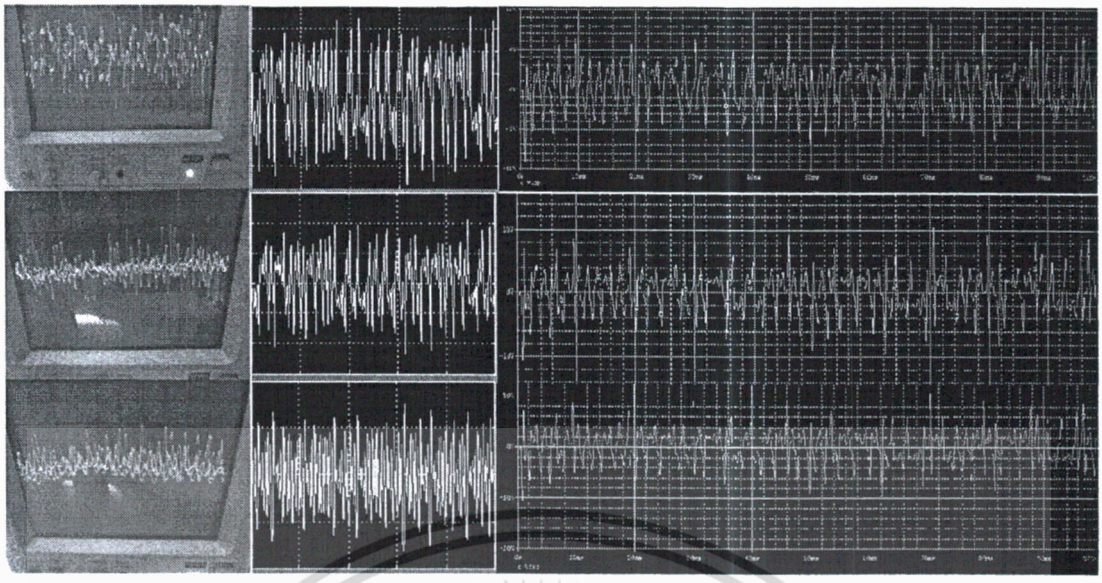
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 3.18 กราฟค่า $x$-$z$ ที่ได้จากออสซิลโลสโคป

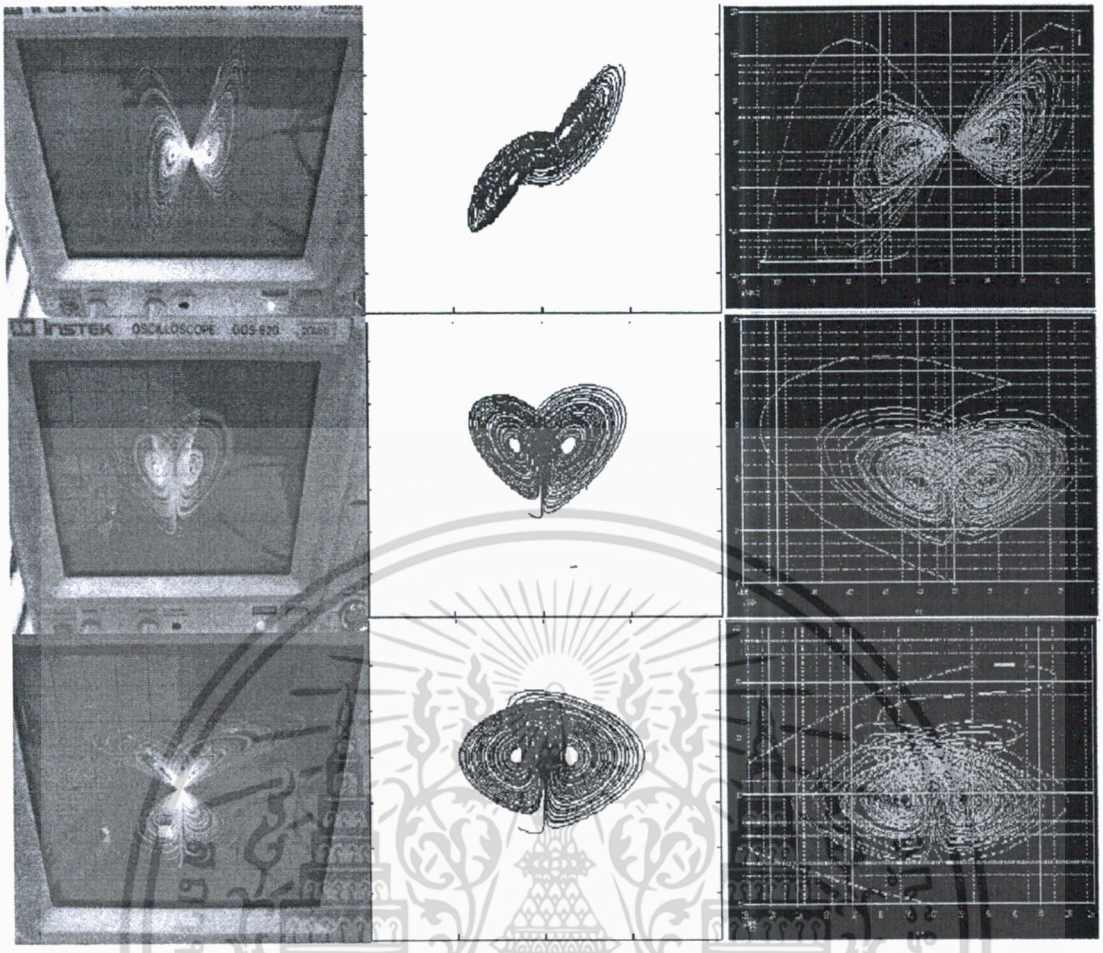
รูปที่ 3.19 กราฟค่า $y$-$z$ ที่ได้จากออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 แสดงการเปรียบเทียบค่า $x$, $y$, $z$ จากผลที่ได้รับกับโปรแกรม MATLAB และ PSPICE

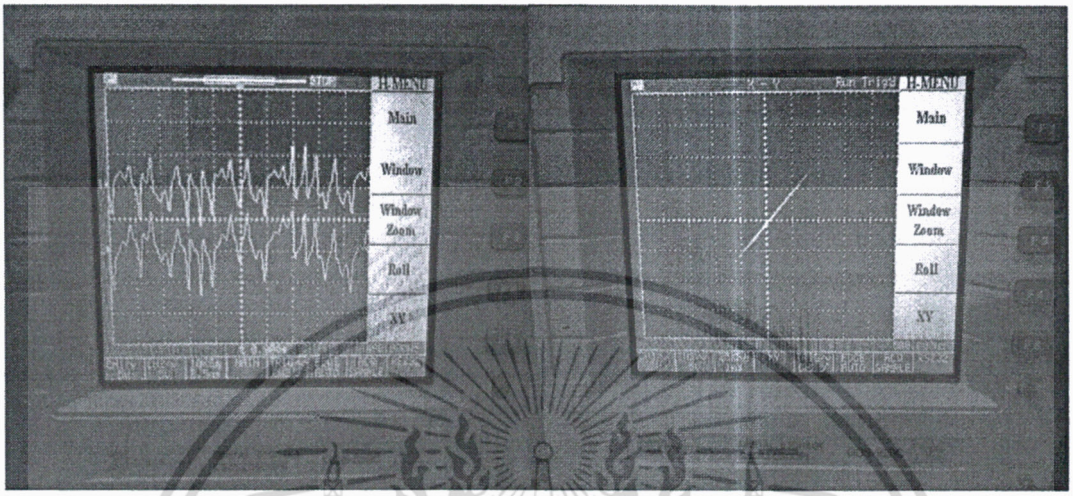
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



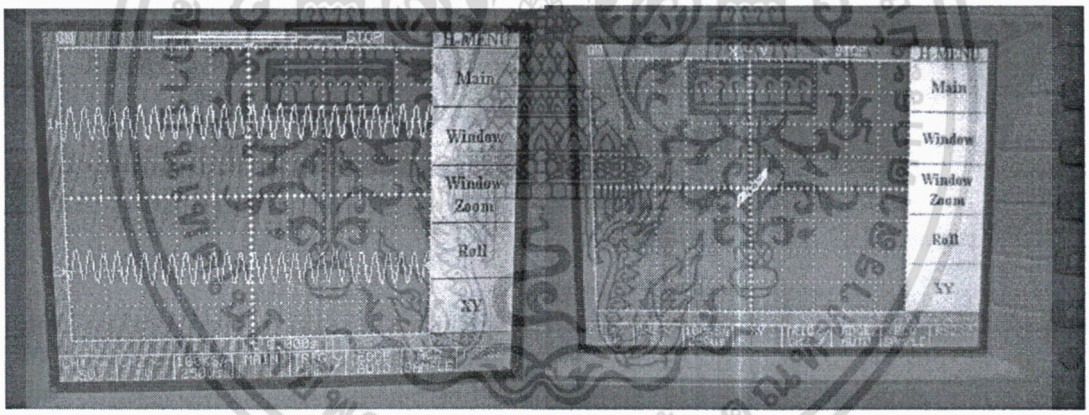

รูปที่ 3.21 แสดงการเปรียบเทียบค่า *x-y, x-z, y-z* จากผลที่ได้รับกับโปรแกรม MATLAB และ PSPICE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.2 วงจรที่ทำการซิงโคไนซ์แล้ว

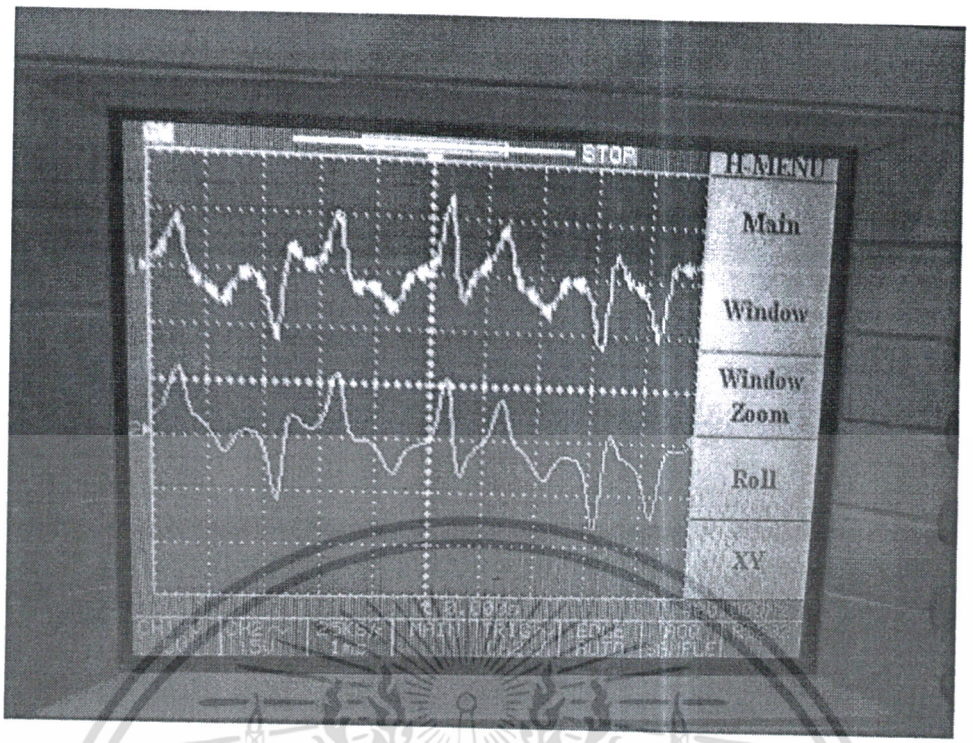



รูปที่ 3.22 แสดงการเปรียบเทียบค่า $x$ ,$xr$ จากผลการทดลองจริง

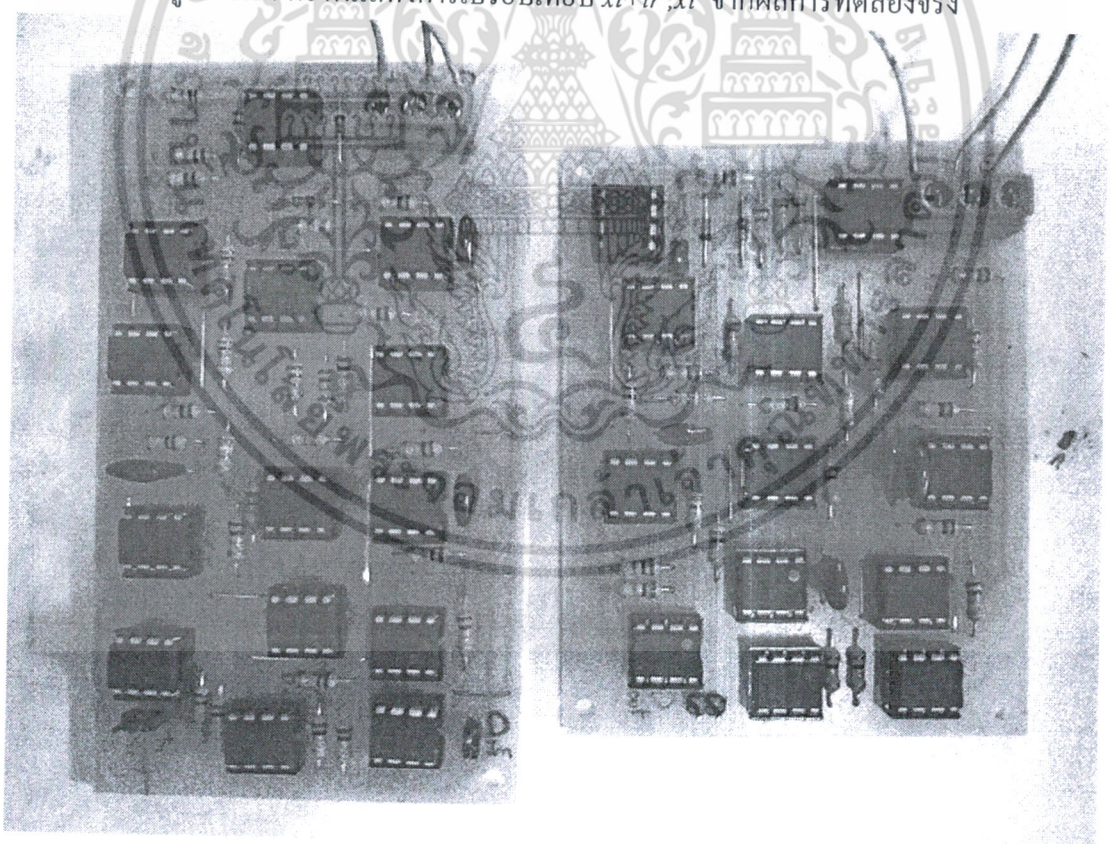



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ $i$ ,$ir$ จากผลการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 3.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ $xt+ir$ ,$xt$ จากผลการทดลองจริง



รูปที่ 3.25 วงจรต้นแบบที่สำเร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# ชุดทดลองสัญญาณอลวนแบบเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์

ในบทนี้เป็นการออกแบบสร้างสัญญาณอลวนหรือเคออสติกแอทแทรกเตอร์ที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์การผ่านทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โมดูลของ Labview การแสดงผลการทดลองของสัญญาณในโดเมนของเวลาและ โดเมนของความถี่ Frequency spectra (FFT) และค่า Poincare's map ที่แสดงความเป็นเคออส โดยในการสร้างเราเลือกเคออสติกแอทแทรกเตอร์ของ Sprott ที่ง่ายต่อการสร้างและสะดวกต่อการอธิบายในห้องปฏิบัติการ

## 4.1 เคออสติกแอทแทรกเตอร์ของ Sprott ( Sprott's attractor )

หลังจากที่ Lorenz และ Rossler ได้ค้นพบสมการเกี่ยวกับการสร้างตัวดึงดูดสัญญาณเคออส ต่อมามีผู้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างสัญญาณเคออสแบบใหม่ คือ J.C. Sprott ซึ่งได้ใช้คอมพิวเตอร์หาสมการเคออสทั้งหมดที่เป็นไปได้โดยอยู่ในรูป Jerk function ($\dddot{x} = J(\ddot{x}, \dot{x}, x)$) พร้อมด้วยฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบง่ายๆ 1 ตัว โดยสมการที่ Sprott ค้นพบมีดังนี้

**ตารางที่ 4.1** แสดงการสร้างสัญญาณเคออส third-order ODE systemsและ Lyapunov exponents

| System | Initial conditions $(x, \dot{x}, \ddot{x})$ | Lyapunov exponents (base $e$) |
|---|---|---|
| $\dddot{x} = -2.017\ddot{x} \pm \dot{x}^2 - x$ | (0, 0, ±1) | 0.055, 0, −2.072 |
| $\dddot{x} = -2.8\ddot{x} \pm \dot{x} + x^2$ | (∓0.5, −1, 1) | 0.002, 0, −0.002 |
| $\dddot{x} = -0.44\ddot{x} - 2\dot{x} \pm (x^2 - 1)$ | (0, 0, 0) | 0.105, 0, −0.545 |
| $\dddot{x} = -0.5\ddot{x} - \dot{x} \pm x \pm x^2$ | (0, ±1, 0) | 0.094, 0, −0.594 |
| $\dddot{x} = -2\dot{x} \pm (\lvert x \rvert - 1)$ | ±(−1, −1, 1) | 0.003, 0, −0.003 |
| $\dddot{x} = -0.6\ddot{x} - \dot{x} \pm (\lvert x \rvert - 1)$ | (0, 0, 0) | 0.036, 0, −0.636 |
| $\dddot{x} = -0.3\ddot{x} - 0.3\dot{x} - D(x) + 1$ | (0, 0, 0) | 0.042, 0, −0.342 |
| $\dddot{x} = -0.3\ddot{x} - 0.3\dot{x} - R(x) - 1$ | (0, 0, 0) | 0.042, 0, −0.342 |
| $\dddot{x} = -2.9\dot{x} \pm (0.7x - D(x) + 1)$ | ±(0, −0.5, 0.5) | 0.003, 0, −0.003 |
| $\dddot{x} = -2.9\dot{x} \pm (0.7x - R(x) - 1)$ | ±(0, 0.5, −0.5) | 0.003, 0, −0.003 |
| $\dddot{x} = -0.5\ddot{x} - \dot{x} - x + \mathrm{sgn}(x)$ | (0, 1, 0) | 0.152, 0, −0.652 |
| $\dddot{x} = -0.5\ddot{x} - \dot{x} + x - \mathrm{sgn}(x)$ | (0, 1, 0) | 0.601, 0, −1.101 |
| $\dddot{x} = -0.7\ddot{x} - \dot{x} - x + H(x)$ | (0, 1, 0) | 0.085, 0, −0.785 |
| $\dddot{x} = -0.4\ddot{x} - \dot{x} - x + 2S(x)$ | (0, 1, 0) | 0.072, 0, −0.472 |
| $\dddot{x} = -0.4\ddot{x} - \dot{x} + x - 2S(x)$ | (0, 1, 0) | 0.091, 0, −0.491 |
| $\dddot{x} = -0.19\ddot{x} - \dot{x} - x + 2\tanh(x)$ | (0, 1, 0) | 0.128, 0, −0.318 |
| $\dddot{x} = -0.19\ddot{x} - \dot{x} + x - 2\tanh(x)$ | (0, 1, 0) | 0.067, 0, −0.257 |
| $\dddot{x} = -3.7\dot{x} \pm (x - x^3)$ | (0, ±0.5, 1) | 0.002, 0, −0.002 |
| $\dddot{x} = -0.6\ddot{x} + 2.8\dot{x} - \dot{x}^3 - x$ | (0, 1, 0) | 0.034, 0, −0.634 |
| $\dddot{x} = -0.7\ddot{x} - \dot{x} + x - x^3$ | (0, 1, 0) | 0.138, 0, −0.838 |
| $\dddot{x} = -0.35\ddot{x} - \dot{x} - x + x^3$ | (0, 1, 0) | 0.082, 0, −0.432 |
| $\dddot{x} = -0.2\ddot{x} - \dot{x} \pm \sin(x)$ | (0, 1, 0) | 0.123, 0, −0.323 |

จากตารางที่ 4.1 แสดงสมการเคออสที่อยู่ในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์ พร้อมกับค่าเริ่มต้นและค่า Lyapunov exponents ที่ J.C. Sprott ค้นพบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.1 การออกแบบวงจรกำเนิดเคออสติกแอทแทรกเตอร์**

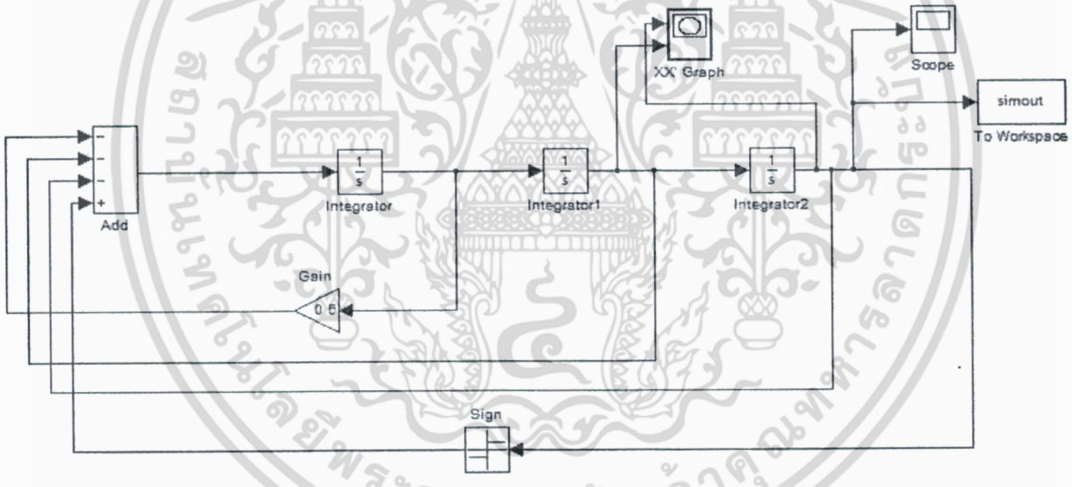
สัญญาณเคออสติกแอทแทรกเตอร์ที่มีรูปแบบไม่ซ้ำกันและไม่สามารถคาดเดาได้ แต่จะอยู่ในขอบเขตของสมการคณิตศาสตร์ที่เป็นสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) จากการศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการสร้างสัญญาณเคออสอย่างง่ายของ Sprott ซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนี้

$$\dddot{x} = -0.5\ddot{x} - \dot{x} - x + \mathrm{sgn}(x) \qquad (4.1)$$

$$\dddot{x} = -0.5\ddot{x} - \dot{x} + x - \mathrm{sgn}(x) \qquad (4.2)$$

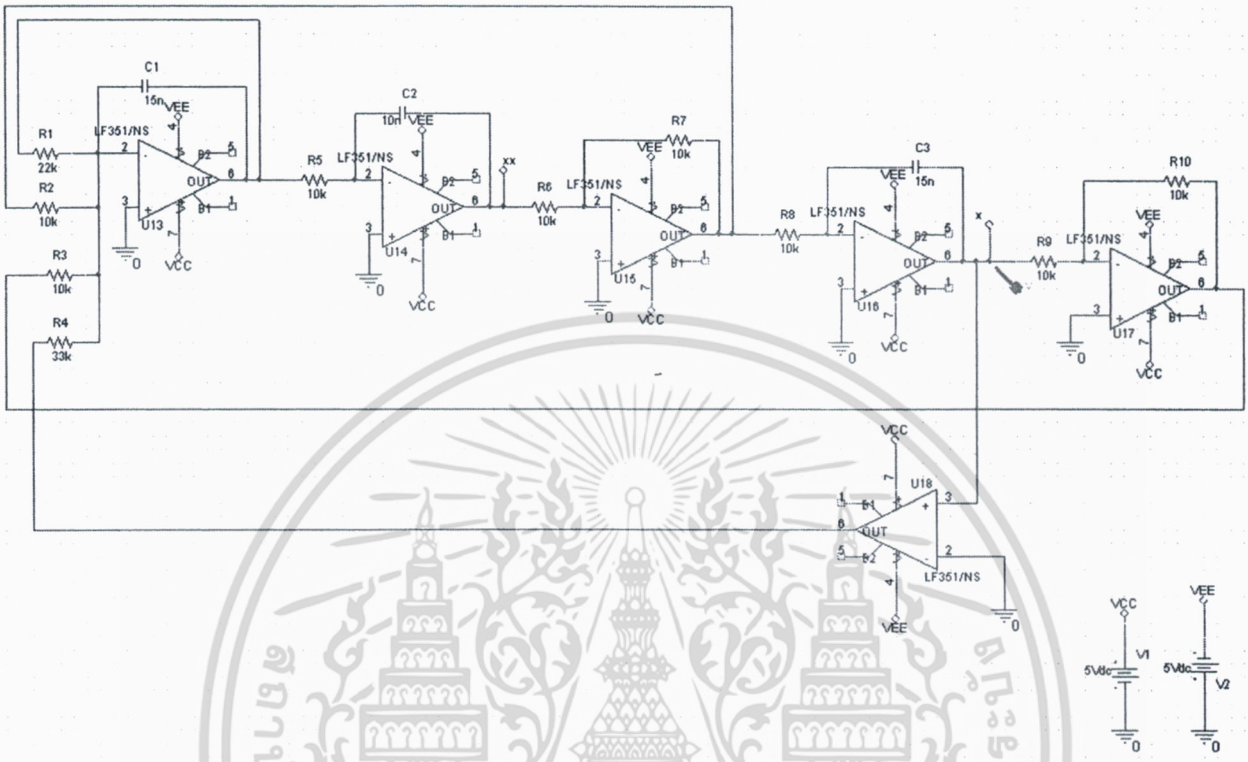
$$\dddot{x} = -0.7\ddot{x} - \dot{x} - x + \mathrm{H}(x) \qquad (4.3)$$

จากสมการทั้งสาม นำมาออกแบบวงจรโดยใช้โปรแกรม Simulink ใน MatLab และออกแบบวงจรไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Pspice ซึ่งใช้หลักการของออปแอมป์ในการสร้างวงจรกลับเฟส ( Inverting Amplifier ) และวงจร Integrator ดังนี้ $\dddot{x} = -0.5\ddot{x} - \dot{x} - x + \mathrm{sgn}(x)$




รูปที่ 4.1 แสดงวงจรของสมการ4.1 ที่ได้จากโปรแกรมSimulink

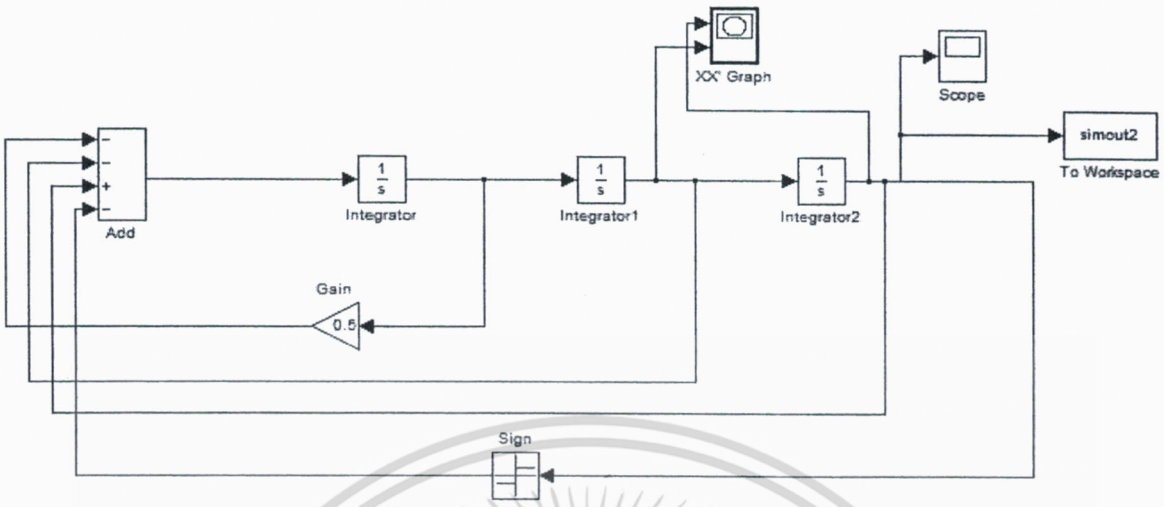
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



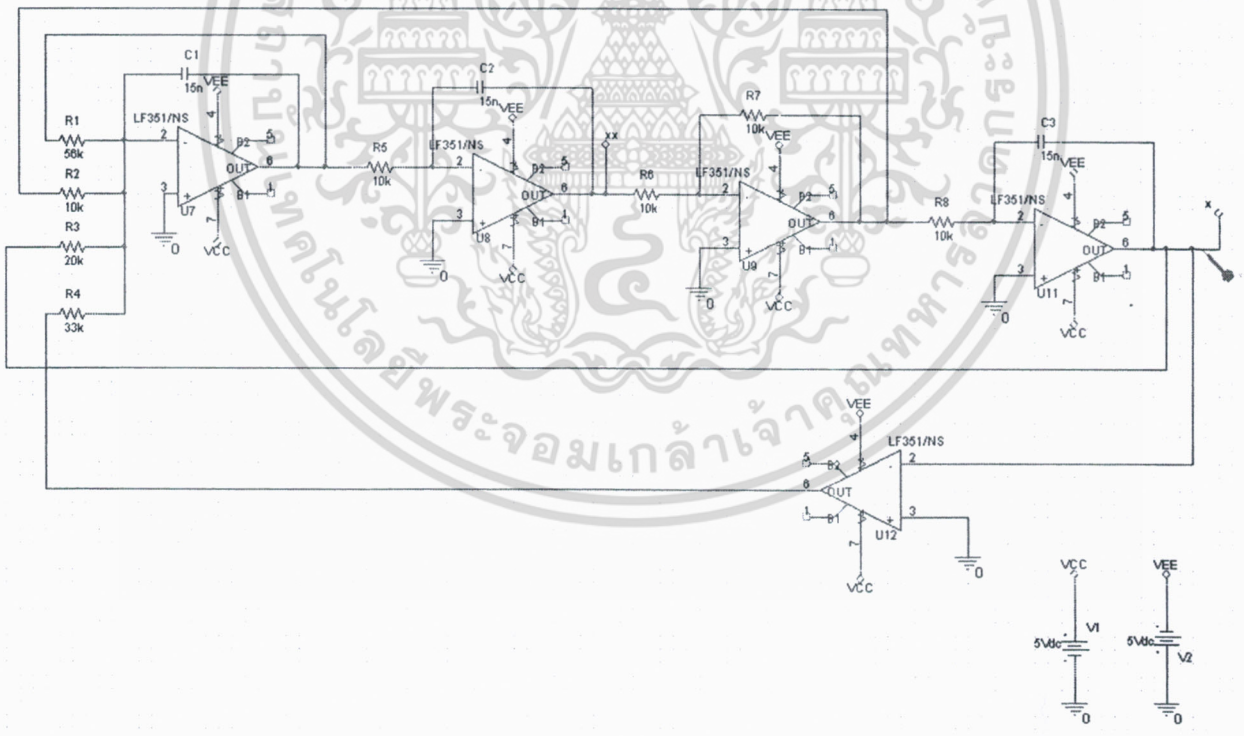

รูปที่ 4.2 แสดงวงจรไฟฟ้าของสมการที่ 4.1 ที่ได้จากโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างสมการ (4.2) $\dddot{x} = -0.5\ddot{x} - \dot{x} + x - \text{sgn}(x)$



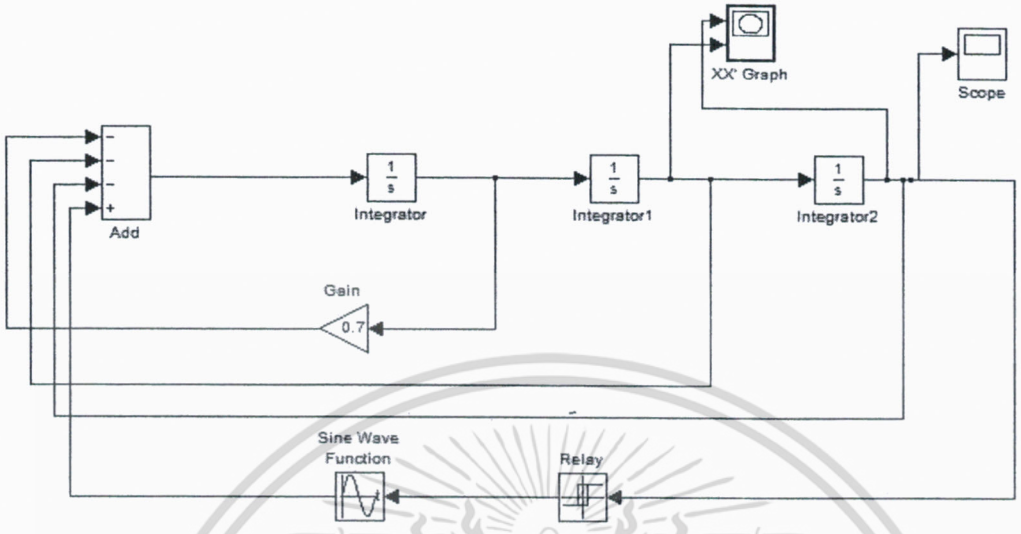

รูปที่ 4.3 แสดงวงจรของสมการที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม Simulink



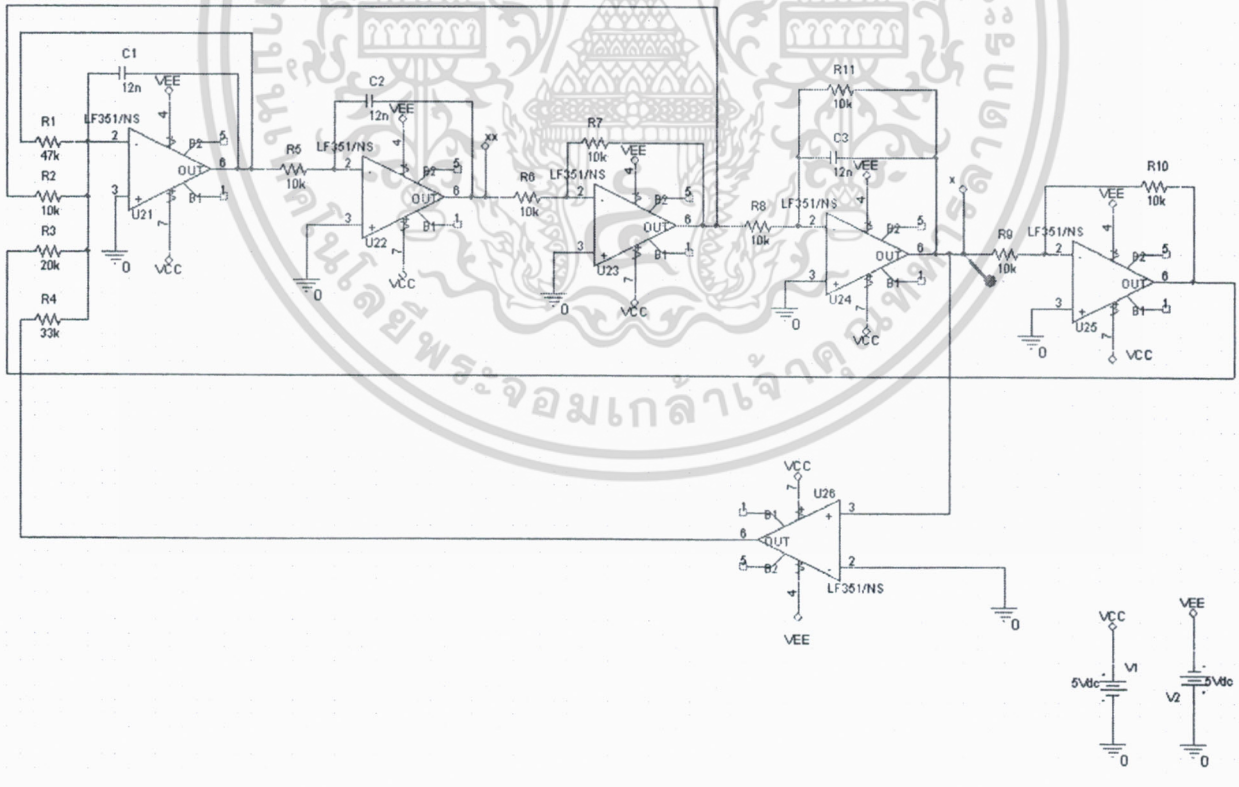

รูปที่ 4.4 แสดงวงจรไฟฟ้าของสมการที่ 4.2 ที่ได้จากโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างสมการ (4.3) $\dddot{x} = -0.7\ddot{x} - \dot{x} - x + H(x)$




รูปที่ 4.5 แสดงวงจรของสมการที่ (4.3) ที่ได้จากโปรแกรม MatLab

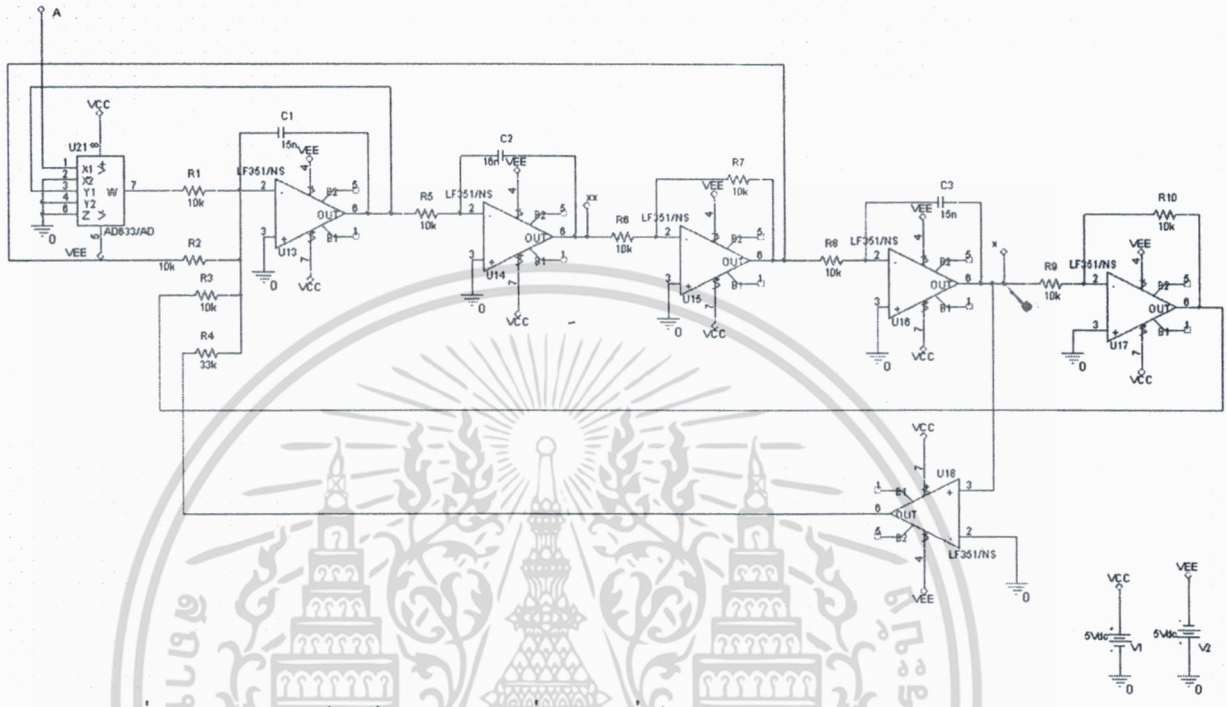



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรไฟฟ้าของสมการที่ (4.3) ที่ได้จากโปรแกรม Pspice

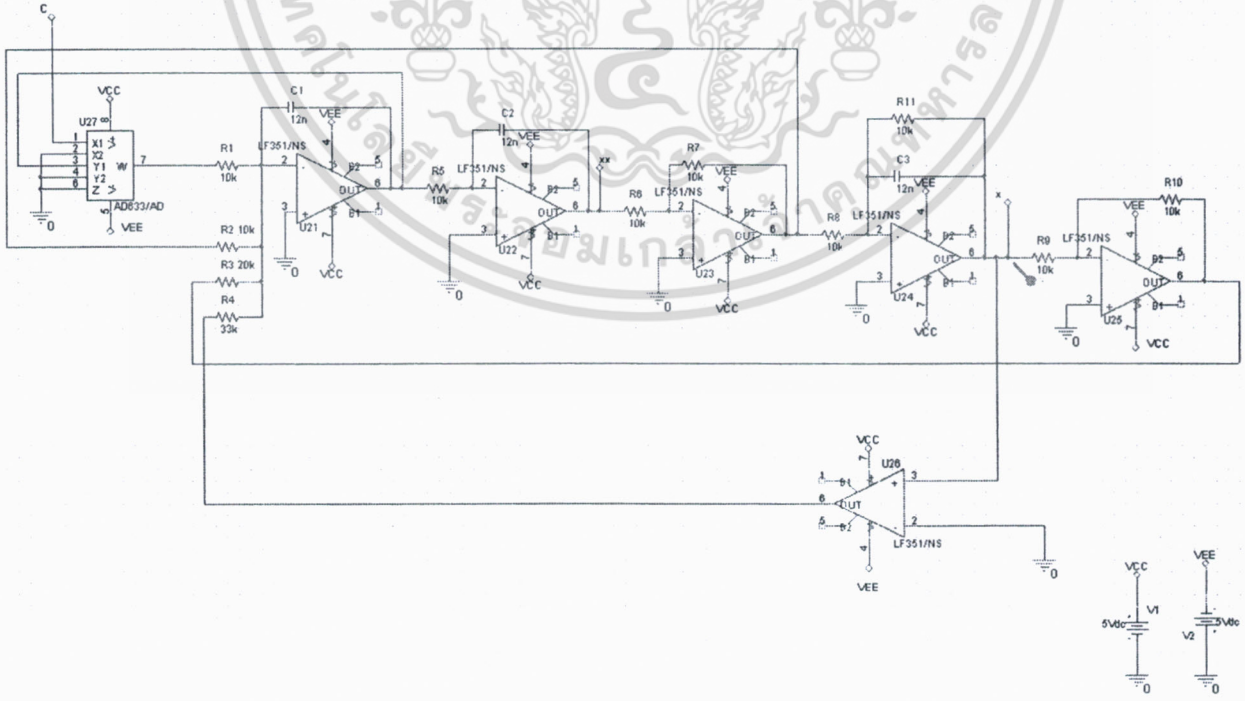
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1 การออกแบบวงจรสัญญาณอลวนแบบที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้

จากวงจรสมการของ Sprott โดยเพิ่มไอซี AD633 เข้าไปในวงจรที่ได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.3 เพื่อเป็นการคูณสัญญาณแรงดัน AD633 เข้าไปในวงจร




รูปที่ 4.7 แสดงวงจรไฟฟ้าของสมการที่ 1 โดยเพิ่มไอซี AD633

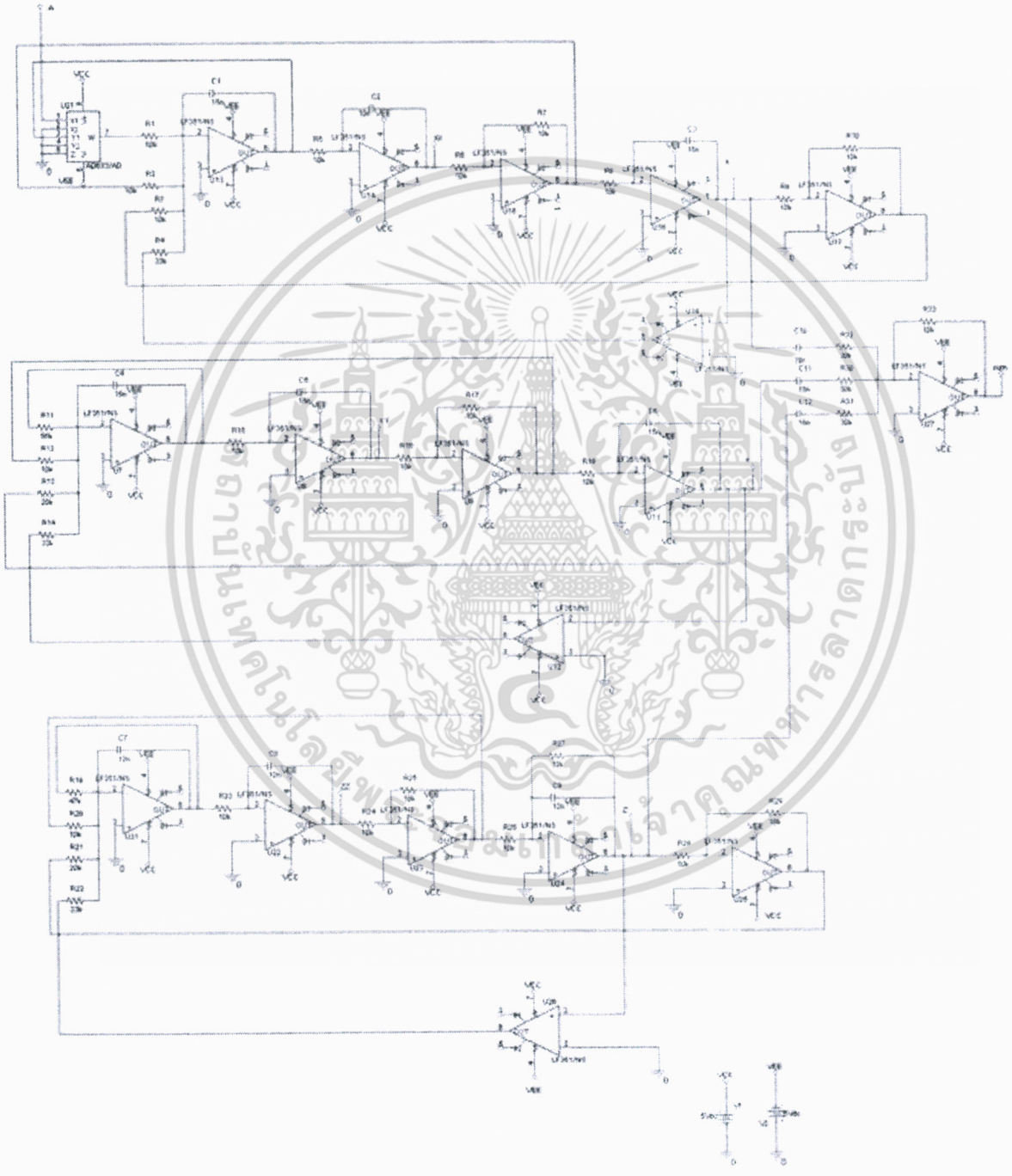



รูปที่ 4.8 แสดงวงจรไฟฟ้าของสมการที่ (4.3) โดยเพิ่มไอซี AD633

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 การสร้างสัญญาณจำลองคลื่นสมอง

เพื่อให้นักศึกษาหรือผู้ทดลองได้เห็นประโยชน์ของการนำเอาสัญญาณไปใช้งานเราสามารถนำโมดูลของสมการ 4.1 สมการ 4.3 มาต่อร่วมกันได้สัญญาณจำลองของคลื่นสมอง จะต้องนำสัญญาณที่ได้จากมารวมกัน ผ่านวงจรรวมสัญญาณ (summing circuit)

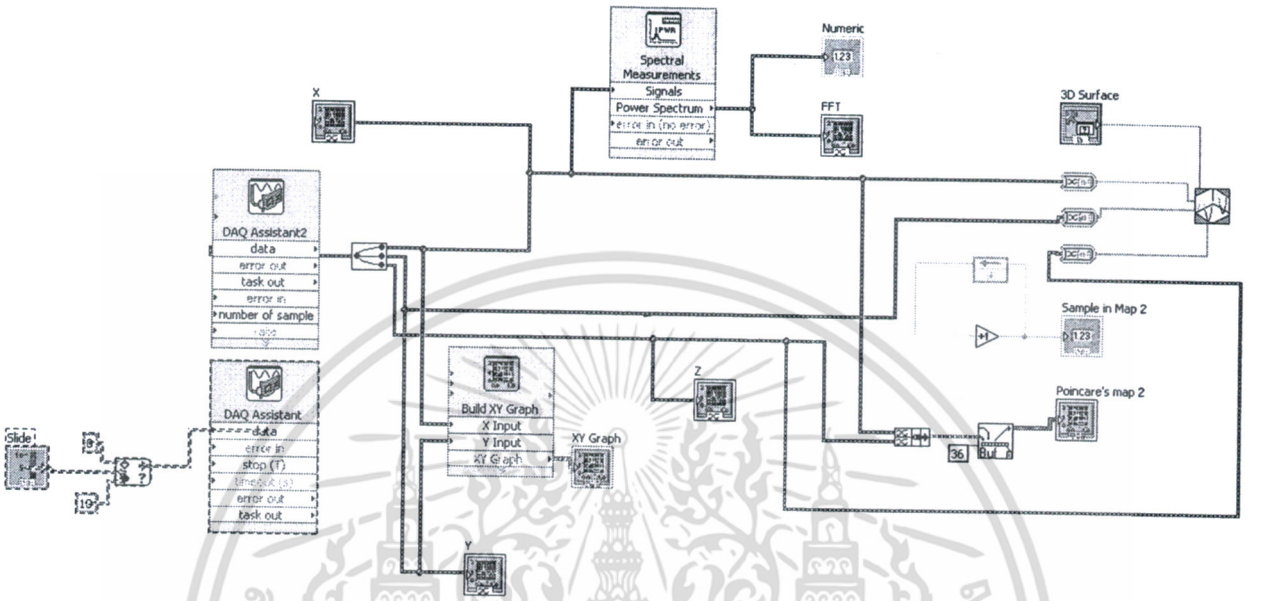


รูปที่ 4.10 แสดงวงจรการสร้างสัญญาณจำลองคลื่นสมอง

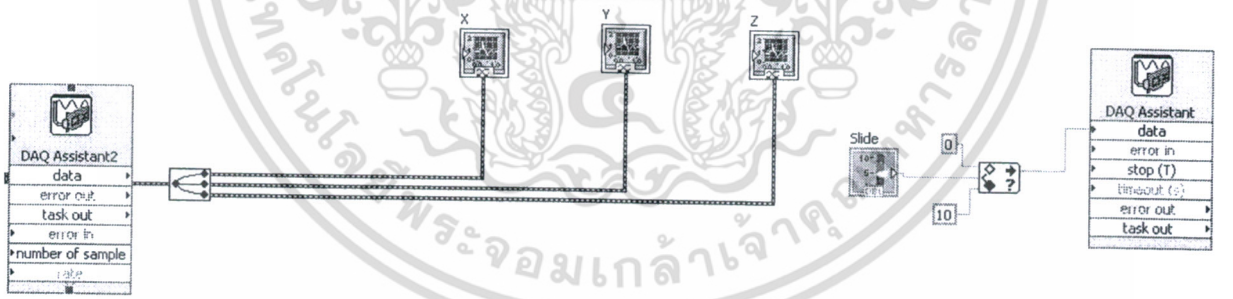
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ในการทดลอง

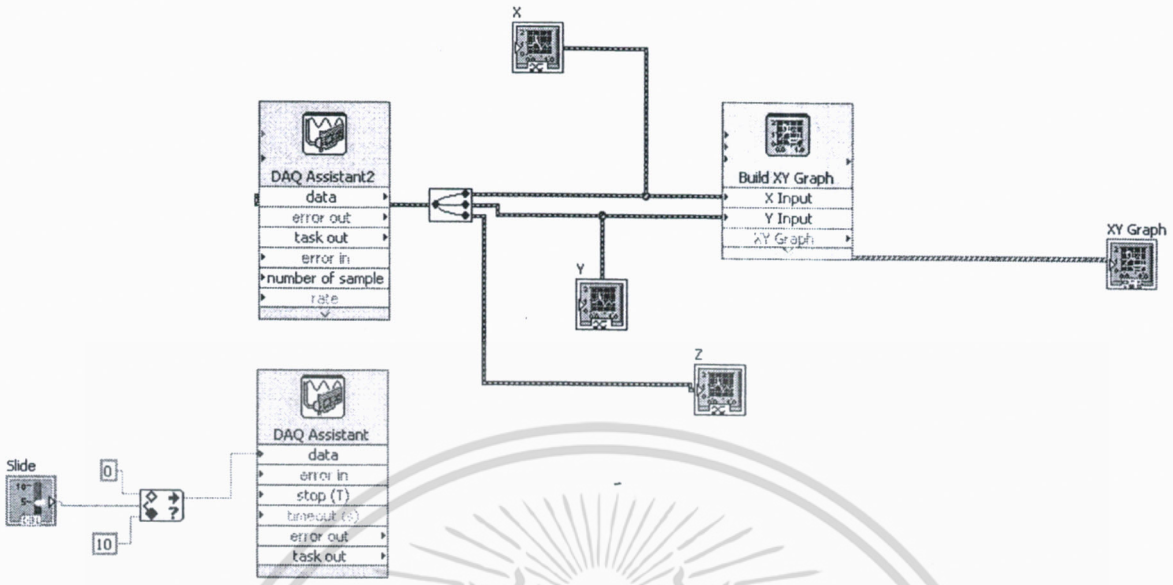
ในการทดลองการสร้างสัญญาณเลียนแบบคลื่นสมอง จะใช้การเขียนโปรแกรมควบคุมเครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง โดยใช้ซอฟแวร์ LabView ในการออกแบบโปรแกรม โดยออกแบบหน้าจอ Block Diagram เพื่อการโปรแกรมควบคุมการทำงานในส่วนต่างๆดังนี้



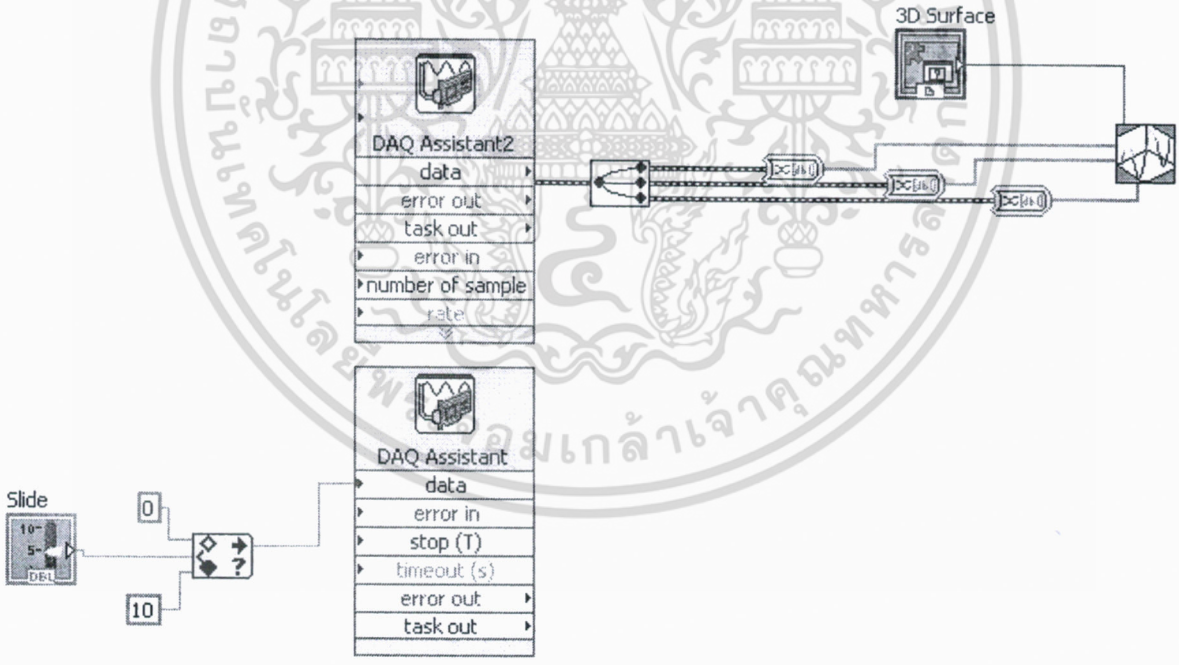

รูปที่ 4.11 แสดง Block Diagram ทั้งหมดของโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

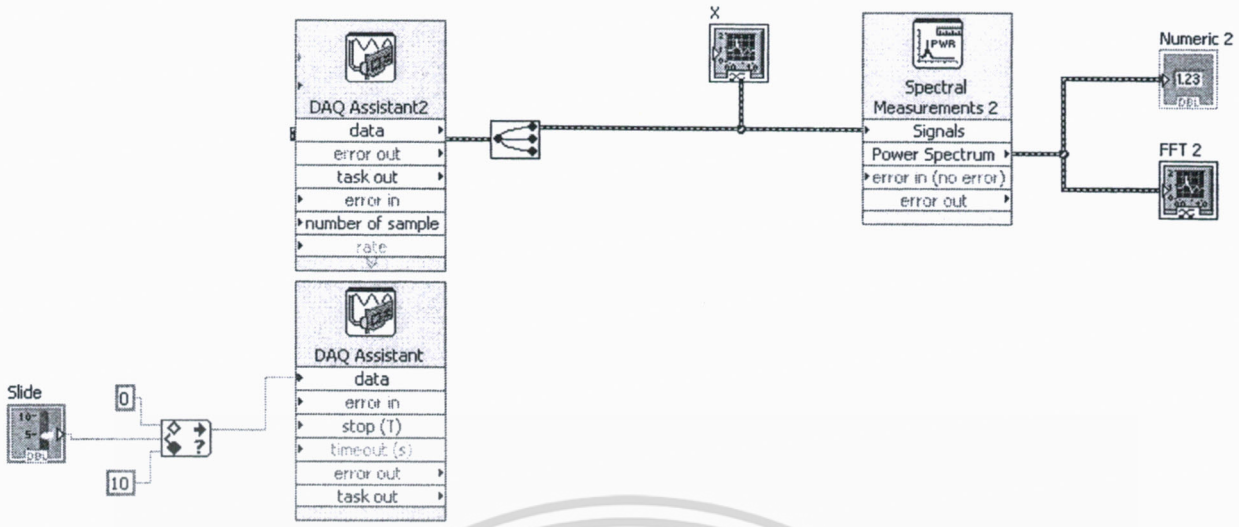



รูปที่ 4. 13 แสดง Block Diagram ในส่วนของกราฟแสดงความอลวล

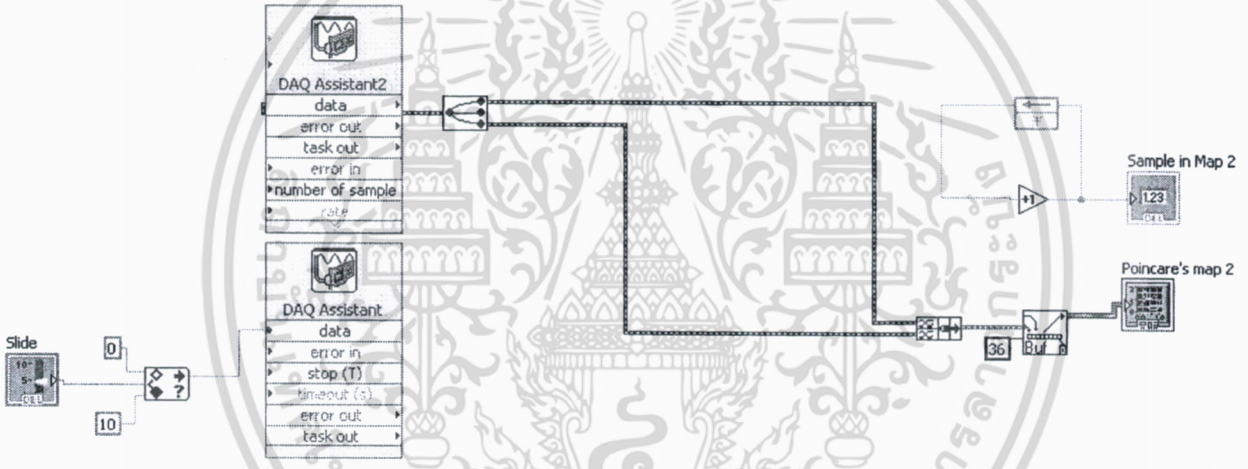



รูปที่ 4. 14 แสดง Block Diagram ในส่วนของการแสดงกราฟแบบสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 4. 15 แสดง Block Diagram ในส่วนของการหาค่า Fast Fourier Transform (FFT)




รูปที่ 4. 16 แสดง Block Diagram ในส่วนของ Poincare's map

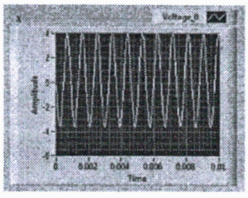
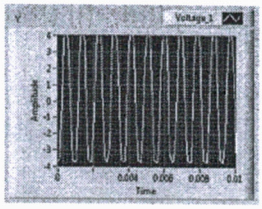
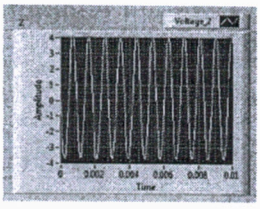
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 ผลการทดลอง

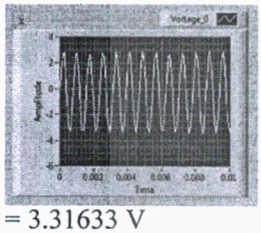
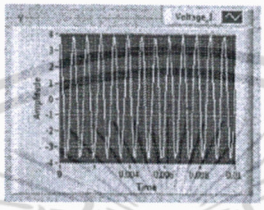
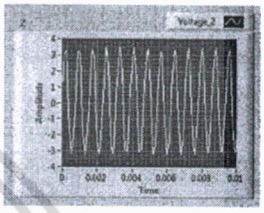
### 4.4.1 ตอนที่ 1 การหาความเป็นเคออส

ผลการทดลองที่ได้จากวงจรสมการที่ 4.1 ( $\dddot{x} = -0.5\ddot{x} - \dot{x} - x + \mathrm{sgn}(x)$ )

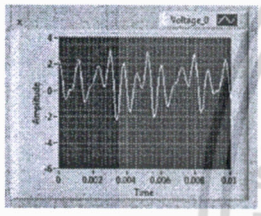
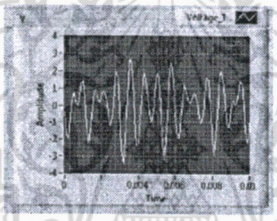
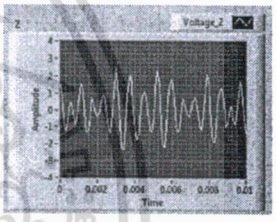
a = 0 V

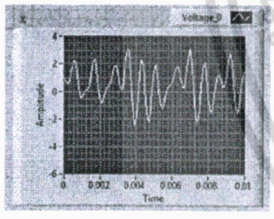
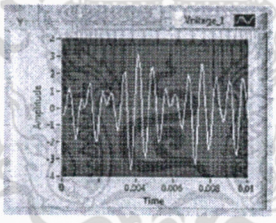
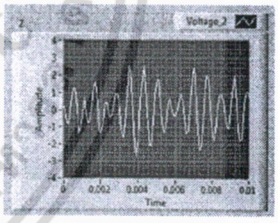
a = 3.26531 V

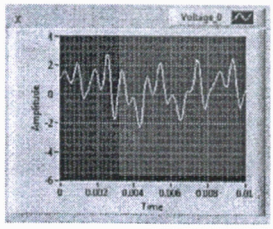
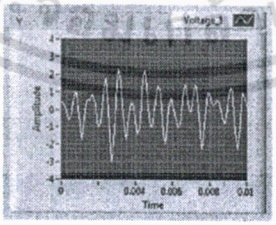
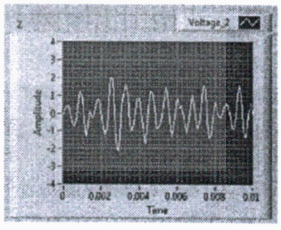
a = 3.31633 V

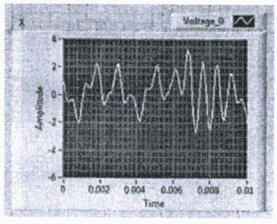
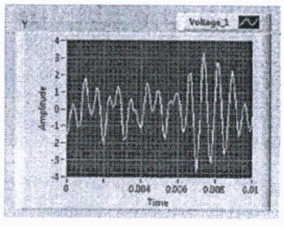
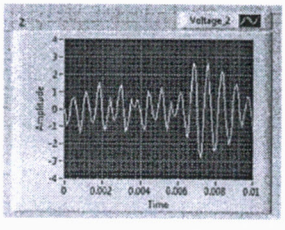
a = 4.13215 V

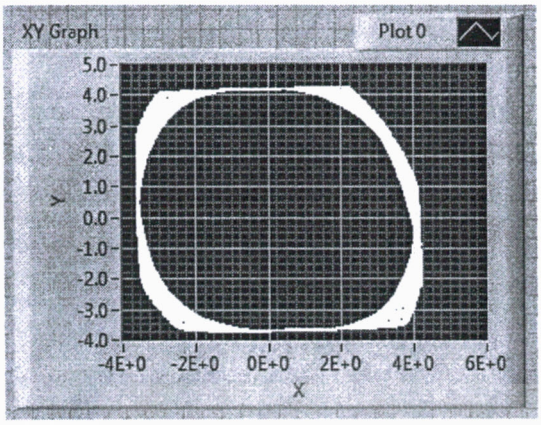
a = 4.59184 V

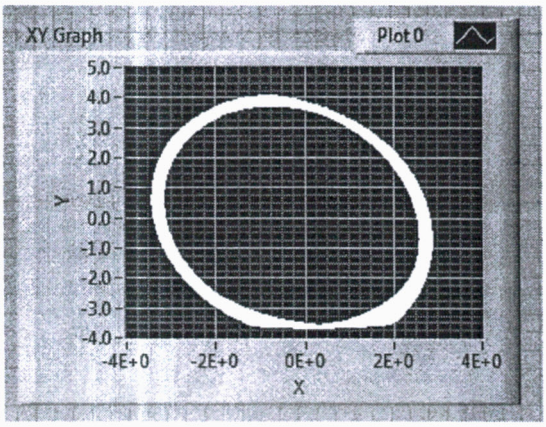
a = 5 V

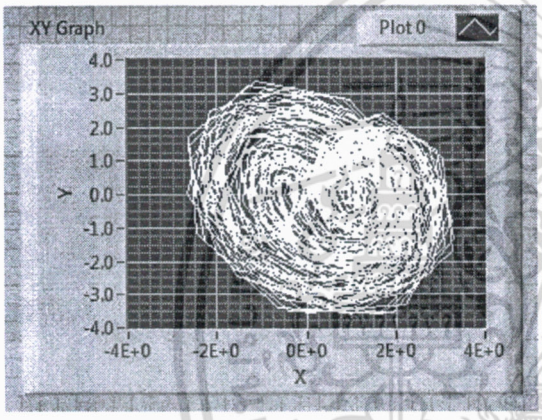
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



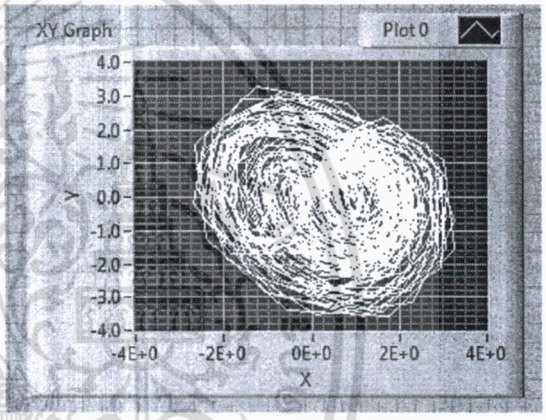

a = 0 V



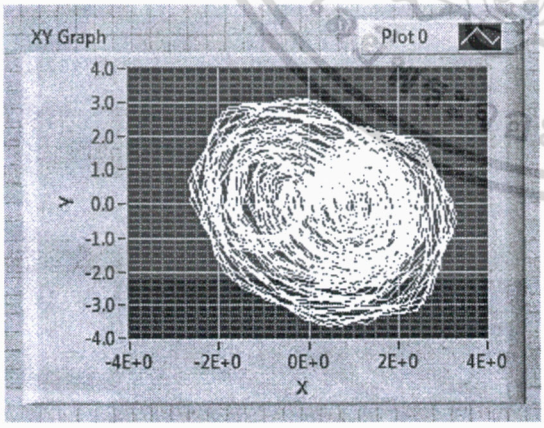

a = 3.26531 V



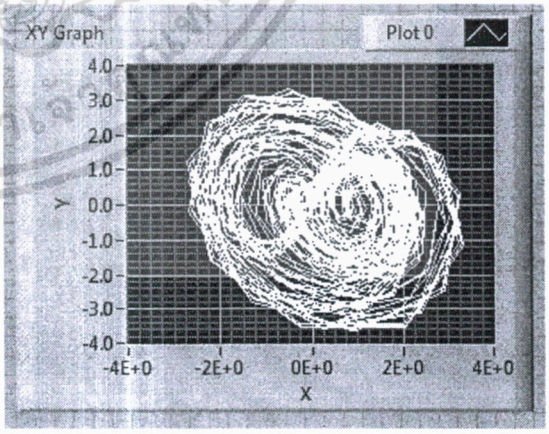

a = 3.31633 V




a = 4.13265V



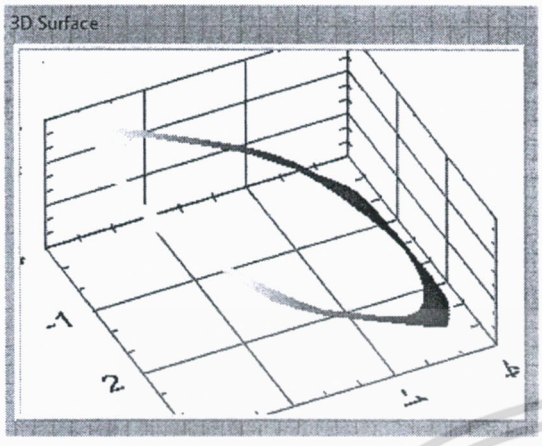

a = 4.59184 V



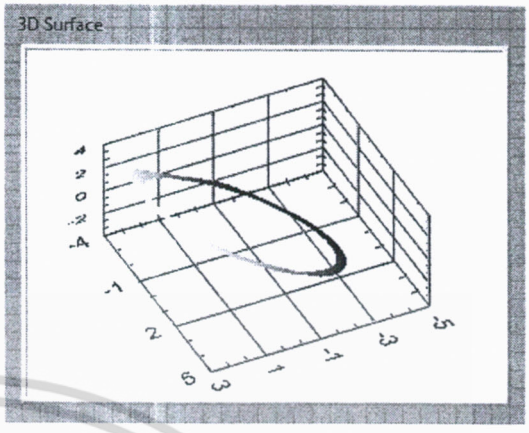

a = 5 V

รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดลองปรับค่า A ในช่วง 0 – 5 V ในรูปกราฟแสดงความอลวน

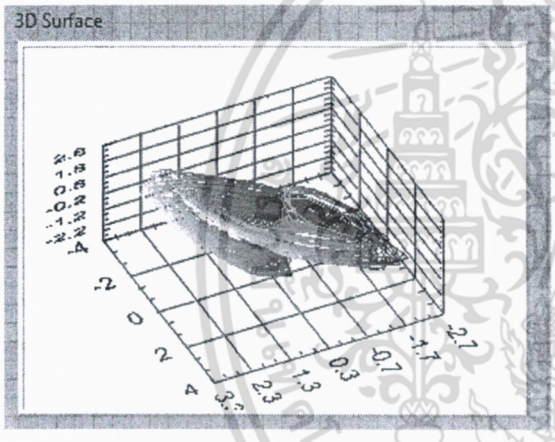
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



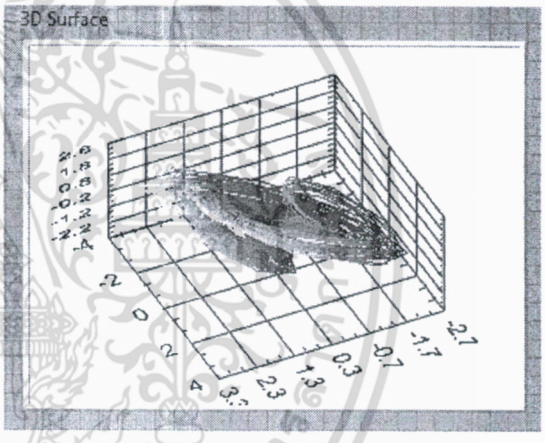

a = 0 V



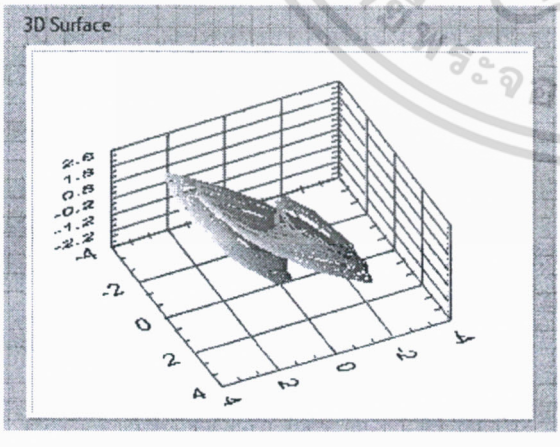

a = 3.26531 V



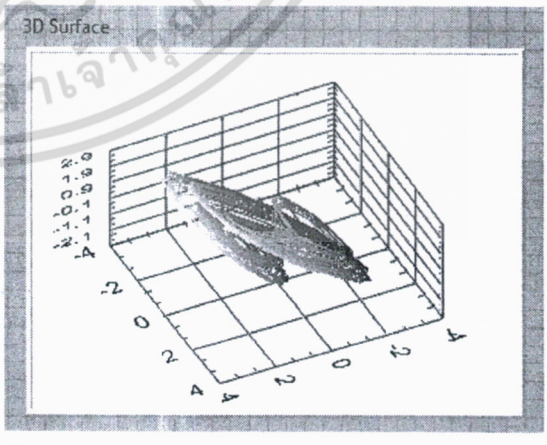

a = 3.31633 V




a = 4.13265V



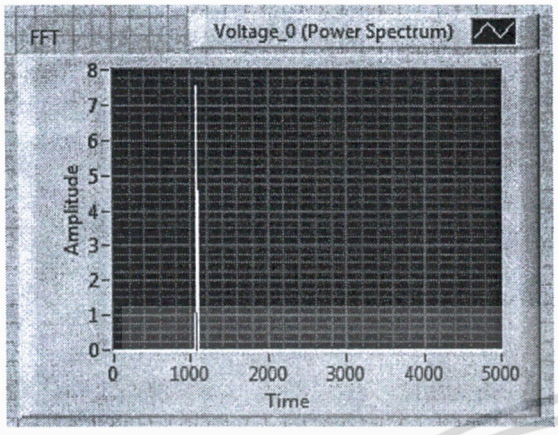

a = 4.59184 V



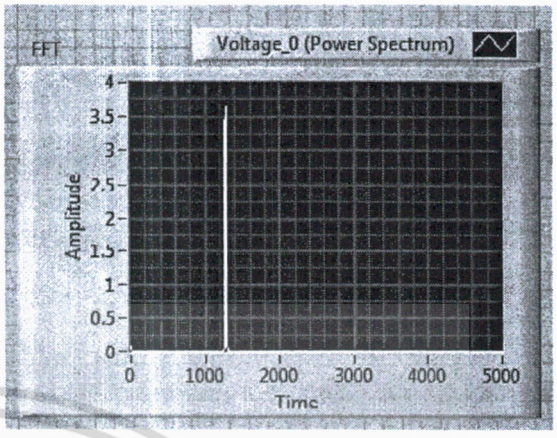

a = 5 V

รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองปรับค่า A ในช่วง 0 – 5 V ในรูปกราฟสามมิติ

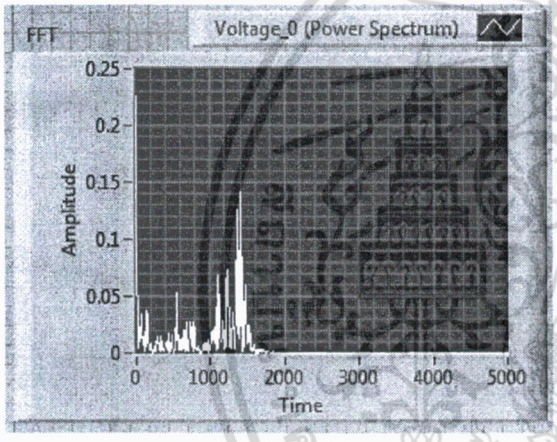
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



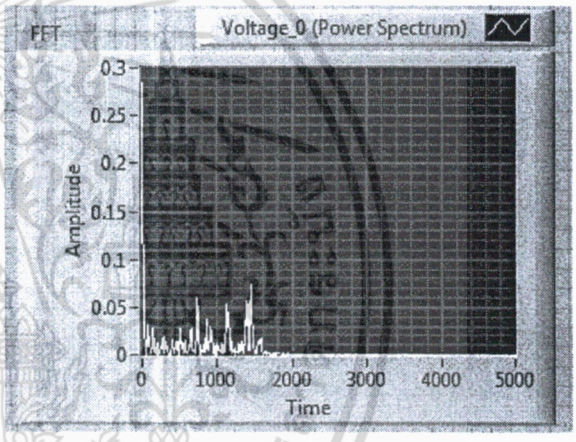

a = 0 V



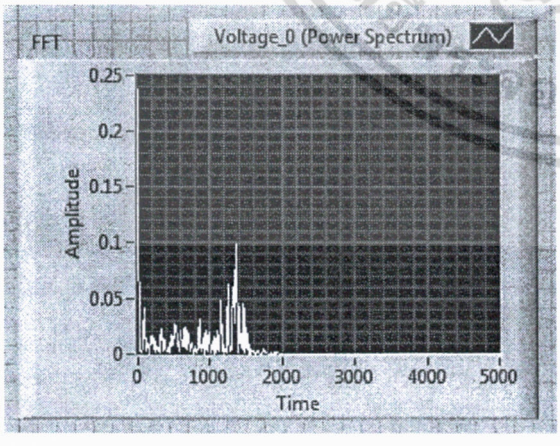

a = 3.26531 V



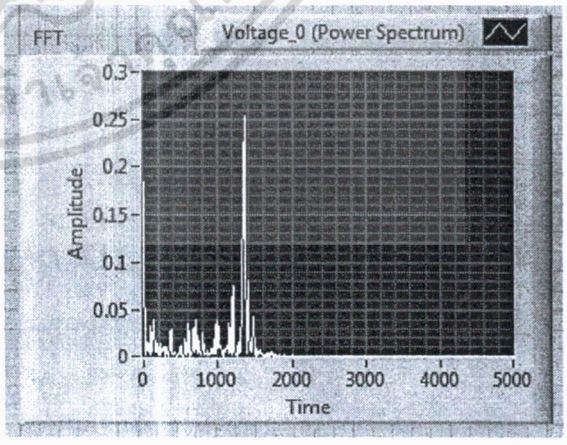

a = 3.31633 V




a = 4.13265V



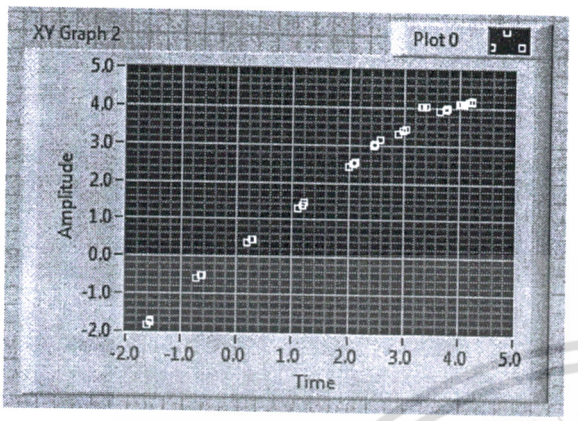

a = 4.59184 V



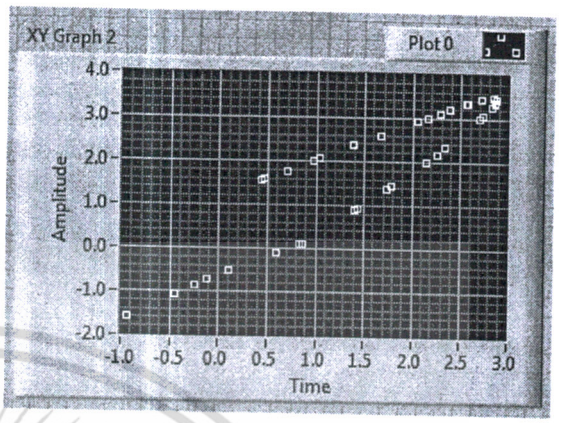

a = 5 V

รูปที่ 4.19 แสดงค่า Frequency spectra (FFT) จากการทดลองปรับค่า A ในช่วง 0 – 5 V

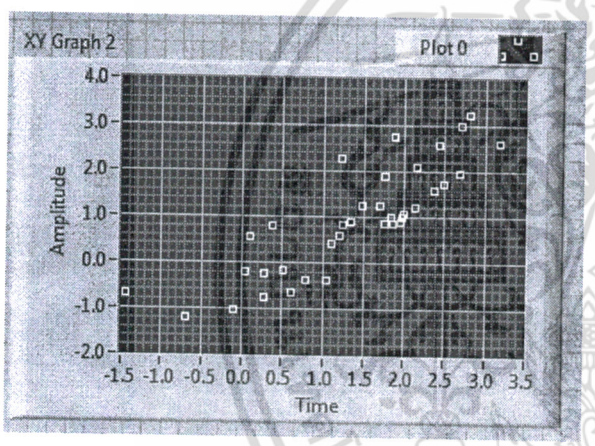
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



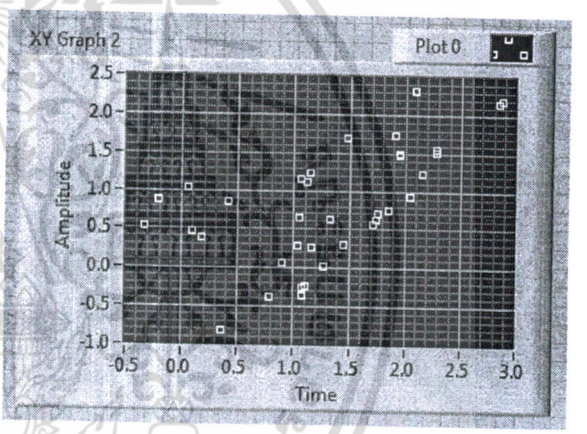

a = 0 V



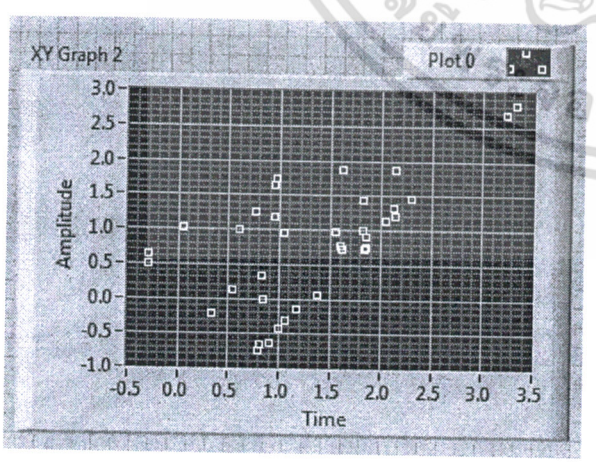

a = 3.26531 V



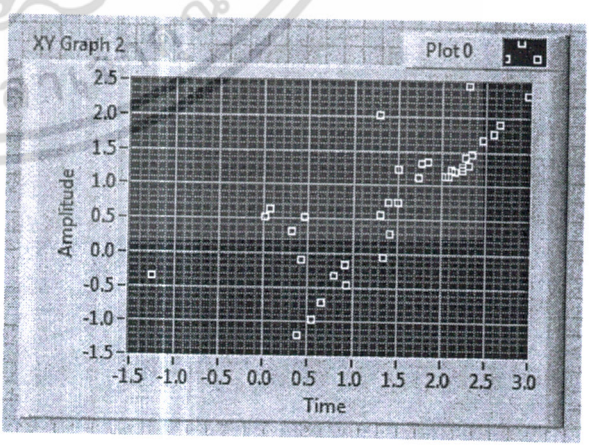

a = 3.31633 V




a = 4.13265V




a = 4.59184 V



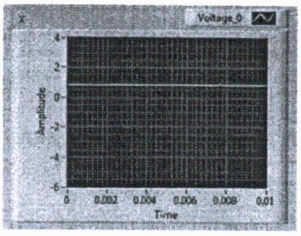
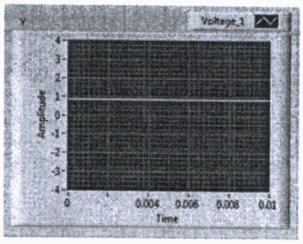
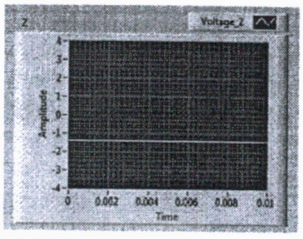

a = 5 V

รูปที่ 4.20 แสดงค่า Poincare's map จากการทดลองปรับค่า A ในช่วง 0 – 5 V

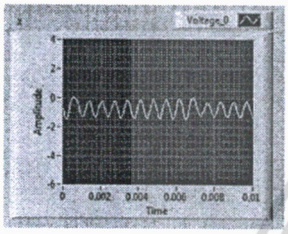
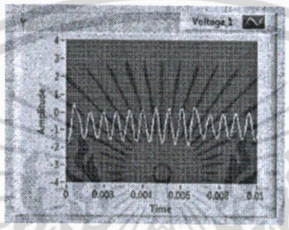
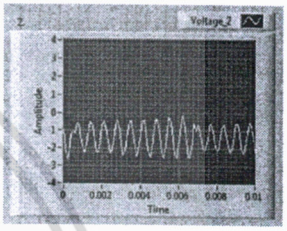
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ได้จากวงจรที่ 3 ( จากสมการที่ 3 : $\dddot{x} = -0.7\ddot{x} - \dot{x} - x + H(x)$ )

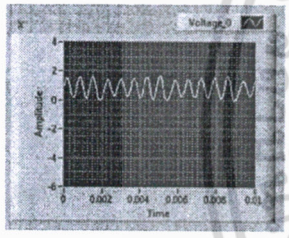
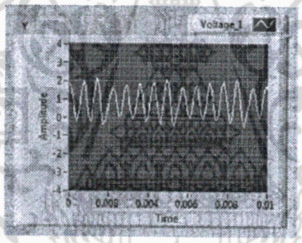
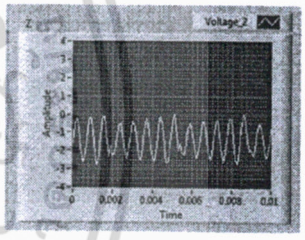
C > 2 V

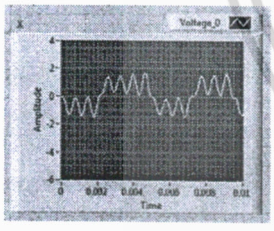
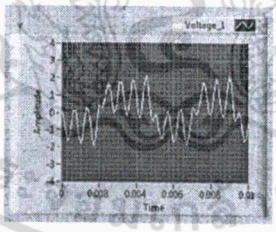
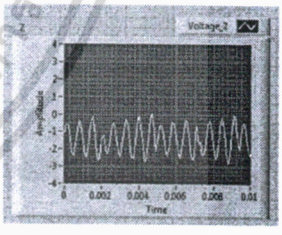
C = 1.68367 V

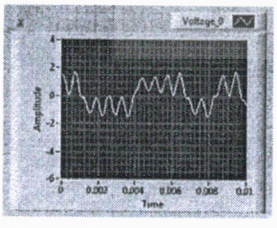
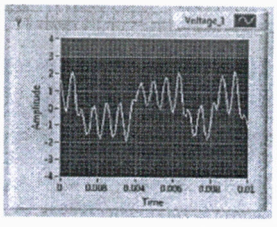
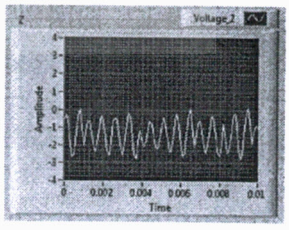
C = 1.53061 V

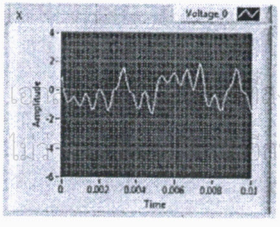
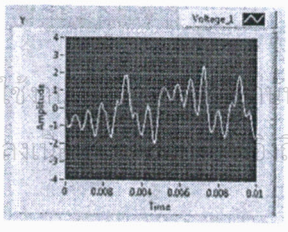
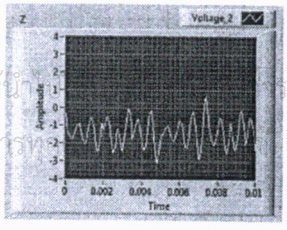
C = 1.37755 V

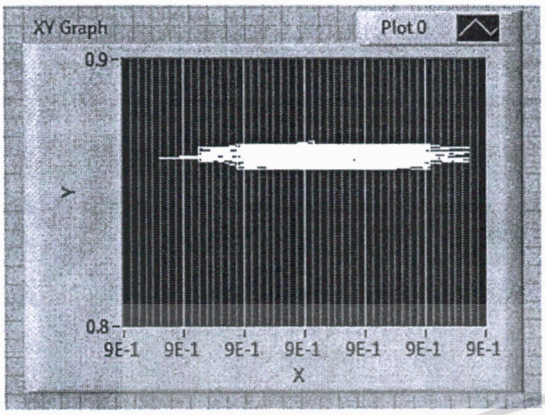
C = 1.12245 V

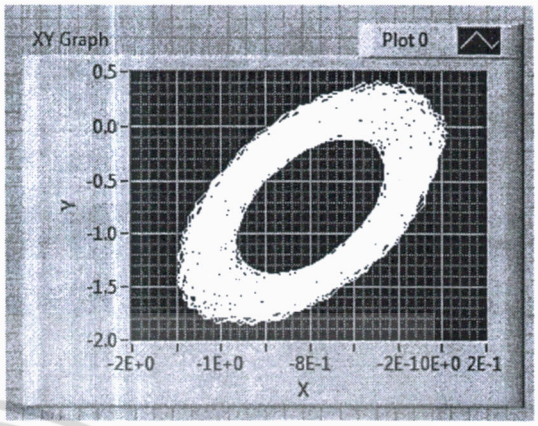




**C = 0 V**

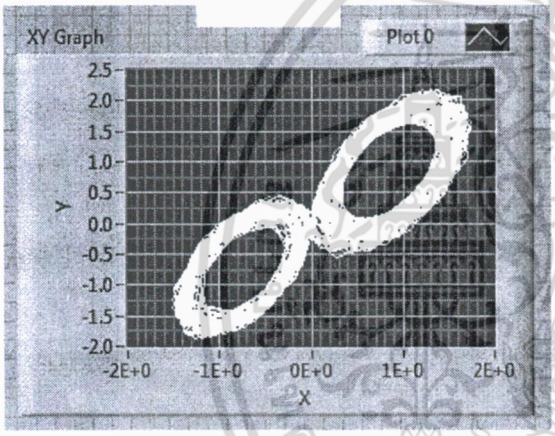




เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

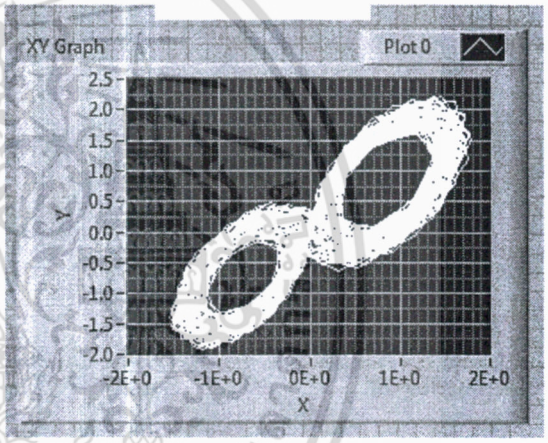


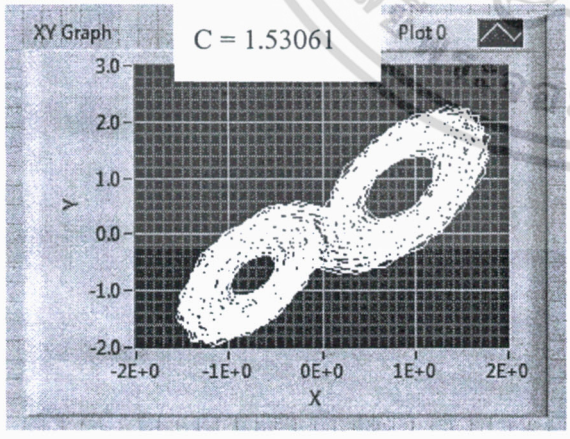



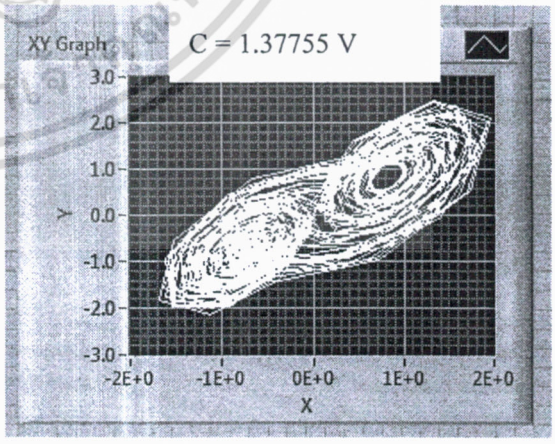

C > 2 V




C = 1.68367 V

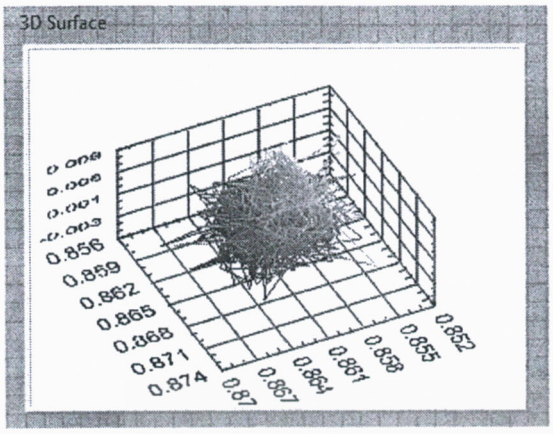


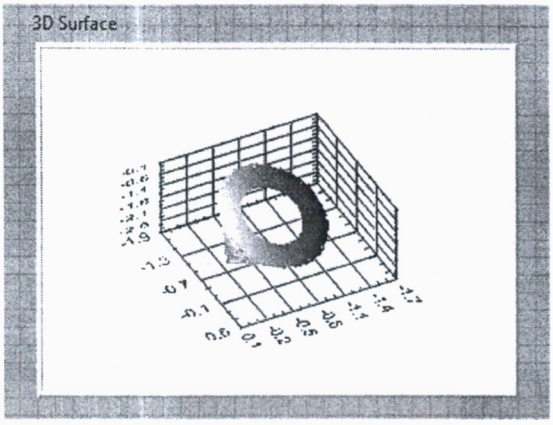



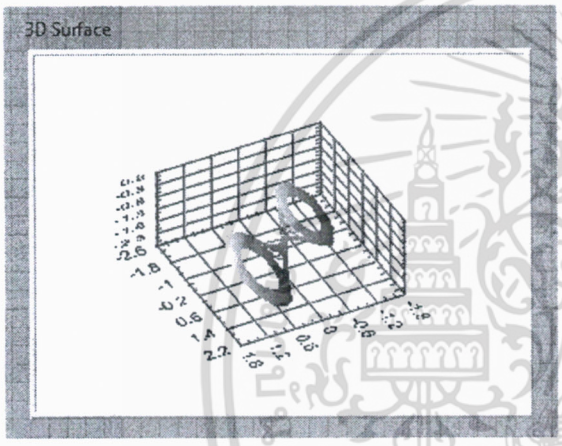

รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองปรับค่า C ในช่วง 0 – 5 V ในรูปกราฟแสดงความอลวน

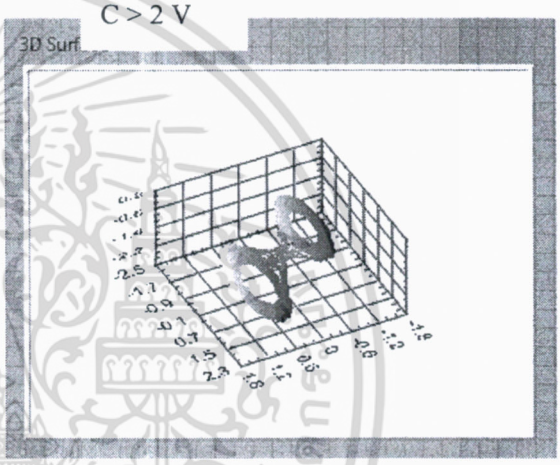
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



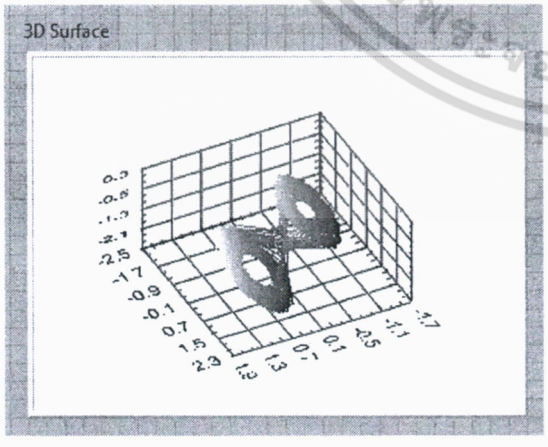



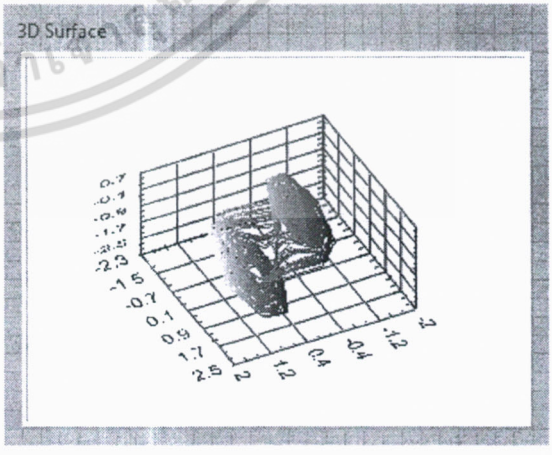

C > 2 V




C = 1.37755 V

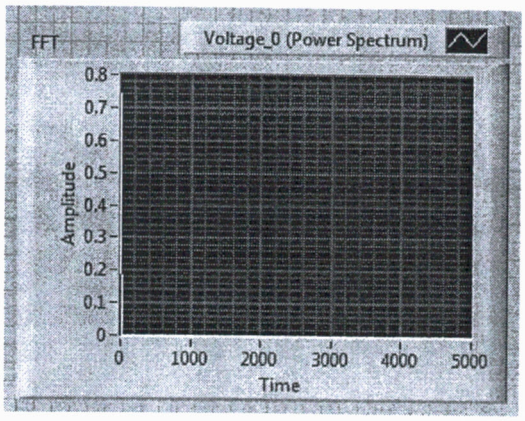


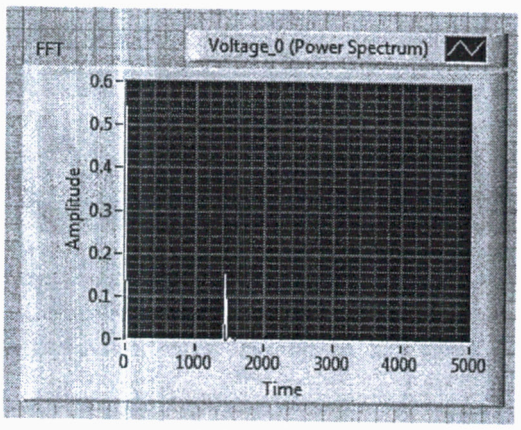




C = 0 V

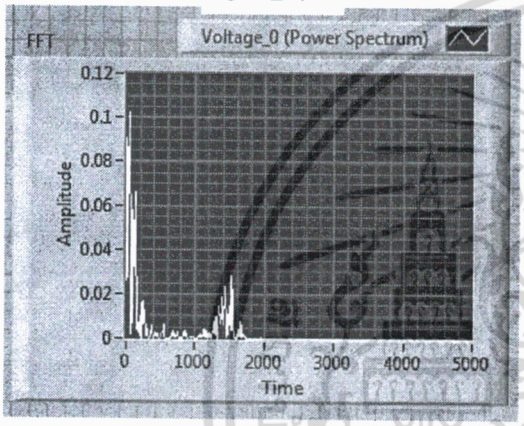
รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดลองปรับค่า C ในช่วง 0 – 5 V ในรูปกราฟสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

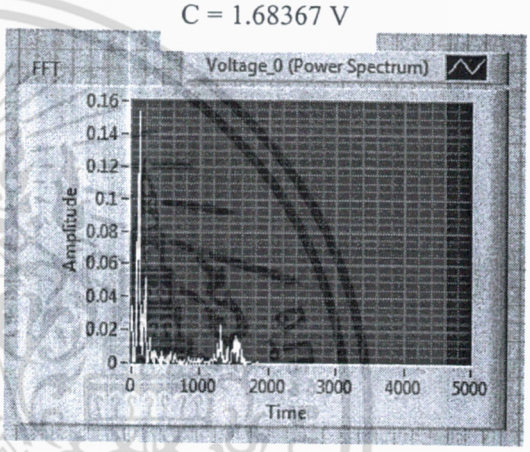


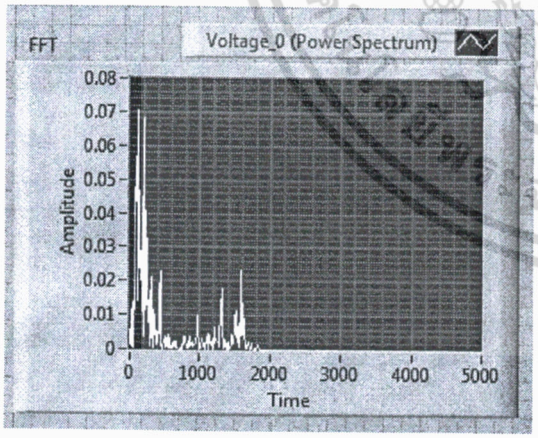




C > 2 V

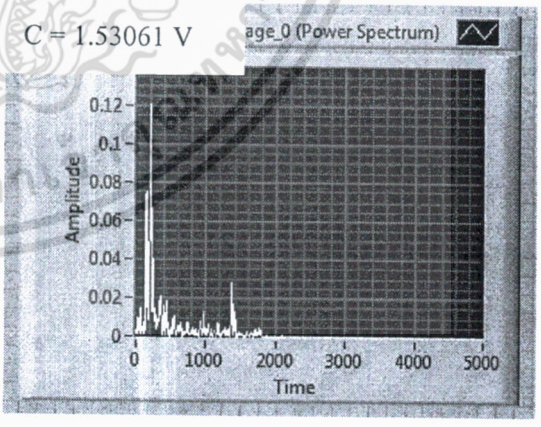



C = 1.68367 V



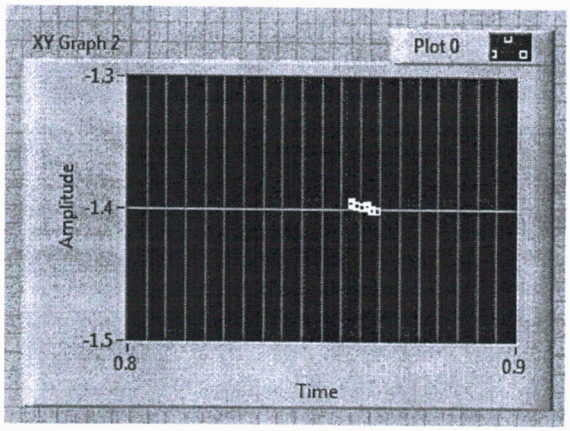




C = 1.53061 V

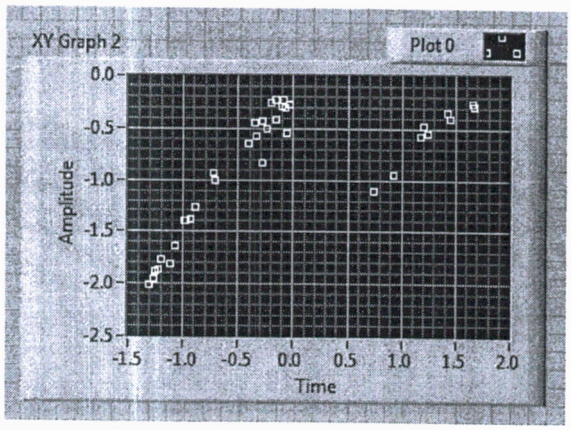



รูปที่ 4.23 แสดงค่า Frequency spectra (FFT) จากการทดลองปรับค่า C ในช่วง 0 – 5 V

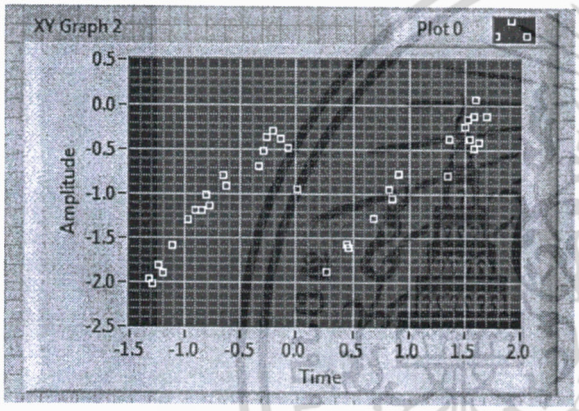
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



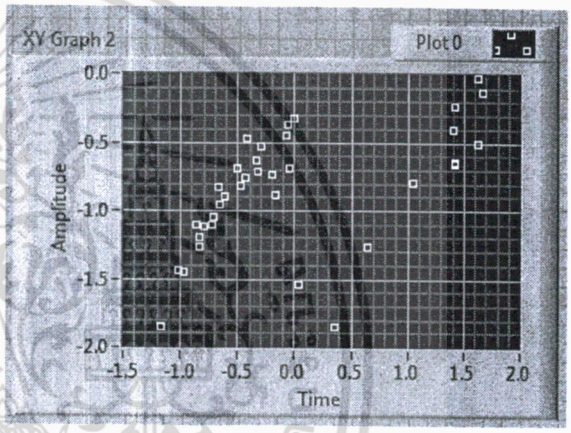

C > 2 V



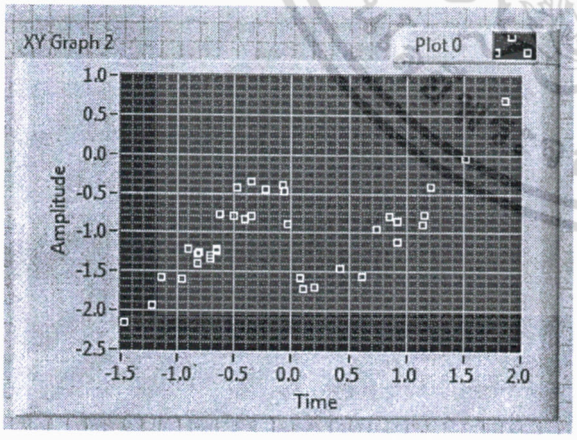

C = 1.68367 V



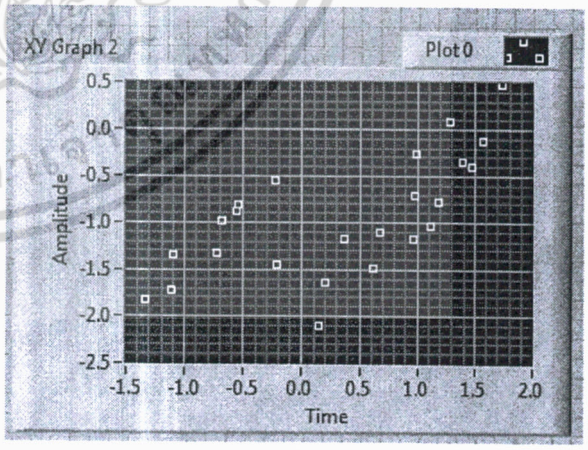

C = 1.53061 V




C = 1.37755 V




C = 1.12245 V

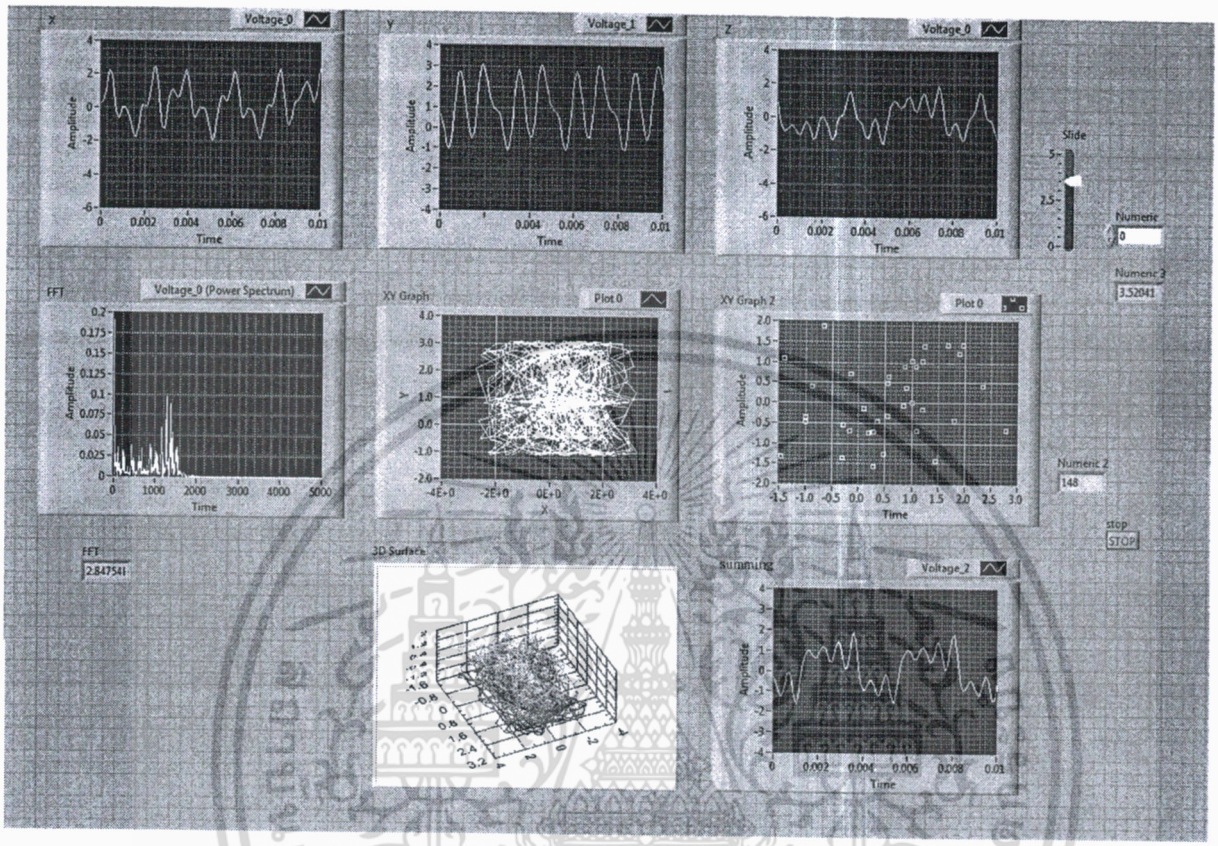



C = 0 V

รูปที่ 4.24 แสดงค่า Poincare's map จากการทดลองปรับค่า C ในช่วง 0 – 5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.2 ตอนที่ 2 การสร้างสัญญาณจำลองคลื่นสมอง



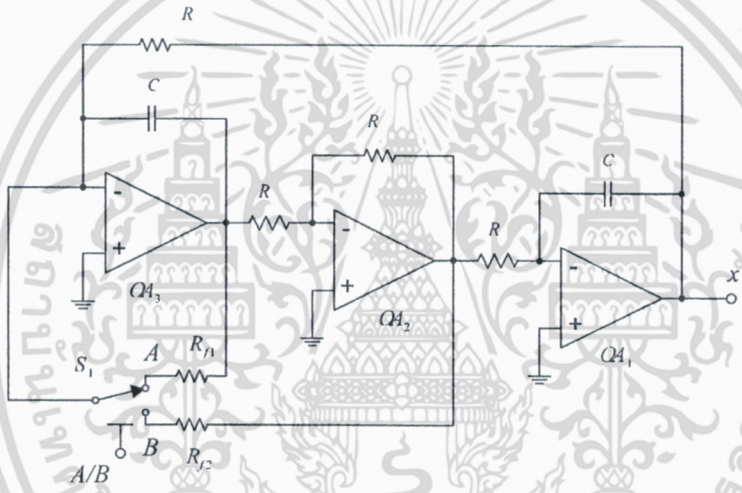

รูปที่ 4.23 แสดงค่า ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# ชุดทดลองกำเนิดสัญญาณอลวนได้หลายรูปแบบ

ในบทนี้เป็นการออกแบบสร้างชุดทดลองกำเนิดสัญญาณอลวนได้หลายรูปแบบโดยออกแบบเป็นโมดูลย่อยโดยแต่ละโมดูลย่อยเมื่อประกอบเข้าด้วยกันแล้วสาทารถสร้างสัญญาณได้มากกว่า 8 รูปแบบ โดยพื้นฐานการออกแบบมาจากวงจรของ Sprott และวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบ non-autonoous ที่แสดงได้ร่วมทั้งหลักการของระบบเชิงเส้นอันดับ 2 และ 3 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

## 5.1 วงจรอินทีเกรท 2 ตัวในลูป




รูปที่ 5.1 แสดงวงจรอินทีเกรท 2 ตัวในลูป

วงจรประกอบด้วยอินทีเกรทแบบลบสองตัวในลูปถ้าเราจัดให้มีสวิทซ์ที่สามารถเลือกการป้อนกลับที่ออปแอมป์ OA3 แล้วเราสามารถเขียนสมการสเตทได้ถ้าหากสวิทซ์อยู่ที่ตำแหน่ง A โดย $v_1'$ และ $v_2'$ เป็นแรงดันที่เอาท์พุทออปแอมป์OA1 และ OA3 ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} v'_1 \\ v'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & -\frac{R_{f1}}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \qquad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อสวิทซ์อยู่ที่ตำแหน่ง B

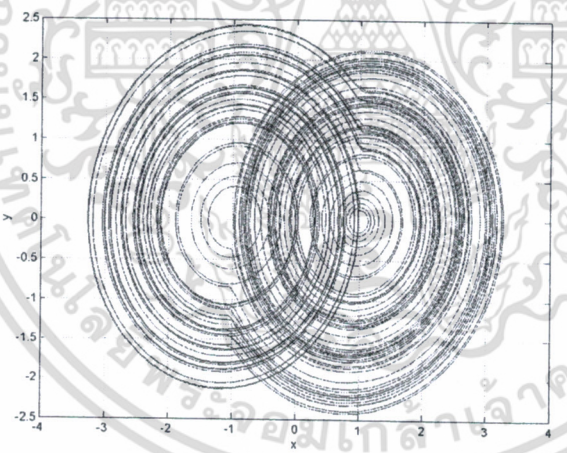
$$\begin{bmatrix} v'_1 \\ v'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & \frac{R_{f_2}}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \tag{5.2}$$

**5.2 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่อยู่บนพื้นฐานของวงจรอินทีเกรท 2 ตัวในลูป**

**1 ระบบของ P.A Cook** [31]

แสดงสมการสเตทได้โดยระบบประกอบด้วยระบบไม่เสถียรอันดับสองและตัวป้อนกลับแบบ Hysteresis

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ hys(x) \end{bmatrix} \tag{5.3}$$




รูปที่ 5.2 แสดงการจำลองระบบ 5.3

**2 ระบบของ Ozoguz, S & Elwakil** [32]

เป็นระบบ Non-autonomous ประกอบด้วยระบบเสถียรอันดับสองและตัวป้อนกลับแบบ Heviside พร้อมด้วยสัญญาณขับจากภายนอกแสดงระบบได้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ f(x) + f_s(\omega t) \end{bmatrix}. \tag{5.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3 ระบบของ Sportt**

สำหรับระบบของ Sprott ที่แสดงในบทที่ 4 เป็นระบบที่ประกอบด้วยระบบไม่เสถียรอันดับสามตัวป้อนกลับแบบSignum

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f(x) \end{bmatrix}. \qquad (5.5)$$

โดยระบบมีระบบย่อยอันดับสองที่สเตท $y$-$z$ เราสามารถปรับปรุงระบบให้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f(x) \end{bmatrix}. \qquad (5.6)$$

โดย $\alpha$ เป็นพารามิเตอร์ bifurcation มีค่าอยู่ระหว่าง [0.1,0.3].และสามารถปรับค่าระบบย่อย $x,y$ ใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & \alpha & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_p(t) \\ 0 \\ f(x)+x_p(t) \end{bmatrix}. \qquad (5.7)$$

| แบบ Nonlinear | Nonlinear function | นิยาม |
|---|---|---|
| 1 | Heaviside | $H(x)=\begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$ |
| 2 | Signum | $\operatorname{sgn}(x)=\begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$ |
| 3 | Hysteresis | $hys(x)=\begin{cases} +1, & -1 < x < \infty \\ -1, & -\infty < x < 1 \end{cases}$ |
| 4 | Saturation | $sat(x)=\begin{cases} 1 & x > L \\ kx & \lvert x \rvert < L \\ -1 & x < -L \end{cases}$ where $L=\left\lvert \frac{x}{k} \right\rvert$, k is an amplifier gain. |

ตาราง 5.1 แสดงฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

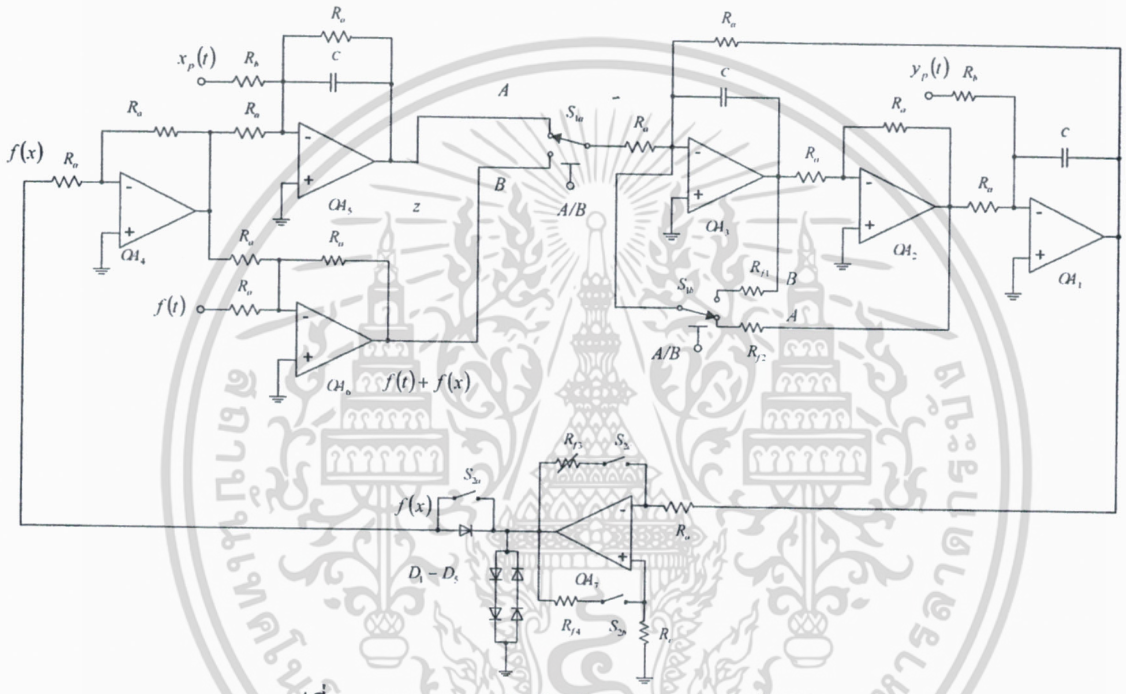
**5.3 ชุดทดลองกำเนิดสัญญาณอลวนได้หลายรูปแบบ**

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้หลายรูปแบบที่ออกแบบขึ้นแสดงได้ดังรูป 5.3 โดยวงจรประกอบด้วยโมดูลดังนี้

5.1 วงจรอินทีเกรท 2 ตัวในลูป OA1-3

5.2 วงจรอินทีเกรทเตอร์อันดับ 1 และวงจรบวกสัญญาณ OA4-OA6

5.3 วงจรสร้างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น OA7



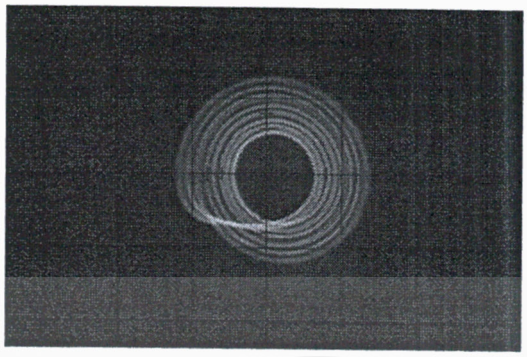

รูปที่ 5.3 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้หลายรูปแบบ

| Function | S2a | S2b | S2c |
|---|---|---|---|
| Heaviside | off | off | off |
| Signum | on | off | off |
| Saturation | on | off | on |
| Hysteresis | on | on | off |

ตารางที่ 5.2 การสวิทซ์วงจรสร้างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น OA7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**5.4 ผลการทดลอง**

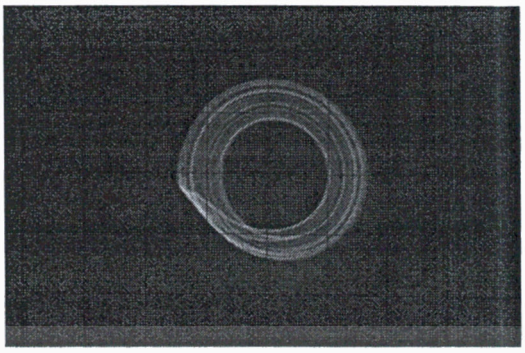


รูปที่ 5.3 .1 ใช้ Heaviside function

รูปที่ 5.3.2 ใช้signum function

รูปที่ 5.3.3 ใช้ hysteresis function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

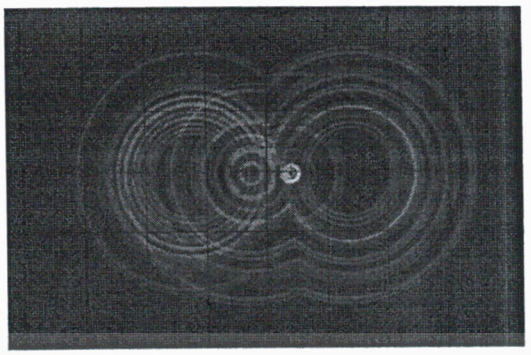


รูปที่ 5.3.4 ใช้saturate function gain $k = 5.2$

ใช้รูปที่ 5.3.5 saturate function gain $k = 7$

รูปที่ 5.3.6 ใช้ using heaviside function โดยมี driving pulse signal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.7 ใช้signum function โดยมี driving pulse signal

รูปที่ 5.3.8 ใช้using signum function โดยมี driving sinusoidal signal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] E. N. Lorenz, "Deterministic non-periodic flow," *J. Atmospheric Science*, vol. 20, pp. 130-141, 1963.

[2] O.E. Rössler, "An equation for continuous chaos," *Phys. Lett. A*, vol. 57, pp. 397–398, 1976.

[3] O.E. Rössler, "An equation for hyperchaos," *Phys. Lett. A*, vol. 71, pp. 155–157, 1979.

[4] G. Chen and X. Dong, From Chaos to Order: Methodologies, Perspectives and applications, World Scientifics, Singapore, 1998.

[5] L.O. Chua, M. Komuro and T. Matsumoto, "The double scroll family," *IEEE Trans Circuits Syst.*, vol. 33 , pp. 1072–1118, 1986.

[6] T. Matsumoto, L.O. Chua and K. Kobayashi, "Hyperchaos: laboratory experiment and numerical confirmation," *IEEE Trans Circuits Syst.*, vol. 33 , pp. 1143–1147, 1986.

[7] L.M. Pecora and T.L. Carroll, "Synchronization in chaotic systems," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, pp. 821–823, 1990.

[8] K.M. Cuomo and A.V. Oppenheim, "Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communication," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, pp. 65–68, 1993.

[9] T. Yang, C.W. Wu and L.O. Chua, Cryptography based on chaotic systems, *IEEE Trans. Circuits Syst.-I: Fundam. Appl* ., vol. 44 , pp. 469–472, 1977.

[10] M. Itoh, "Spread spectrum communication via chaos," *Int. J. Bifurcation Chaos*, vol. 9, pp. 155–213, 1996.

[11] M.E. Yalçin, J.A.K. Suykens and J. Vandewalle, "True random bit generation from a double scroll attractor," *IEEE Trans. Circuits. Syst.- I,* vol. 51 , pp. 1395–1404, 2004.

[12] G. Chen, and T. Ueta, "Yet another chaotic attractor," *Int. J. Bifurcation Chaos*, vol. 9, pp. 1465-1466, 1999.

[13] J. Lü, G. Chen, D. Cheng and S. Čelikovský, "Bridge the gap between the Lorenz system and the Chen system," *Int. J. Bifurcation Chaos*, vol. 12, pp. 2917–2926, 2002.

[14] A.S. Elwakil, S. Özogus and M.P. Kennedy, "Creation of a complex butterfly attractor using a novel Lorenz-type system", *IEEE Trans. Circuits Syst.-I*, vol. 49, pp. 527–530, 2002.

[15] J.C. Sprott, "Simple chaotic systems and circuits", *Am. J. Phys.*, vol. 68 pp. 758–763, 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[16] J.A.K. Suykens, A. Huang and L.O. Chua, A family of *n*-scroll attractors from a generalized Chua's circuit," *AEU. Int. J. Electron. Commun.*, vol. 51, pp. 131–138, 1997.

[17] K.S. Tang, G.Q. Zhong, G. Chen and K.F. Man, "Generation of *n*-scroll attractors via sine function, " *IEEE Trans. Circuits Syst.-I*, vol. 48, pp. 1369–1372, 2001.

[18] Y. Li, W.K.S. Tang and G. Chen, "Hyperchaos evolved from the generalized Lorenz equation," *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 33, pp. 235–251, 2005.

[19] A. M. Chen, J. A. Lu, J. Lü and S. M. Yu, "Generating hyperchaotic Lü attractor via state feedback Control," *Physica A*, vol. 364, pp.103-110, 2006.

[20] S. M. Yu, J. Lü and G. Chen, "A family of n-scroll hyper-chaotic attractors and its realizations," *Phys. Lett. A*, 2007, vol. 364, 244-251, 2007.

[21] K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Implement of A true Random Number Generator Using Chen's Attractor," *Proc. Int. Conf. Robot, Vision, Information,and Signal Processing*, pp.781-784, 2005.

[22] A. Jansri, K. Klomkarn an P.Sooraksa, "Further investigation on trajectory of chaotic guiding signals for robotic systems," *Proc. Int. Symp. IEEE Communications and Information Technology*, pp.1166 – 1170, 2004.

[23] A.Jansri, K. Klomkarn and P. Sooraksa, "On comparison of attractors for chaotic mobile robots," *Proc. IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2536 – 2541, 2004.

[24] K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Implementation on "NO CPU" Chaotic robot," *Proc. the 5th Asian Symposium on Applied Electromagnetics and Machanics*, 2005.

[25] C. Chanvech, K. Klomkarn and P.Sooraksa, "Combined Chaotic Attractor Mobile Robots,"*Int. Joint Conf. SICE-ICASE*, pp. 3079 – 3082, 2006.

[26] S. Sakorntanant, K. Klomkarn, T. Thossansin, and P. Sooraksa, "Chaotic Mixing Biodiesel," *Inter. Conf. on Applied Science*, Vientiane, Loas, 2006.

[27] Aziz-Alaoui M.A., Differential equations with multi-spiral attractors, Int. *J. Bifurcation Chaos*, vol. 16, pp. 775-858, 2006.

[28] S. Benítez, L. Acho, R. J.R. Guerra, "Chaotification of the Van der Pol System Using Jerk Architecture," *IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer* Sciences, vol. E89-A, pp. 1088-1091, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[29] A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney and J.A. Vastano, "Determining Lyapunov exponents from a time series," *Physica D* , vol. 16 pp. 285–317, 1985.

[30] F. Kaiser, Coherent oscillation in biological systems: interaction with extremely low frequency fields, *Radio Sci.*, vol.17, pp. 17S, 1982.

[31] P.A. Cook [1985] "Simple feedback systems with chaotic behavior," *Syst. Contr. Lett.*, vol. 6, pp. 223–227.

[32] Ozoguz, S & Elwakil, A.S. [2004] "On the realization of circuit-independent nonautonomous pulse-excited chaotic oscillator circuits," *IEEE Trans. Circuits Syst.-II,* **51**, pp. 552-556.

หนังสือเป็นสมบัติของท่าน
โปรดช่วยกันรักษา
www.lib.kmitl.ac.th
สำนักหอสมุดกลาง โทร. 0 2329 8231

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้