

วงจรถ้าเน็ดสัณญานอลวนด้วยแบบจำลองการกระตุกรูปแบบกระแส

โดยใช้โอทีเอ

JERK MODEL CURRENT-MODE CHAOTIC OSCILLATOR BASED ON OTA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2564

KMITL-2021-EN-M-010-036

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

JERK MODEL CURRENT-MODE CHAOTIC OSCILLATOR BASED ON OTA



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021
KMUTL-2021-EN-M-010-036**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2021
FACULTY OF ENGINEERING
KINGMONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยแบบจำลองการกระตุ้นรูปแบบ กระแสโดยใช้โอทีเอ
นักศึกษา	นายคุณานนต์ ณะระวานิช
รหัสประจำตัว	62601093
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) โดยใช้โครงสร้างตามแบบจำลอง Jerk ร่วมกับการออกแบบฟังก์ชันสัญญาณแบบดัดแปลง (Modified Signum) วงจรที่ออกแบบมีองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง และฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ทำงานในโหมดกระแสโดยใช้ MO-OTAs 6 ตัว และตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ 3 ตัว วงจรสามารถกำเนิดสัญญาณได้ด้วยสัมประสิทธิ์ k เพียงหนึ่งค่า สามารถปรับลักษณะของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้จากค่าคงที่ด้วยการปรับกระแสไบอัส เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณปรับได้จาก Quality factor (k) ของวงจรถองความถี่ต่ำผ่าน การปรับค่าคงที่ของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นพร้อมกับค่า k จำลองผลด้วยโปรแกรม PSpice และ โปรแกรม MATLAB พบว่าวงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง นอกจากนั้นผลการกำเนิดสัญญาณสามารถยืนยันช่วงการเกิดสัญญาณอลวน ได้ด้วยผลทางทฤษฎีการแยกไปสองทาง (The Bifurcation) อีกทั้งยังมีผลการทดลองจริง โดยใช้ OTA ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ พบว่า ผลการทดลองจริงสอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice และ โปรแกรม MATLAB ทุกประการ

Thesis	Jerk Model Current-Mode Chaotic Oscillator based on OTA
Student	Mr.Khunanon Karawanich
Student ID	62601093
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pipat Prommee

ABSTRACT

This thesis presents a Chaotic Oscillator using a jerk equation in combination with the nonlinear modified signum function. The proposed circuit consists of three parts, a lossless integrator, a second-order low-pass filter, and a nonlinear function that operates in current-mode using MO-OTAs and grounded capacitors. The chaos circuit is achieved by adjusting only one coefficient (k). The nonlinear function characteristics signum with constant can be adjusted from the bias currents. The oscillation condition can be adjusted from the quality factor (k) of the low-pass filter. The simulation of the constant adjustment with k , are confirmed the operation of the circuit with the PSpice and MATLAB program. The MATLAB and PSpice simulation results found that the circuit can show a chaos signal. Also, they found that the chaos signal is operated specific range confirmed by the Bifurcation graph. The commercially available OTA has also carried out the experimental results. The experimental results were found to be consistent with PSpice and MATLAB simulation results in all respects.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. พิพัฒน์ พรหมมี อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ช่วยกรุณาให้คำแนะนำ แนวทางในการแก้ไขปัญหา สอนให้ทำงานหนักและมีหลักการคิดในการดำเนินชีวิตอย่างมีคุณภาพ คอยติดตามดูแลงานไม่เคยขาดตกบกพร่อง รวมทั้งฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิทยานิพนธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและราบรื่นตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ทั้งนี้จะขอนำสิ่งที่อาจารย์ที่ปรึกษาได้สั่งสอนไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนตนและส่วนรวมให้ได้มากที่สุด

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนคณาจารย์ในหลักสูตรวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ประสบการณ์ตลอดจนให้คำชี้แนะ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา (นางอันธิกา คระระวานิช และ นายทินภัทร์ คระระวานิช) ที่ให้กำเนิดชีวิตและเลี้ยงดูให้ผู้เขียนเติบโตขึ้นมา ทั้งยังสนับสนุนการศึกษาทั้งด้านกำลังทรัพย์และกำลังใจให้กับผู้เขียนตลอดมา รวมถึงน้องสาว (นางสาวพรธิศยา คระระวานิช) ที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ชาวห้อง T-108A (T112) ที่คอยให้คำปรึกษาหารือ แลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางวิชาการตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนได้ศึกษาอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายพีรณย์ เพียรพิชยพงศ์ นายณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย และ นายณัฐพงศ์ วงศ์พร้อมมูล ที่ได้ช่วยเหลือ แนะนำวิธีการศึกษา ให้ความรู้แลกเปลี่ยนประสบการณ์และร่วมแสดงความคิดเห็นตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านไม่มากก็น้อย หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้เขียนต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คุณานนต์ คระระวานิช

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 หลักการใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ระบบอลวน	7
2.1.1 ระบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear system).....	7
2.1.2 ระบบพลวัต (Dynamic system)	7
2.1.3 ความไวต่อสถานะเริ่มต้น (Sensitive to initial condition)	8
2.2 แบบจำลองต้นแบบที่ใช้สร้างวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณอลวน.....	8
2.2.1 Lorenz model	8
2.2.2 Rossler model.....	11
2.2.3 Chua model.....	12
2.2.4 Jerk model.....	14
2.3 ทฤษฎีและหลักการกำเนิดสัญญาณ.....	19
2.3.1 การวิเคราะห์ฟังก์ชันโครงข่ายสำหรับการกำเนิดสัญญาณ	19
2.3.2 หลักการกำเนิดสัญญาณพื้นฐาน	21
2.3.3 หลักการกำเนิดโพลีโนเมียลอันดับสาม	22
2.4 ทฤษฎีการแยกไปสองทาง (The Bifurcation).....	24
2.4.1 ช่วงการเกิดทวิค่า (Period doubling).....	26

สารบัญ (ต่อ)

2.4.2 การแกว่งรูปแบบอลวน (Chaos aperiodic)	30
2.5 ไอทีเอ.....	31
2.5.1 ไอทีเอแบบมอสทรานซิสเตอร์	32
2.6 หลักการกรองความถี่ต่ำผ่าน	33
บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
3.1 บทนำ	37
3.2 แบบจำลองที่ใช้เป็นแนวทางในการศึกษาของงานวิจัย	37
3.2.1 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบ Lorenz model	37
3.2.2 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบ Rossler model.....	42
3.2.3 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบ Chua model	46
3.2.4 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบ Jerk model.....	51
3.3 สรุป	58
บทที่ 4 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ด้วยแบบจำลองการกระตุ้นรูปแบบกระแสโดยใช้ไอทีเอ.....	60
4.1 บทนำ	60
4.2 แบบจำลองที่ใช้สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนของงานวิจัย.....	61
4.3 ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	64
4.4 Bifurcation diagram	64
4.5 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน.....	66
4.6 ผลการทดลอง.....	69
4.6.1 ผลจำลองการทำงาน MATLAB.....	69
4.6.1.1 ผลจำลองการทำงาน Bifurcation.....	69
4.6.1.2 ผลจำลองการทำงานการเกิดสัญญาณอลวนพร้อมแสดงการปรับค่าคงที่ A และ B จากฟังก์ชัน Signum	70
4.6.2 ผลจำลองการทำงาน Pspice.....	77
4.7 ผลจำลองการทำงานเปรียบเทียบการแสดงผล ตัวดึงดูดอลวน (Chaos Attractor) และ แผนภาพการแยกไปสองทาง (The Bifurcation diagram)	88

สารบัญ (ต่อ)

4.8. ผลจำลองการทำงานของวงจรถ้าการต่อวงจรถริง	91
4.9. บทสรุป	95
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	96
5.1 บทสรุปการวิจัย	96
5.2 ข้อเสนอแนะ	97
เอกสารอ้างอิง	98
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก. โปรแกรมจำลองผล Jerk model สำหรับ MATLAB	104
ภาคผนวก ข. โปรแกรมจำลองผลทางทฤษฎี The Bifurcation สำหรับ MATLAB	105
ภาคผนวก ค. โปรแกรม Pspice สำหรับจำลองผลการทำงานของวงจรถริงกำเนิดสัญญาณอลวน	106
ภาคผนวก ง. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ระหว่างศึกษา	109
ประวัติผู้เขียน	115

สารบัญตาราง

ตารางที่

1.1 แสดงการปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับกำเนิดสัญญาณอลวน.....	3
2.1 แสดง State model และเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ที่ใช้ในตัวอย่างของ Sportt เพื่อเปรียบเทียบลักษณะตัวดึงดูด (Attractor).....	15
2.2 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_1 ถึง x_7 ($k < 1$).....	26
2.3 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_1 ถึง x_7 ($k = 1.1$).....	27
2.4 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_1 ถึง x_{10} ($k = 2.7$).....	28
2.5 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_4 ถึง x_{13} ($k = 3$).....	29
2.6 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_1 ถึง x_{10} ($k = 3.8$).....	30
3.1 ค่า RC ที่ใช้ในวงจรหลัก.....	54
3.2 เปรียบเทียบการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนจากงานวิจัยที่นำเสนอ.....	59
5.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน.....	96

สารบัญรูป

รูปที่

2.1 การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมความเป็นอวกาศในลักษณะของสัญญาณและตัวดึงดูดเมื่อมีการปรับพารามิเตอร์ λ	9
2.2 State Block diagram ของ Lorenz.....	10
2.3 State Block diagram ของ Rössler.....	11
2.4 วงจรกำเนิดสัญญาณอวกาศของ Chua	12
2.5 ลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นไดโอด Chua	13
2.6 ตัวดึงดูดอวกาศของแบบจำลอง Chua	13
2.7 State Block diagram ของ Chua.....	14
2.8 แสดงลักษณะตัวดึงดูดอวกาศของ (ก) และ (ค) ใช้ความไม่เป็นเชิงเส้น 1 พจน์ (ข) และ (ง) ใช้ความไม่เป็นเชิงเส้น 2 พจน์.....	15
2.9 State Block diagram ของ Jerk model	18
2.10 ตัวอย่างโพลและซีโรของฟังก์ชันโครงข่าย.....	19
2.11 กราฟฟังก์ชันลู่ออก.....	20
2.12 ตำแหน่งโพลและซีโรของฟังก์ชันที่เกิดการกำเนิดสัญญาณ.....	20
2.13 กราฟฟังก์ชันการกำเนิดสัญญาณ.....	21
2.14 ระบบป้อนกลับแบบบวก.....	21
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์สมการ Logistic map.....	24
2.16 แผนภาพการแยกไปสองทาง (Bifurcation diagram).....	25
2.17 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาพารามิเตอร์ $k < 1$	26
2.18 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาพารามิเตอร์ $k = 1.1$	27
2.19 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาพารามิเตอร์ $k = 2.7$	27
2.20 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาพารามิเตอร์ $k = 3$	28
2.21 แสดงเส้นวงโคจรที่พารามิเตอร์ $k = 3$	28
2.22 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาพารามิเตอร์ $k = 3.4$	29
2.23 แสดงเส้นวงโคจรที่พารามิเตอร์ $k = 3.4$	29
2.24 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาพารามิเตอร์ $k = 3.8$	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	
2.25 แสดงเส้นวงโคจรที่พารามิเตอร์ $k = 3.8$	30
2.26 แสดงวงจรวอร์ทีเอ (ก) สัญลักษณ์ และ (ข) วงจรสมมูล	32
2.27 โครงสร้างโอทีเอหลายเอาต์พุตแบบมอสทรานซิสเตอร์	33
2.28 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง	
(ก) พล็อตขนาดของ $\frac{\alpha}{s + \alpha}$	
(ข) พล็อตเฟสของ $\frac{\alpha}{s + \alpha}$	36
2.29 คุณสมบัติของวงจกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF)	36
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันรูปแบบแรงดัน ด้วยแบบจำลอง Lorenz	38
3.2 แสดงลักษณะสัญญาณออสซิลเลชันที่เอาต์พุต x, y, z จากวงจรแบบจำลอง Lorenz	40
3.3 ลักษณะตัวดึงดูดออสซิลเลชัน 2 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Lorenz	41
3.4 ลักษณะตัวดึงดูดออสซิลเลชัน 3 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Lorenz	41
3.5 ลักษณะตัวดึงดูดออสซิลเลชัน 3 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Lorenz	43
3.6 แสดงลักษณะสัญญาณออสซิลเลชันที่เอาต์พุต x, y, z จากวงจรแบบจำลอง Rössler	44
3.7 ลักษณะตัวดึงดูดออสซิลเลชัน 2 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Rössler	44
3.8 ลักษณะตัวดึงดูดออสซิลเลชัน 3 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Rössler	45
3.9 เปรียบเทียบลักษณะการแกว่งของคาบสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos Periodic) ในหนึ่งช่วงเวลาที่เท่ากัน	
(ก) ลักษณะสัญญาณออสซิลเลชันของ Rössler	
(ข) ลักษณะสัญญาณออสซิลเลชันของ Lorenz	45
3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันพื้นฐาน ของ Leon Ong Chua	46
3.11 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันดัดแปลงจากวงจรต้นแบบของ Chua	48
3.12 ลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้จากไดโอด Chua พล็อตแกน $v - i$	49
3.13 แสดงลักษณะสัญญาณออสซิลเลชันจากวงจรแบบจำลอง Chua	50
3.14 ลักษณะตัวดึงดูดออสซิลเลชัน 2 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Chua	50
3.15 ลักษณะตัวดึงดูดออสซิลเลชัน 3 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Chua	51
3.16 State Block diagram ของ Jerk model	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

3.17 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนจากแบบจำลอง Jerk โดยมีการป้อนกลับด้วยฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น $G(x)$	52
3.18 วงจรฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ (Absolute).....	53
3.19 วงจรฟังก์ชัน Signum.....	54
3.20 แสดงลักษณะสัญญาณอลวนจากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นค่าสัมบูรณ์ โดยกำหนด $B=1, C=2$ และ $k=0.6$	55
3.21 ลักษณะตัวดึงดูดอลวน 2 มิติ จากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นค่าสัมบูรณ์ โดยกำหนด $B=1.2, C=2$ และ $k=0.6$	55
3.22 ลักษณะตัวดึงดูดอลวน 3 มิติ จากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นค่าสัมบูรณ์ โดยกำหนด $B=1, C=2$ และ $k=0.6$	56
3.23 แสดงลักษณะสัญญาณอลวนจากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum โดยกำหนด $B=1.2, C=4.5$ และ $k=0.6$	56
3.24 ลักษณะตัวดึงดูดอลวน 2 มิติ จากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum โดยกำหนด $B=1.2, C=4.5$ และ $k=0.6$	57
3.25 ลักษณะตัวดึงดูดอลวน 3 มิติ จากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum โดยกำหนด $B=1.2, C=4.5$ และ $k=0.6$	57
4.1 ตัวอย่างลักษณะตัวดึงดูดอลวนของแต่ละฟังก์ชัน.....	62
4.2 แบบจำลอง Jerk ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ k	62
4.3 บล็อกไดอะแกรมแยกส่วนของแบบจำลอง Jerk.....	63
4.4 ตัวอย่างฟังก์ชันไม่เชิงเส้น Signum.....	64
4.5 แสดงการแยกไปสองทางของ Logistic Map.....	65
4.6 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย.....	66
4.7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง.....	67
4.8 วงจรฟังก์ชัน Signum สร้างจากโอทีเอ.....	67
4.9 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบกระแสดโดยใช้ OTA.....	68
4.10 แผนภาพการแยกไปสองทาง (The Bifurcation diagram).....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

4.11 แสดงสัญญาณทั้ง 3 เอาต์พุตของ state x, y, z จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=0.9, B=0.3$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB.....	71
4.12 แสดงลักษณะตัวดึงดูคอลลวนของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=0.9, B=0.3$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D $x-y-z$ (b) $x-y$ (c) $z-y$ and (d) $z-x$	71
4.13 แสดงสัญญาณทั้ง 3 เอาต์พุตของ state x, y, z จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1, B=0.3$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB.....	72
4.14 แสดงลักษณะตัวดึงดูคอลลวนของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1, B=0.3$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D $x-y-z$ (b) $x-y$ (c) $z-y$ and (d) $z-x$	72
4.15 แสดงสัญญาณทั้ง 3 เอาต์พุตของ state x, y, z จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1.1, B=0.3$ และ $k=0.7$ โดยใช้ MATLAB.....	73
4.16 แสดงลักษณะตัวดึงดูคอลลวนของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1.1, B=0.3$ และ $k=0.7$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D $x-y-z$ (b) $x-y$ (c) $z-y$ and (d) $z-x$	74
4.17 แสดงสัญญาณทั้ง 3 เอาต์พุตของ state x, y, z จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1.2, B=0.3$ และ $k=0.8$ โดยใช้ MATLAB.....	75
4.18 แสดงลักษณะตัวดึงดูคอลลวนของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1.2, B=0.3$ และ $k=0.8$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D $x-y-z$ (b) $x-y$ (c) $z-y$ and (d) $z-x$	75
4.19 แสดงสัญญาณทั้ง 3 เอาต์พุตของ state x, y, z จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1, B=0.2$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB.....	76
4.20 แสดงลักษณะตัวดึงดูคอลลวนของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1, B=0.2$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D $x-y-z$ (b) $x-y$ (c) $z-y$ and (d) $z-x$	77
4.21 ผลการตอบสนองของวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย.....	78
4.22 ผลการตอบสนองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง.....	78
4.23 ผลการตอบสนองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ที่ $I_{B1}=I_{B2}=100\mu A$ และ $kI_B=60\mu A$ ($k=0.6$) โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ $0^\circ C, 27^\circ C$ และ $50^\circ C$	79
4.24 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Signum โดยกำหนด $I_B=100\mu A, AI_B=100\mu A$ และ $BI_B=30\mu A$	79
4.25 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Signum โดยกำหนด $I_B=100\mu A, BI_B=30\mu A$ ($B=0.3$) และปรับกระแสไบอัสที่ค่า $AI_B=100\mu A$ ($A=1$), $AI_B=80\mu A$ ($A=0.8$), $AI_B=60\mu A$ ($A=0.6$).....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

4.26 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Signum โดยกำหนด $I_B=100\mu\text{A}$, $AI_B=100\mu\text{A}$ ($A=1$) และปรับกระแสไบอัสที่ค่า $BI_B=40\mu\text{A}$ ($B=0.4$), $BI_B=30\mu\text{A}$ ($B=0.3$), $BI_B=20\mu\text{A}$ ($B=0.2$).....	80
4.27 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k=0.6$, $A=1$ และ $B=0.3$	81
4.28 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Signum โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 0°C , 27°C และ 50°C ..	82
4.29 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k=0.6$, $A=0.9$ และ $B=0.3$	83
4.30 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k=0.7$, $A=1.1$ และ $B=0.3$	85
4.31 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k=0.8$, $A=1.2$ และ $B=0.3$	87
4.32 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k=0.6$, $A=1$ และ $B=0.2$	88
4.33 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์เกินช่วงกำเนิดสัญญาณ (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k\leq 0.5$, $A\geq 1.4$ และ $B\geq 0.5$	90
4.34 แสดงแผนภาพการแยกไปสองทางของตำแหน่ง w โดยมีพารามิเตอร์ k ควบคุม.....	91
4.35 แสดงภาพลำดับเฟสการเกิดตัวดึงดูอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O3} และ I_{O2} โดยใช้การปรับพารามิเตอร์ k ที่ $IB_3=kI_B$ คือ (a) $kI_B=90\mu\text{A}$, (b) $kI_B=80\mu\text{A}$, (c) $kI_B=60\mu\text{A}$	92
4.36 แสดงลำดับการเกิดสัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O3} โดยปรับกระแสไบอัสที่ (a) $I_{B3}=kI_B=100\mu\text{A}$ ($k=1$), (b) $I_{B3}=kI_B=90\mu\text{A}$ ($k=0.9$), (c) $I_{B3}=kI_B=80\mu\text{A}$ ($k=0.8$) และ (d) $I_{B3}=kI_B=60\mu\text{A}$ ($k=0.6$).....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

4.37 แสดงรูปวงจร PCB กำเนิดสัญญาณอลวน ที่สร้างจากอุปกรณ์แอกทีฟไอทีเอ LT1228

(a) Datasheet LT1228

(b) วงจรกำเนิดสัญญาณอลวน

(c) ภาพรวมวงจร..... 93

4.38 แสดงผล Magnitude ของวงจรกรองตัวถี่ต่ำผ่านอันดับสอง(LPF) ใช้ LT1228 โดยปรับ kI_B94

4.39 แสดงผลฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum ที่ใช้ในวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน.....95

4.40 แสดงลักษณะตัวตั้งคู่ออลวน เมื่อปรับกระแสไบอัส (a) $kI_B = 90\mu A$, (b) $kI_B = 80\mu A$, (c) $kI_B = 60\mu A$95

4.41 แสดงผลลักษณะสัญญาณอลวน ทั้ง 3 เอาต์พุตกระแสและลักษณะตัวตั้งคู่ออลวน ทั้ง 3 ด้านของวงจร โดยกำหนด $A=1, B=0.3$ และ $k=0.6$ (a) สัญญาณอลวน (b) $I_{O2}:I_{O3}$ (c) $I_{O2}:I_{O1}$ (d) $I_{O3}:I_{O1}$ 97



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน มีความสำคัญและเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านโทรคมนาคม ในเรื่องความปลอดภัยการเข้ารหัสด้านการสื่อสาร [1] ด้านอุตุนิยมวิทยา ในการพยากรณ์อากาศ [2] ด้านดาราศาสตร์ ในการจำลองวิถีวงโคจรของดาวเคราะห์ [3] รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนชุดแรก ถูกคิดค้นโดย Edward Norton Lorenz อยู่ในแบบสมการอนุพันธ์อันดับสาม เป็นแบบจำลองต้นแบบทางคณิตศาสตร์ที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของสัญญาณอลวน แต่ยังไม่ถูกออกแบบเป็นวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ [4] จากนั้น Rossler ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อลดความซับซ้อนรูปแบบของสมการ โดยลดพารามิเตอร์ควบคุมและลดพจน์ตัวแปรของสมการ [5] จนต่อมวงจรรีเลย์ทรอนิกส์วงจรรแรกของ Leon Ong Chua แสดงการเกิดสัญญาณอลวน ถูกค้นพบในห้องวิจัยซึ่งยังไม่มีทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ [6] โดยมีการใช้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (Ordinary Differential Equations) สามสมการ ต่อมาวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนแบบโคลพิทส์ (Chaotic Colpitts Oscillator) ได้นำเสนอโดย Kennedy [7] ค้นพบว่าวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปแบบไซน์สามารถเกิดสัญญาณอลวนได้ จากนั้น Elwakil และ Kennedy ได้ใช้ กระบวนการกึ่งระบบ มาดัดแปลงวงจรถูกกำเนิดสัญญาณไซน์เป็นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน โดยมีวงจรถูกกำเนิดสัญญาณไซน์เป็นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณหลักและมีการใช้ อุปกรณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นต่อจากภายนอก เป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน (ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ) และไดโอด เพื่อสร้างลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถทำให้วงจรถูกกำเนิดสัญญาณไซน์สามารถกำเนิดสัญญาณอลวนได้ [8] นอกจากนี้ยังมีวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน อีกหลายวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบ Wein-bridge [9] วงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบ Twin-T [10] วงจรถูกกำเนิดสัญญาณด้วย CFOA (Current Feedback OPAMP) [11] เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการคิดค้นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน ได้อย่างหลากหลาย วงจรถูกกำเนิดสัญญาณของ Elwakil และ Kennedy เป็นที่น่าสนใจเนื่องจากมีการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณที่ง่ายและมีอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นที่แยกเป็นอิสระ บางส่วนมีการใช้ CFOA (Current Feedback OPAMP) [12] ต่อร่วมกับความต้านทาน และ ตัวเก็บประจุ เป็นโครงสร้างตัวตั้งจุดอลวน และ โครงสร้างตัวตั้งจุดอลวนใน 6 รูปแบบ [13] ซึ่งวงจรถูกกำเนิดสัญญาณในอดีตรังมีการใช้แบบจำลองที่ซับซ้อน เนื่องจากมีพารามิเตอร์ควบคุมในการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณหลายตัว มีพจน์ของตัวแปรจากแบบจำลองหลายพจน์ มีการสร้างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องใช้ตัวคูณแอนะล็อก และวงจรถูกกำเนิดสัญญาณไม่สามารถปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยงานของ Elwakil และ Kennedy ยังไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้ เนื่องจากถูกกำหนดด้วยลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้มีข้อจำกัดในการออกแบบสัญญาณอลวน

จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ในแบบต่างๆที่กล่าวมา ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้แบบจำลองการกระตุ้นของ Sportt [14] เป็นแบบจำลองต้นแบบในการสร้างวงจร ที่มีการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณที่ง่ายและมีวงจรไม่เป็นเชิงเส้นที่แยกเป็นอิสระ ใช้สมการอนุพันธ์อันดับสามเพียงสมการเดียวในรูปแบบการกระตุ้นกับการปรับเงื่อนไขกำเนิดสัญญาณด้วยสัมประสิทธิ์ k เพียงตำแหน่งเดียว วงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นสามารถออกแบบได้หลากหลาย โดยสามารถกำหนดลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันสัญลักษณ์ เช่น ฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ (Absolute) ฟังก์ชัน ($\tanh(x)$) ฟังก์ชัน ($\sin(x)$) ฟังก์ชัน หรือ ฟังก์ชันเครื่องหมาย ($\text{sgn}(x)$) เป็นต้น ทำให้ออกแบบลักษณะสัญญาณอลวนได้หลายรูปแบบ สามารถปรับเงื่อนไขวงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อปรับลักษณะของฟังก์ชันกับเงื่อนไขกำเนิดสัญญาณของวงจรหลักที่เป็นอิสระต่อกัน มีการออกแบบวงจรด้วยอุปกรณ์พื้นฐานแอกทีฟโอทีเอ ทำให้สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับกระแสไบอัส ไม่มีการใช้ความต้านทาน ใช้เพียงตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ ทำให้ลดอุปกรณ์แพสซีฟในวงจร

1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างวงจรมีกำเนิดสัญญาณอลวน โดยใช้โครงสร้างแบบจำลองการกระตุ้นของ sportt ร่วมกับฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบดัดแปลง (Modified Signum) ในการกำเนิดสัญญาณทำได้โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์เพียงหนึ่งค่า การออกแบบวงจรมีกำเนิดสัญญาณอลวน จะทำงานในรูปแบบกระแสโดยใช้โอทีเอ เบอร์ LT1228 และ ตัวเก็บประจุเท่านั้น ไม่มีการใช้ความต้านทาน สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยปรับเงื่อนไขการเกิดสัญญาณสัมประสิทธิ์ค่า k ด้วยการปรับ Quality factor (Q) ที่ตำแหน่งวงจรรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานความถี่ของวงจร และสามารถปรับค่าคงที่ A, B ของฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบดัดแปลง ด้วยการปรับกระแสไบอัสที่ OTA_5, OTA_6 จากวงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น มีรูปแบบของวงจรที่ไม่ซับซ้อนจากการใช้แบบจำลองการกระตุ้นที่มีโครงสร้าง State Block diagram ที่ง่ายต่อการออกแบบปราศจากการใช้ตัวคูณแอนะล็อก และไม่มีการใช้วงจร Summing ในการสร้างจากการใช้อุปกรณ์โอทีเอ มีการออกแบบวงจรจริงนำผลมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice และมีการยืนยันผลการกำเนิดสัญญาณจาก MATLAB ด้วยผลทางทฤษฎีการแยกไปสองทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 หลักการใหม่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

1.3.1 สร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนจากโครงสร้างแบบจำลองการกระตุ้น ด้วยอุปกรณ์แอกทีฟ ไอทีเอ สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์

1.3.2 ออกแบบลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นรูปแบบใหม่ ที่สามารถกำหนดค่าคงที่ A , B ที่ฟังก์ชันเชิงเส้นและฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบดัดแปลง

1.3.3 วงจรสามารถกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีรูปแบบตัวดึงดูด (Chaos Attractor) เป็น 2 วงโคจร (Double scroll) ที่ชัดเจน และไม่ซ้ำกับรูปแบบที่เคยมีมา

1.3.4 วงจรสามารถปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณค่าสัมประสิทธิ์ k ได้ ด้วยการปรับค่า Quality factor (Q) ที่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานความถี่ของวงจร

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งศึกษาถึงการสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน ใช้โครงสร้างตามแบบจำลองการกระตุ้นของ Sportt มุ่งประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง และฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบดัดแปลง วงจรมีการสร้างด้วยอุปกรณ์แอกทีฟ ไอทีเอทำงานในรูปแบบกระแส ใช้ไอทีเอทั้งหมด 12 ตัว ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ 3 ตัว สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรสามารถปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณได้จากตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor : Q) ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง หรือการปรับค่าสัมประสิทธิ์ k โดยมีการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณที่ค่าสัมประสิทธิ์ k ที่ 0.3 ถึง 0.7 เพื่อแสดงช่วงการเกิดสัญญาณอลวน (Route to Chaos) และแสดงการปรับค่าคงที่ A และ B ที่วงจรฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบดัดแปลง พร้อมกับค่าสัมประสิทธิ์ k เพื่อแสดงการปรับขนาด (Amplitude) ของสัญญาณอลวนโดยจะแสดงที่ค่า

ตารางที่ 1.1 แสดงการปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับกำเนิดสัญญาณอลวน

การปรับค่า	A	B	k
ปรับ A	$A=0.9$	$B=0.3$	$k=0.6$
ปรับ A	$A=1$	$B=0.3$	$k=0.6$
ปรับ A และ k	$A=1.1$	$B=0.3$	$k=0.7$
ปรับ A และ k	$A=1.2$	$B=0.3$	$k=0.8$
ปรับ B	$A=1$	$B=0.2$	$k=0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ที่นำเสนอมีการยืนยันคุณสมบัติและประสิทธิภาพการทำงานด้วยการจำลองผลด้วยโปรแกรม Pspice และ MATLAB พร้อมด้วยยืนยันผลจากการต่อวงจรจริง และมีผลทางทฤษฎีการแยกไปสองทาง (The Bifurcation) รองรับ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการปรับค่าการกำเนิดสัญญาณอลวน

1.5 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ของวิทยานิพนธ์ หลักการใหม่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ประกอบด้วย บทนำ พูดถึงความเป็นมาพื้นฐานของนิยาม อลวน ที่ใช้ในงานวิจัย จากนั้นจะกล่าวถึง ระบบอลวน แบบจำลองต้นแบบที่ใช้ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ทฤษฎีและหลักการกำเนิดสัญญาณ ทฤษฎีที่ใช้ในการยืนยันการเกิดสัญญาณอลวนที่ชื่อว่า ทฤษฎีการแยกไปสองทาง อุปกรณ์แอกทีฟพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย โอทีเอ (Operational Transconductance Amplifier: OTA) และหลักการกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่ใช้ปรับค่าได้ของงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึง การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณจากแบบจำลองต่างๆที่เคยมีมาในอดีต พร้อมเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย

บทที่ 4 กล่าวถึง การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนของงานวิจัยที่มีการใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการสร้างกับตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ ออกแบบด้วยแบบจำลองการกระตุ้น โดยในบทจะพูดถึง บทนำ รายละเอียดของแบบจำลองที่ใช้ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น The Bifurcation วิธีการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Pspice และ MATLAB พร้อมด้วยผลการทดลองจากการต่อวงจรจริง และสรุปผลทั้งหมดเพื่อเปรียบเทียบผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมกับวงจรจริง

บทที่ 5 กล่าวถึง บทสรุปและข้อเสนอแนะ ประกอบด้วย บทสรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

วิทยาศาสตร์ (Science) ทำให้มนุษย์สามารถตีความธรรมชาติได้ และในการเข้าใจธรรมชาติ จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองเฉพาะเรื่องเพื่อให้สามารถเข้าใจและศึกษาปรากฏการณ์นั้นๆ จากแบบจำลองได้ง่าย ส่วนใหญ่มักใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่เป็นสมการสร้างขึ้นจากสมองของมนุษย์ เป็นสิ่งที่สามารถพิสูจน์ได้ให้สอดคล้องกันระหว่างความคิดกับธรรมชาติ ซึ่งมีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ที่นักฟิสิกส์ นักวิทยาศาสตร์ และนักวิจัย ใช้กันเสมอมา คือ สังเกตปรากฏการณ์ แปลเป็นสมการ และแก้สมการเหล่านั้น ความสำคัญของขั้นตอนแรกนั้นคือการสังเกตปรากฏการณ์เพื่อทำความเข้าใจองค์ประกอบของปรากฏการณ์นั้น จากนั้นสร้างองค์ความรู้ที่สามารถแปลเป็นแบบจำลองและสมการได้

จุดเริ่มต้นของทฤษฎีความอลวน (Chaos theory) [15] ถูกเริ่มจากผลงานของ Laplace ที่สามารถคำนวณปรากฏการณ์ในอดีตและอนาคตของระบบสุริยะได้ และความแม่นยำในการคำนวณนี้ขึ้นอยู่กับ การทราบเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) เป็นความท้าทายอย่างมากของนักฟิสิกส์ ดังนั้นเพื่อศึกษาวิวัฒนาการของปรากฏการณ์นี้ จึงต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามกฎของฟิสิกส์เพื่อแสดงให้เห็นจำนวนของพารามิเตอร์ที่จำเป็นและเพียงพอต่อการศึกษาลักษณะของระบบนี้ (แบบจำลองมักอยู่ในรูปแบบสมการอนุพันธ์) จากนั้นเราจึงจะสามารถกำหนดสถานะ (States) ของระบบในช่วงเวลาที่กำหนด ชุดของสถานะนี้เรียกว่า Phase space ชุดของสถานะนี้จะแสดงให้เห็นถึงสถานะที่เป็นไปได้ของระบบซึ่งแต่ละสถานะที่เป็นไปได้ของระบบจะสอดคล้องกับจุดที่ไม่ซ้ำกันหนึ่งจุดบน Phase space [16] ต่อมา Henri Poincare ได้ศึกษาสาม-body problem หรือการศึกษางานที่มีตัวแปรสามตัวที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่ง Poincare ได้ศึกษาเกี่ยวกับดาวเคราะห์ทั้งสามที่โคจรรอบกันในวงเดียวกัน คือ Earth-moon-sun ที่มีมวลของดาวเคราะห์แต่ละดวงเป็นตัวแปรพารามิเตอร์ที่สำคัญทำให้เกิดการเปลี่ยนวิถีโคจรของดาวเคราะห์ทั้งสามดวง จากงานนี้ Poincare พบว่าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลดาวเคราะห์ดวงใดดวงหนึ่งเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้วิถีโคจรของดาวเคราะห์ทั้งสามเปลี่ยนแปลงไปอย่างสิ้นเชิง Poincare ใช้วิธีคำนวณจากกราฟการไหลทรงเรขาคณิตสามเหลี่ยมที่มีพื้นที่ผิวทรงเรขาคณิตที่มีความโค้ง ชื่อว่า Geodesic flow คิดค้นโดย Jacques Hadamard ซึ่งวิธีนี้สามารถแทนตัวแปรของวัตถุได้สามชิ้นพร้อมกันจากการเปลี่ยนแปลงวิถีโคจรของดาวเคราะห์อย่างสิ้นเชิงที่เกิดจากค่าคงที่มวลดาวเคราะห์ที่ต่างกันเล็กน้อย ทำให้ Poincare ได้ค้นพบความสำคัญอย่างหนึ่งในระบบนี้ คือ ความไวต่อสถานะเริ่มต้น (Sensitive to initial condition) [17] ต่อมาหนึ่งทศวรรษ ทั้ง Laplace และ Poincare ชี้ให้เห็นว่า การสุ่ม (Randomness) และ การกำหนด (Determinism) สามารถสัมพันธ์กันได้ เนื่องจากความคาดเดาไม่ได้ในระยะยาว กับสาเหตุเล็กๆที่เรามองข้ามตั้งแต่แรกเป็นตัวกำหนดผลกระทบจำนวนมากที่เราไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาดการณ์ได้ ดังนั้นถ้าเรารู้กฎของธรรมชาติและสถานะของจักรวาลในช่วงเวลาเริ่มต้นอย่างละเอียด เราจะสามารถทำนายสถานะของเอกภพเดียวกันในช่วงเวลาต่อมาได้ นี่คือสิ่งที่ Laplace และ Poincare พยายามพิสูจน์ว่าปรากฏการณ์นี้สามารถถูกควบคุมได้ด้วยกฎทางฟิสิกส์และคณิตศาสตร์

ต่อมาในปีค.ศ.1961 ทฤษฎีความอลวน ถูกค้นพบอย่างเป็นทางการโดย Edward Norton Lorenz มีการใช้ชื่อนิยามว่า ออลวน หรือ Chaos ในปี ค.ศ.1963 [18] ซึ่ง Lorenz ค้นพบด้วยการคำนวณใช้การประมาณค่าที่ไม่มีการควบคุมด้วยตัวแปรใดๆมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำนายสภาพอากาศ พบว่า การคำนวณแบบปิดเศษทศนิยมจาก 6 ตำแหน่ง เหลือ 3 ตำแหน่ง ให้ผลลัพธ์ที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิงในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น การคูณกันซ้ำๆยิ่งส่งผลให้ผลลัพธ์แตกต่างกันในลักษณะเลขชี้กำลัง (Exponential) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดจากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีความแม่นยำ Lorenz จึงพิจารณาเช่นเดียวกับนักฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ในยุคก่อนว่า การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นของการคำนวณสามารถส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงอย่างมากในผลลัพธ์สุดท้ายเมื่อเวลาผ่านไป จากนั้น Lorenz จึงศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีความอลวน ในด้านสาขาพลศาสตร์ (Dynamics) ของสาขาฟิสิกส์ ซึ่งทฤษฎีความอลวนมีลักษณะเฉพาะในการศึกษาอยู่ในระบบพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Dynamic system) จนได้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดแรกขึ้นมาในปี ค.ศ.1963 [19] ที่ใช้สำหรับอธิบายปรากฏการณ์ของความอลวน โดยผลที่ได้จากแบบจำลองของ Lorenz เมื่อนำค่าสถานะของแบบจำลองที่มีพารามิเตอร์ควบคุมมาจำลองผล ลักษณะของผลที่ได้ถูกนิยามโดยนักฟิสิกส์ชาวเบลเยียมที่ชื่อ David Ruelle ว่าคือ ตัวดึงดูด หรือ ตัวดึงดูดอลวน [20] ซึ่งผลที่ได้เป็นลักษณะวิถี (Trajectory) บน Phase space ที่ไม่เกิดการตัดผ่านกัน แต่เป็นวงรอบ (Cycles) ที่ไม่มีจุดศูนย์กลางและแบ่งออกมากกว่า 1 วง

จากทฤษฎีของความอลวนที่กล่าวมา ในระบบอลวน จึงมีคุณสมบัติหลักที่สำคัญของระบบอยู่ 3 อย่าง คือ ระบบไม่เป็นเชิงเส้น ระบบพลวัต และความไวต่อสถานะเริ่มต้น เป็นหลักการสำคัญในการอธิบายลักษณะของพฤติกรรมความอลวน ในงานวิจัยนี้มีการออกแบบความอลวนด้วยการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีลักษณะสัญญาณอลวน โดยมีฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นมาประกอบให้เกิดสัญญาณอลวน ใช้ State model เป็นต้นแบบในการออกแบบวงจร ชุดตัวแปรอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งสามสมการ โดยในการออกแบบวงจรใช้อุปกรณ์แอกทีฟโอทีเอในการสร้าง ทำให้สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ และลดความซับซ้อนของรูปแบบวงจรได้ โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน และทฤษฎีที่ยืนยันการเกิดสัญญาณอลวน ไว้ในบทนี้

2.1 ระบบอลวน (Chaos System)

นิยามของคำว่า ออลวน ถูกอธิบายไว้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความเข้าใจและมุมมองของการศึกษา ในการนำไปใช้ของแต่ละคน ในงานวิจัยนี้จะขออธิบายรูปแบบของความอลวน ด้วยลักษณะของการเกิดสัญญาณหรือพฤติกรรมของมันอย่างมีเงื่อนไข โดยจะขอนิยามความหมายสั้นๆของความอลวน คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างสะเปะสะปะ (random) แต่แฝงไปด้วยความมีระเบียบ (order) ซึ่งความมีระเบียบนี้เกิดขึ้นด้วยเงื่อนไขหลัก 3 อย่าง ดังนี้

2.1.1 ระบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear system)

ในเชิงคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ระบบไม่เป็นเชิงเส้น คือ ระบบที่การเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตไม่ได้เป็นสัดส่วนตรงไปตรงมากับการเปลี่ยนแปลงของอินพุต ซึ่งระบบที่มีความซับซ้อนทั้งในด้านชีววิทยา ดาราศาสตร์ ฟิสิกส์ วิศวกรรมศาสตร์ ส่วนใหญ่มักเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากระบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นเรื่องยากที่จะแก้ปัญหาในเชิงวิเคราะห์และไม่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำเหมือนระบบเชิงเส้น สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายในระบบไม่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นสมการอนุพันธ์ที่สูงกว่าอันดับหนึ่งหรือสมการอนุพันธ์ที่มีการคูณกันของค่าสัมประสิทธิ์คงที่ ในการสร้างสัญญาณอลวน ความไม่เชิงเป็นเส้นเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะของคาบ (periodic) หรือเส้นวงโคจร (trajectory) ที่ไม่คงที่ ทำให้เกิดการแกว่งที่ไม่ซ้ำกัน แต่สามารถกำหนดรูปแบบของการแกว่งได้ ด้วยองค์ประกอบของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

2.1.2 ระบบพลวัต (Dynamic system)

ระบบพลวัตมีสองประเภทหลัก คือ ระบบพลวัตแบบเชิงเส้น (Linear dynamic system) และระบบพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear dynamic system) สำหรับระบบอลวน มีการเปลี่ยนแปลงของระบบอยู่ในรูปแบบระบบพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากระบบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามค่าสถานะปัจจุบันหรือค่าตัวแปร state โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ทวีคูณและไม่คงที่ ไม่สามารถคาดเดาลักษณะการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน มีความละเอียดอ่อนต่อเงื่อนไขเริ่มต้นต่างๆที่กำหนด ในระบบอลวน ที่มีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้น จึงมีตัวแปรหลักที่สำคัญ 3 อย่างในการควบคุมระบบ คือ

1. ตัวแปร State

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พารามิเตอร์ควบคุมระบบ (Gain)
3. ตัวช่วยหรือฟังก์ชัน (Auxiliary or Function) ที่ทำให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงมีรูปแบบของพฤติกรรมอลวน (Chaos behavior)

2.1.3 ความไวต่อสถานะเริ่มต้น (Sensitive to initial condition)

ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.1.1 และ 2.1.2 ด้วยคุณสมบัติที่ซับซ้อนของความเป็นอลวน ลักษณะของสัญญาณอลวน ที่ได้จึงไม่สามารถคาดเดารูปแบบของสัญญาณได้อย่างชัดเจน และยังมี การเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมความเป็นอลวน ที่ไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร State ตั้งต้นหรือมีการปรับเงื่อนไขและพารามิเตอร์ควบคุมของสมการที่ใช้ ออกแบบเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบอย่างมาก เป็นการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ในระดับเลขชี้กำลัง (Exponential) ซึ่ง จะอธิบายโดยละเอียดถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงและแสดงให้เห็นภาพในหัวข้อที่ 2.4 ทฤษฎีการแยกไปสองทาง (The Bifurcation)

2.2 แบบจำลองต้นแบบที่ใช้สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน

2.2.1 Lorenz model

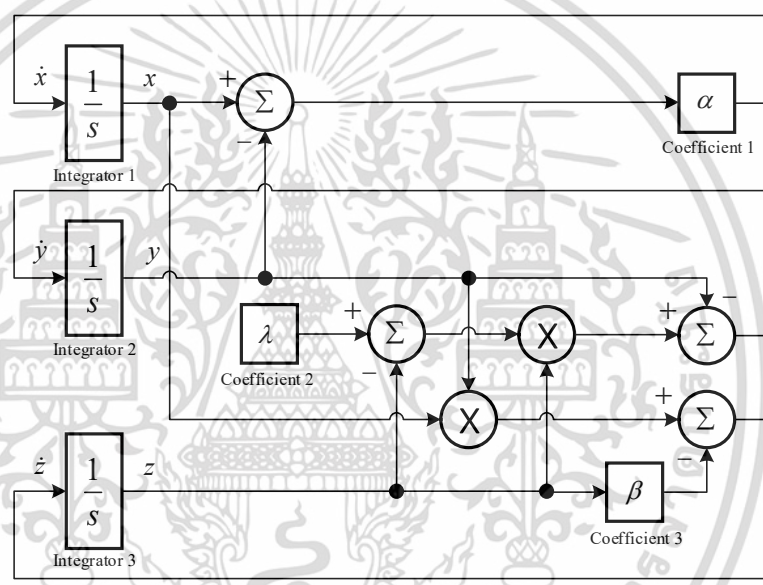
ในการศึกษาโครงสร้างชุดตัวแปร State ที่ใช้สำหรับสร้าง วงจรกำเนิดสัญญาณอลวน มีการศึกษา เริ่มต้นจากโมเดลของ Edward Norton Lorenz [21] โดยโมเดลถูกคิดค้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1961 เพื่อใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของกังหันน้ำ [22] ต่อมาในปี ค.ศ. 1963 จึงได้ค้นพบเป็นพฤติกรรมอลวน ที่มีความซับซ้อน โดยเงื่อนไขที่สำคัญของสมการ คือ เป็นสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง สามชุด และมีพจน์ความไม่ เป็นเชิงเส้นด้วยการคูณกันของตัวแปร State นำมาใช้อธิบายเป็นพฤติกรรมความอลวน สามารถเขียนเป็นชุด State model 3 มิติ ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(y - x) \\ \dot{y} &= x\lambda - xz - y \\ \dot{z} &= xy - \beta z \end{aligned} \quad (2.1)$$

โดยที่ $\alpha, \lambda, \beta > 0$ คือพารามิเตอร์ควบคุมชุดตัวแปร State ซึ่ง xz และ xy คือ พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear terms) รูปแบบของ state model ดังสมการที่ (2.1) สามารถสร้างพฤติกรรมความอลวน ได้ด้วยการปรับพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัว สามารถทำให้เกิดการแกว่ง

รูปที่ 2.1 (ก) - (ค) แสดงให้เห็นลักษณะการแกว่งของค่า x ที่เปลี่ยนแปลงไปในแกนเวลา และรูปที่ 2.1 (ง) - (ข) แสดงลักษณะตัวดึงดูดคู่ตอกลวน 2 มิติ ที่ $y-x$ เมื่อมีการปรับพารามิเตอร์ λ โดยการแสดงผลลักษณะตัวดึงดูดในระบบออลวน ทำได้ด้วยการพล็อตค่าเอาต์พุต $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ จาก state model พร้อมกัน 2 เอาต์พุตขึ้นไปบน phase space จะสามารถแสดงผลเป็นลักษณะเส้นวงโคจร (trajectory) บนแกน 2 มิติ และ 3 มิติ

จากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนเป็น State Block diagram ได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 State Block diagram ของ Lorenz

จากนั้น Edwards Lorenz ได้นำ state model ที่เป็นพฤติกรรมอลวน (Chaos behavior) ไปประยุกต์ใช้ในด้านอุตุนิยมวิทยา เพื่อพยากรณ์สภาพอากาศ ด้วยคุณสมบัติหลักที่มีความละเอียดอ่อนของพฤติกรรมอลวน สามารถใช้ในด้านอุตุนิยมวิทยาได้เป็นอย่างดี จากความไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น (Sensitive to initial condition) ที่มีการปรับเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์เพียงเล็กน้อยของการแปรปรวนสภาพอากาศในระดับ ทศนิยม 6 ตำแหน่ง จาก 0.506127 เป็น 0.506 ทำให้เห็นภาพรวมที่เปลี่ยนไปอย่างชัดเจนจากการเปลี่ยนแปลงของค่า x_0, y_0, z_0 จึงคิดค้นเป็นทฤษฎีที่ตั้งไปทั่วโลก โดยมีคำกล่าวของ Edwards Lorenz ว่า “ความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย ก็สามารถสร้างความแตกต่างอย่างใหญ่หลวงให้เกิดขึ้นได้ เปรียบเหมือนกับ การกระพือปีกของผีเสื้อตัวเล็กๆ ที่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยนิดต่อบรรยากาศ แต่เมื่อเวลาผ่านไป แรงกระพือปีกอันเบาหวิวนั้น สามารถก่อผลให้บรรยากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

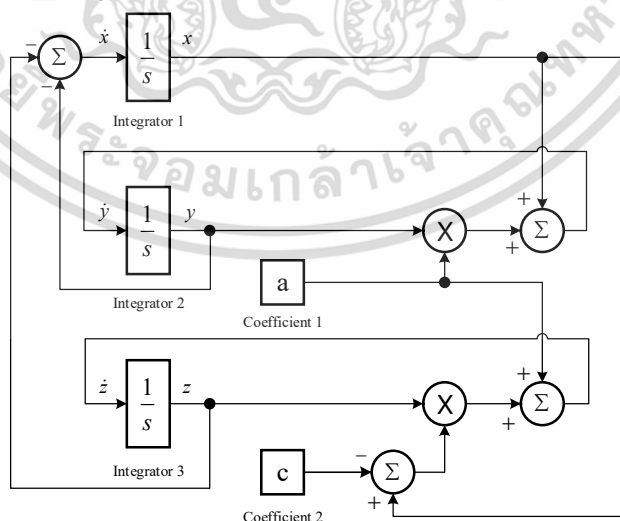
หลวงเป็นพายุทอร์นาโดได้” [23] ซึ่งทฤษฎีนี้ชื่อว่า Butterfly effect เนื่องจากมีลักษณะตัวดึงดูดอลวน ที่คล้ายปีกผีเสื้อ ด้วยการคิดค้นและนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติ ของ Lorenz ทำให้ทฤษฎีความอลวน (Chaos theory) เป็นที่น่าสนใจมากขึ้นของนักวิทยาศาสตร์สาขาต่างๆ เกิดการพัฒนาและต่อยอดจนมี State model ที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อนสามารถนำไปออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้มากมายในปัจจุบัน

2.2.2 Rössler model

ต่อมาในปี ค.ศ. 1976 Otto Eberhard Rössler [24] ได้พัฒนา state model ของ Lorenz ให้สามารถออกแบบง่ายขึ้น ด้วยการลดพจน์ไม่เป็นเชิงเส้นลง 1 พจน์ และลดพารามิเตอร์ควบคุม 1 ตัว โดยที่ยังสามารถให้กำเนิดสัญญาณอลวนได้ มี State model 3 มิติ ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -y - z \\ \dot{y} &= x + ay \\ \dot{z} &= a + z(x - c)\end{aligned}\quad (2.2)$$

โดยที่ a, c คือ พารามิเตอร์ควบคุมชุดตัวแปร State และ xz คือ พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear term) กำหนดพารามิเตอร์ควบคุม $a = 0.2, c = 5.7$ แบบจำลองของ Otto Eberhard Rössler ที่มีการพัฒนาให้ออกแบบได้ง่ายขึ้น เป็นที่นิยมในการนำออกแบบพฤติกรรมความเป็นอลวน [25-27] รวมถึงหลายงานวิจัยใช้ state model จาก Rössler เป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองชุดใหม่ขึ้นมา ซึ่งแบบจำลองของ Rössler สามารถเขียนเป็น State Block diagram สำหรับออกแบบได้ดังรูปที่ 2.3

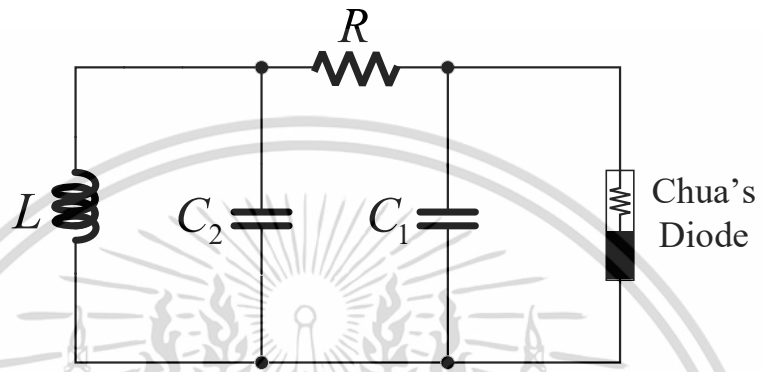


รูปที่ 2.3 State Block diagram ของ Rössler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 Chua model

ต่อมาปี ค.ศ.1983 มีการค้นพบในรูปแบบของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน วงจรแรกโดยบังเอิญในห้องวิจัย โดย Leon Ong Chua [28-29] ดังรูปที่ 2.4



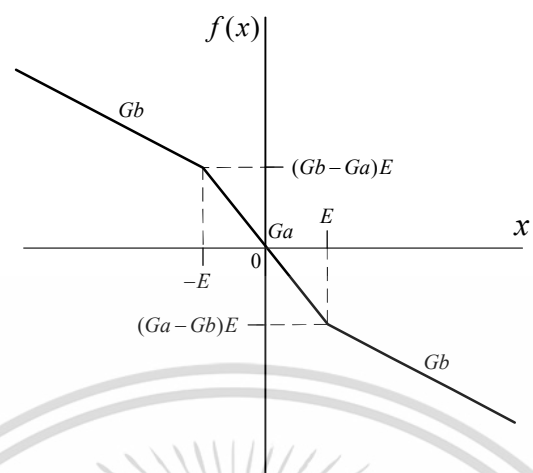
รูปที่ 2.4 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนของ Chua

จากรูปที่ 2.4 เป็นวงจรต้นแบบของ Leon Ong Chua ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน โดยมีการตัดแปดไดโอดของ Chua เพื่อให้ได้ลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่แตกต่างกัน [30-31] จากวงจรของ Chua สามารถเขียนตัวแปรส State เป็นชุด State model 3 มิติ ที่ใช้สำหรับสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้ ดังสมการที่ (2.3)

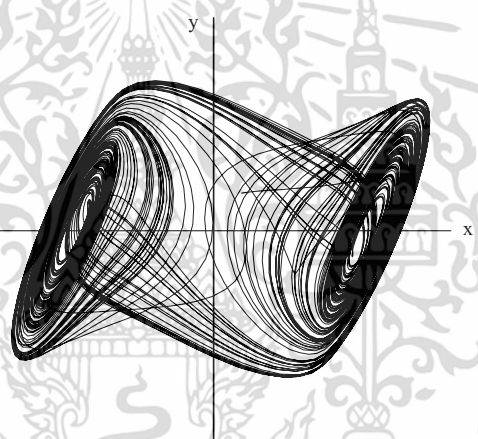
$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \alpha(-x + y - f(x)) \\
 \dot{y} &= x - y + z \\
 \dot{z} &= -\beta y
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

โดยที่ $f(x) = Gb \cdot x + \frac{1}{2}(Ga - Gb)(|x + E| - |x - E|)$

α, β คือ พารามิเตอร์ควบคุม ซึ่ง State model ของ Chua สามารถสร้างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างอิสระ โดยกำหนดลักษณะของฟังก์ชันที่พจน์ $f(x)$ มีองค์ประกอบต่างๆของฟังก์ชันดังรูปที่ 2.5 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ควบคุมและสร้างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับสร้างสัญญาณอลวน ของ Chua [32] นำ State model มาพล็อตในแกน 2 มิติ จะเกิดลักษณะเส้นวงโคจรบน Phase space ได้ลักษณะตัวตึงดูด ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นไดโอด Chua

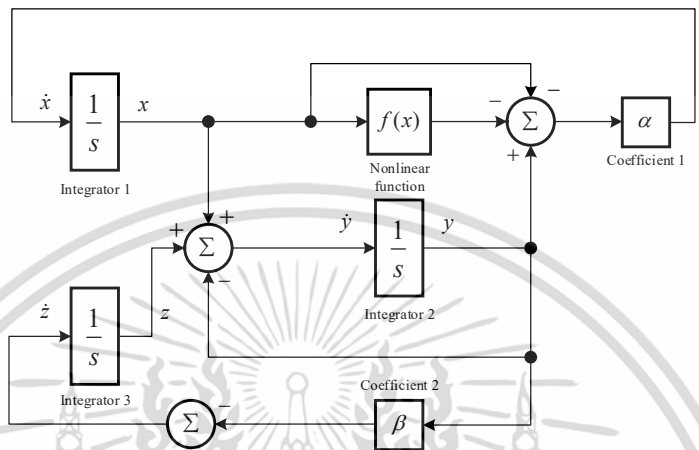


รูปที่ 2.6 ตัวดึงดูดคโวลวนของแบบจำลอง Chua

เมื่อสังเกตระหว่างแบบจำลองของ Lorenz เมื่อปี ค.ศ.1963 กับแบบจำลองของ Chua ในปีค.ศ. 1983 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองของ Chua มีการพัฒนาของ State model ที่ออกแบบง่ายกว่า เนื่องจากมีการปรับพารามิเตอร์ควบคุมแค่ 2 ตำแหน่ง คือ α, β และมีการกำหนดองค์ประกอบของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างอิสระ ซึ่ง State model ของ Lorenz ต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมถึง 3 ตำแหน่ง คือ α, λ, β และใช้ความไม่เป็นเชิงเส้นจากการคูณกันของตัวแปร state x, y, z ไม่สามารถปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้ ทำให้มีข้อจำกัดและยากต่อการออกแบบ รวมถึงแบบจำลองของ Rössler ก็ไม่สามารถกำหนดฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้ สามารถกำหนดได้เพียงฟังก์ชันกำลังสอง (quadratic) จากการคูณกันของตัวแปร State แบบจำลองของ Chua จึงเป็นที่นิยมใช้และเป็นต้นแบบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ในหลายๆงานวิจัย [33-36] จาก State model สมการที่ (2.3) สามารถเขียนเป็น State Block diagram ได้ดังรูปที่ 2.7

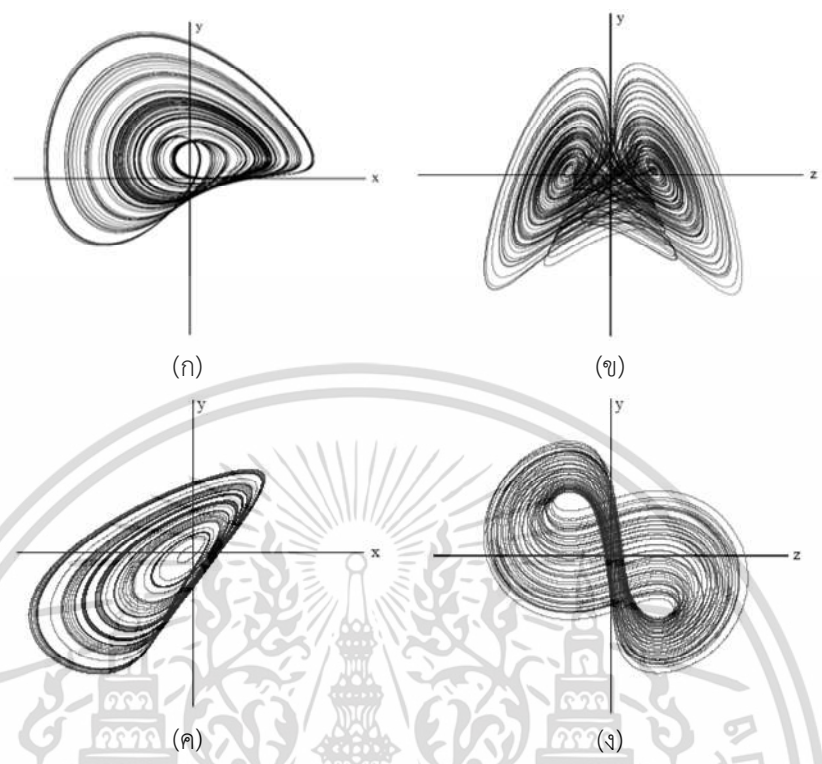


รูปที่ 2.7 State Block diagram ของ Chua

2.2.3 Jerk model

แบบจำลองตัวแปร State model ที่มีชื่อว่า Jerk model เป็นแบบจำลองที่ใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ของงานวิจัยนี้ แบบจำลองนี้ถูกคิดค้นครั้งแรกโดย Julien Clinton Sportt ในปี ค.ศ. 2000 ซึ่ง Sportt เป็นนักฟิสิกส์พลาสมาและทฤษฎีความอลวน ในปี ค.ศ. 1994 ได้มีการคิดแบบจำลองสำหรับสร้างสัญญาณอลวน ขึ้นมาถึง 19 ตัวอย่าง [37] โดยใช้ต้นแบบจากแบบจำลองของ E.N. Lorenz และ O.E. Rössler โดยใช้ความไม่เป็นเชิงเส้น 2 พจน์ แบบ Lorenz ดังสมการที่ (2.1) และใช้ความไม่เป็นเชิงเส้น 1 พจน์ แบบ Rössler ดังสมการที่ (2.2) ซึ่งแบ่งการออกแบบเป็น ตัวแปร State 5 พจน์ กับความไม่เป็นเชิงเส้น 2 พจน์ และตัวแปร State 6 พจน์ กับความไม่เป็นเชิงเส้น 1 พจน์ ข้อพิสูจน์จากการออกแบบในปี ค.ศ.1994 Sportt ชี้ให้เห็นว่า การใช้ความไม่เป็นเชิงเส้นแค่ 1 พจน์ ส่งผลให้ลักษณะการบิด (Distortion) ของตัวตั้งดูอลวน มีการบิดเบือนที่น้อยกว่าการใช้ความไม่เป็นเชิงเส้น 2 พจน์ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.8 และยกตัวอย่าง State model ของ Sportt ทั้ง 4 กรณี ในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะตัวดึงดูดของ (ก) และ (ค) ใช้ความไม่เป็นเชิงเส้น 1 พจน์ (ข) และ (ง) ใช้ความไม่เป็นเชิงเส้น 2 พจน์

ตารางที่ 2.1 แสดง State model และเงื่อนไขเริ่มต้น ที่ใช้ในตัวอย่างของ Sportt เพื่อเปรียบเทียบลักษณะตัวดึงดูด

ตัวอย่างของ Sportt	สมการ	ตัวแปร State เริ่มต้น (x_0, y_0, z_0) และพารามิเตอร์ของระบบ
(ก) ตัวแปร State 6 พจน์ ความไม่เป็นเชิงเส้น 1 พจน์	$\begin{aligned} \dot{x} &= a - y \\ \dot{y} &= b + z \\ \dot{z} &= xy - z \end{aligned}$	$\begin{pmatrix} x_0 = 0.1 \\ y_0 = 0.1 \\ z_0 = 0.1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a = 0.9 \\ b = 0.4 \end{pmatrix}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ตัวแปร State 5 พจน์ ความไม่เป็นเชิงเส้น 2 พจน์	$\begin{aligned}\dot{x} &= yz \\ \dot{y} &= x - y \\ \dot{z} &= a - xy\end{aligned}$	$\begin{pmatrix} x_0 = 1 \\ y_0 = 1 \\ z_0 = 0 \end{pmatrix}, (a = 1)$
(ค) ตัวแปร State 6 พจน์ ความไม่เป็นเชิงเส้น 1 พจน์	$\begin{aligned}\dot{x} &= xy - z \\ \dot{y} &= x - y \\ \dot{z} &= x + az\end{aligned}$	$\begin{pmatrix} x_0 = 0.1 \\ y_0 = 0.1 \\ z_0 = 0 \end{pmatrix}, (a = 0.3)$
(ง) ตัวแปร State 5 พจน์ ความไม่เป็นเชิงเส้น 2 พจน์	$\begin{aligned}\dot{x} &= y \\ \dot{y} &= x + yz \\ \dot{z} &= a - y^2\end{aligned}$	$\begin{pmatrix} x_0 = 0.2 \\ y_0 = 0.2 \\ z_0 = 0.2 \end{pmatrix}, (a = 1)$

ตลอดมาพัฒนาการในการคิดค้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองที่ใช้แสดงพฤติกรรมความอลวน ยังไม่ถูกอธิบายไว้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับเงื่อนไขต่างๆ รวมถึงพารามิเตอร์ควบคุมที่ใช้สำหรับสร้างพฤติกรรมความอลวน มีเพียงทฤษฎี Poincare Bendixson (PB) [38] ที่กล่าวไว้อย่างชัดเจนว่าระบบที่จะสามารถสร้างพฤติกรรมความเป็นอลวนได้ ต้องเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสามเพื่อแสดงลักษณะตัวดึงดูด 3 มิติ (Dimension) บน Phase space และมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) อย่างน้อย 1 อย่าง ในปี ค.ศ.1996 Sportt จึงได้ค้นพบแบบจำลองจากระบบกลศาสตร์ที่คิดค้นโดย Steven H. schot [39] เป็นสมการอนุพันธ์อันดับ 3 ที่เกี่ยวข้องกับอันดับอนุพันธ์ของการกระจัด x ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาของระบบทางกลศาสตร์ [40] เขียนได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\ddot{x} = F(\ddot{x}, \dot{x}, x) \quad (2.4)$$

โดยที่ x คือ การกระจัด (Position)
 \dot{x} คือ ความเร็ว (Velocity)
 \ddot{x} คือ ความเร่ง (Acceleration)
 \dddot{x} คือ การกระตุก (Jerk)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแบบจำลองชุดนี้เชื่อว่า แบบจำลองการกระตุก โดย Sportt ได้นำแบบจำลองชุดนี้มาใช้เป็นทางการในปี ค.ศ.2000 ซึ่งเริ่มต้นจากดัดแปลงสมการของ Rössler สมการที่ (2.2) มาจัดอยู่ในรูปของ Jerk ดังสมการที่ (2.4) จัดรูปได้เป็นสมการที่ (2.5) ซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้นเป็นฟังก์ชันกำลังสอง (quadratic) คือ พจน์ x^2 จากนั้นแทนที่ความไม่เป็นเชิงเส้น $x^2 \rightarrow |x|$ ด้วยฟังก์ชันสัมบูรณ์ [41] แล้วนำตำแหน่งฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นไปไว้ที่ตัวแปร State ตำแหน่งแรก จัดรูปแล้วได้สมการที่ (2.6)

$$\ddot{x} = -k\dot{x} + x^2 - x \quad (2.5)$$

$$\ddot{x} = -k\dot{x} - \dot{x} + |x| - 1 \quad (2.6)$$

โดยที่สามารถปรับค่าคงที่ ที่ฟังก์ชัน $|x| - 1$ ได้ เพื่อปรับลักษณะการบิด (Distortion) ของตัวดึงดูดได้มากขึ้น และ k คือพารามิเตอร์ควบคุมระบบ จากนั้น Sportt จึงจัดรูปใหม่ ที่สามารถออกแบบได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยแทนตำแหน่งตัวแปร State ตัวแรกที่ตำแหน่งฟังก์ชัน $|x| - 1$ ให้เป็นการแทน $G(x)$ ถูกกล่าวไว้ใน [14] ทำให้สามารถแทนฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นอื่นๆ ได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้แค่ฟังก์ชันสัมบูรณ์ (absolute) หรือความไม่เป็นเชิงเส้นกำลังสอง (quadratic) เท่านั้น จัดรูปตัวแปรใหม่ได้สมการที่ (2.7)

$$\ddot{x} = -k\dot{x} - \dot{x} + G(x) \quad (2.7)$$

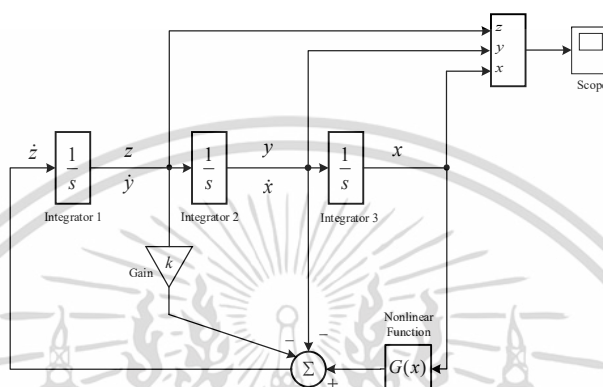
จัดรูปใหม่ และ เขียนอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ได้สมการที่ (2.8) และ (2.9)

$$\ddot{x} + k\dot{x} + \dot{x} = G(x) \quad (2.8)$$

$$\frac{d^3x}{dt^3} + k \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = G(x) \quad (2.9)$$

ซึ่งแบบจำลองการกระตุก เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [42-46] เนื่องจากรูปแบบของชุดตัวแปรไม่ซับซ้อน มีการใช้พารามิเตอร์ควบคุมแค่ตัวเดียว และสามารถออกแบบลักษณะของสัญญาณอลวนได้อย่างอิสระ โดยแทนค่าฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องการใช้ที่ตำแหน่ง $G(x)$ เขียนเป็น State model 3 มิติ และเขียนเป็น State Block diagram เพื่อออกแบบวงจร ได้ดังสมการที่ (2.10) และรูปที่ 2.9 ตามลำดับ

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= -kz - y + G(x)\end{aligned}\tag{2.10}$$



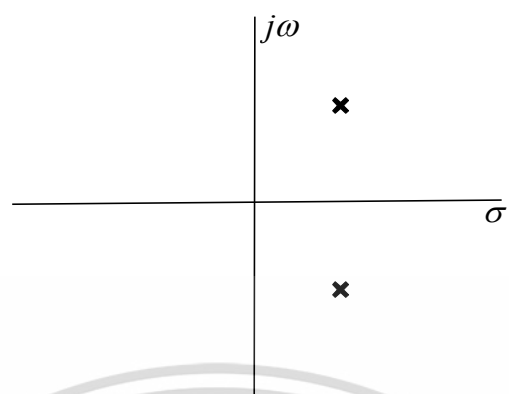
รูปที่ 2.9 State Block diagram ของ Jerk model

สรุป จากแบบจำลองการกระตุก แสดงให้เห็นว่า สามารถสร้างลักษณะการบิดของตัวตั้งจุด ที่เป็น 2 วงโคจร (trajectory) ได้ หรือเทียบเท่าการใช้ตำแหน่งความไม่เป็นเชิงเส้น 2 พจน์ โดยแบบจำลองการกระตุก ใช้ความไม่เป็นเชิงเส้นแค่พจน์เดียว และมีรูปแบบสมการเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสามหนึ่งสมการ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้งานง่ายกว่าแบบจำลองที่เคยมีมา มีการปรับพารามิเตอร์ควบคุม k แค่ตำแหน่งเดียวและปรับฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างอิสระ รวมถึงสามารถแทนฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นรูปแบบอื่นๆได้ เช่น ฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ (Absolute) ฟังก์ชัน ($\tanh(x)$) ฟังก์ชัน ($\sin(x)$) เป็นต้น ทำให้ออกแบบลักษณะของสัญญาณอลวนได้หลากหลาย ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองการกระตุก เป็นต้นแบบ เพื่อพัฒนาและศึกษาพฤติกรรมความเป็นอลวนต่อไป

2.3 ทฤษฎีและหลักการกำเนิดสัญญาณ [47]

2.3.1 การวิเคราะห์ฟังก์ชันโคจรข่ายสำหรับการกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างโพลและซีโรของฟังก์ชันโครงข่าย

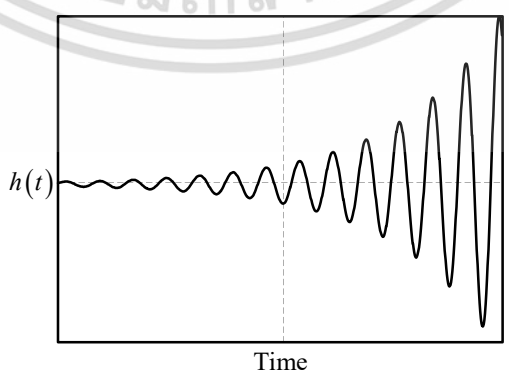
ฟังก์ชันโครงข่ายอันดับสองที่ใช้อธิบายหลักการกำเนิดสัญญาณคือฟังก์ชันที่มีโพลแบบเชิงสังยุค และมีซีโรอยู่ที่อนันต์ เมื่อนำมาเขียนอยู่ในรูปเศษส่วนย่อยจะเป็นดังสมการที่ (2.11) และแสดงตำแหน่งโพลและซีโรของฟังก์ชันโครงข่ายได้ดังรูปที่ 2.10 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้ ดังนี้

$$H(s) = \frac{k_1}{s - a - jb} + \frac{k_1}{s - a + jb} \tag{2.11}$$

อินเวิร์สลาปลาซสมการ (2.11) ได้เป็น

$$h(t) = 2K_1 e^{at} \cos bt \tag{2.12}$$

นำสมการ (2.12) มาพล็อตในโดเมนเวลา (time domain) จะได้กราฟที่มีลักษณะรู้ออกตามฟังก์ชันของสมการ



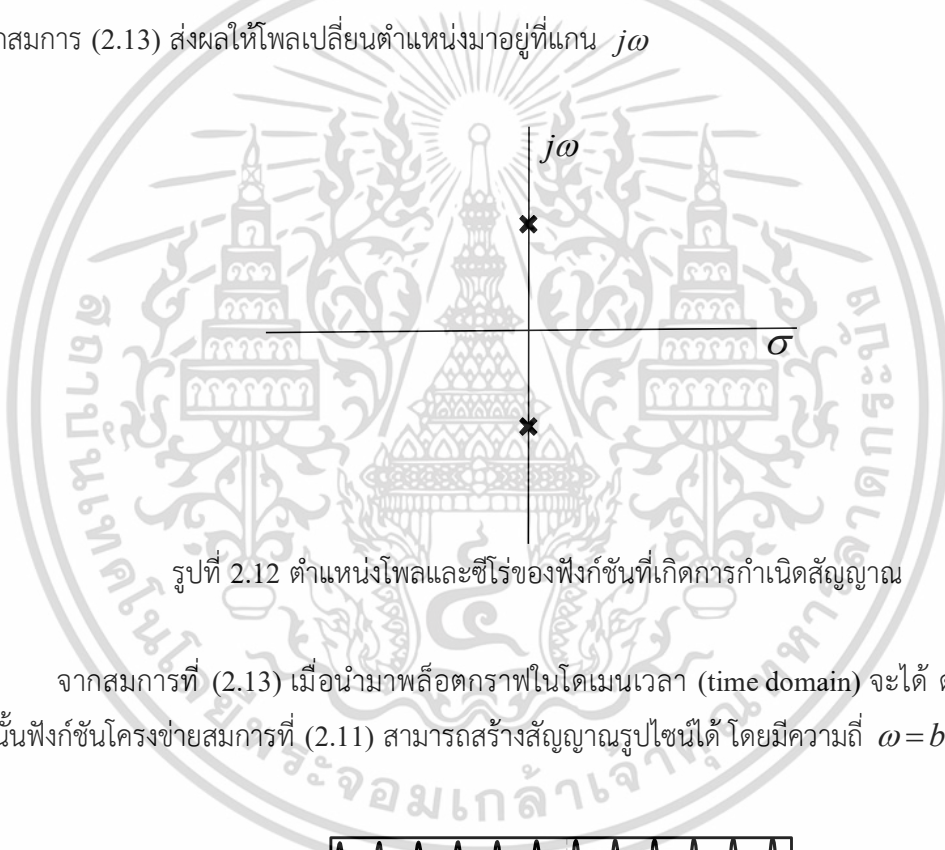
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.11 กราฟฟังก์ชันลู่ออก

จากสมการที่ (2.12) พจน์ที่ทำให้ฟังก์ชันลู่ออกคือ e^{at} หากทำให้พจน์นี้กลายเป็นค่าคงที่ โดยการแทน a ที่เป็นสัมประสิทธิ์จำนวนจริงของพจน์ให้เท่ากับ 0 ส่งผลให้พจน์ $e^{at} = 1$ กราฟของฟังก์ชันจะไม่เกิดการลู่ออก ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

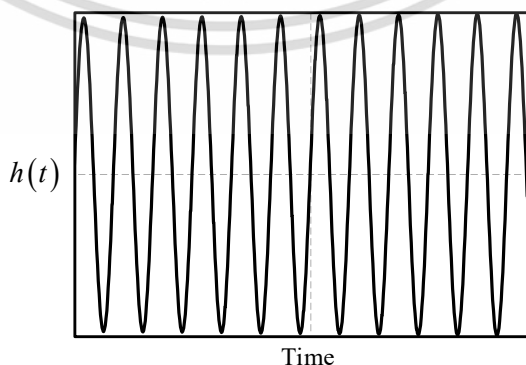
$$h(t) = 2K_1 \cos bt \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.13) ส่งผลให้โพลเปลี่ยนตำแหน่งมาอยู่ที่แกน $j\omega$



รูปที่ 2.12 ตำแหน่งโพลและซีโรของฟังก์ชันที่เกิดการกำเนิดสัญญาณ

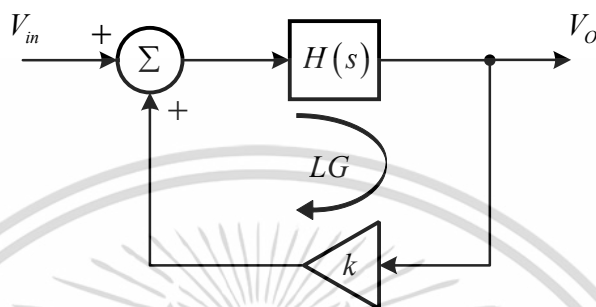
จากสมการที่ (2.13) เมื่อนำมาพล็อตกราฟในโดเมนเวลา (time domain) จะได้ ดังรูปที่ 2.13 ดังนั้นฟังก์ชันโคไซน์สมการที่ (2.11) สามารถสร้างสัญญาณรูปไซน์ได้ โดยมีความถี่ $\omega = b$ เมื่อ $a = 0$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 กราฟฟังก์ชันการกำเนิดสัญญาณ

2.3.2 หลักการกำเนิดสัญญาณพื้นฐาน



รูปที่ 2.14 ระบบป้อนกลับแบบบวก

หลักการกำเนิดสัญญาณของงานวิจัยนี้ ได้นำทฤษฎีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ออกแบบและทำการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณ หลักการพื้นฐานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปไซน์อธิบายได้ดังรูปที่ 2.14 เขียนความสัมพันธ์จากระบบการป้อนกลับแบบบวกในรูปแบบฟังก์ชัน ถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (2.14)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{H(s)}{1 - kH(s)} = \frac{H(s)}{1 - LG} \quad (2.14)$$

จากการพิจารณาเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณของระบบป้อนกลับแบบบวกนั้น จะพิจารณาโดยระบบจะไม่มีสัญญาณอินพุตแต่มีสัญญาณเอาต์พุต กล่าวคือระบบสามารถให้กำเนิดสัญญาณได้ต้องมีอัตราขยายลูปเกน (Loop Gain: LG) มีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.15) คือ

$$LG = kH(s) = 1 \quad (2.15)$$

ตามเงื่อนไข Barkhausen วงจรกำเนิดสัญญาณจะให้กำเนิดสัญญาณรูปไซน์ได้ ต้องมีเงื่อนไขเป็นไปตามข้อกำหนดโดยมีค่าลูปเกนเท่ากับ 1 หรือ $kH(s) = LG = 1$ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจัดรูปสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$1 - LG = 1 - kH(s) = 0 = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.16)$$

2.3.3 หลักการกำเนิดสัญญาณโพลีโนเมียลอันดับสาม

กำหนดให้ $H(s)$ เป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับสาม โดยที่ $N(s)$ คือ โพลีโนเมียลตัวเศษของสมการ และ $D(s)$ คือโพลีโนเมียลตัวส่วนของสมการ สามารถเขียนสมการในรูปของฟังก์ชันเศษและส่วนได้ ดังนี้

$$\frac{N(s)}{D(s)} = \frac{a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3}{b_0s^3 + b_1s^2 + b_2s + b_3} \quad (2.17)$$

จากกฎของ Barkhausen สมการโพลีโนเมียลอันดับสาม นำตัวเศษ $N(s)$ มาเขียนสมการใหม่ โดยกำหนดลูปเกนเท่ากับหนึ่ง จะได้เป็น

$$N(s) = 0 = a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 \quad (2.18)$$

แทนค่า $s = j\omega$ ลงในสมการ จะได้

$$0 = -j\omega^3 a_0 - a_1\omega^2 + j\omega a_2 + a_3 \quad (2.19)$$

ดังนั้น

$$0 = (a_3 - a_1\omega^2) + j\omega^3 (a_2 - a_0\omega^2) \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์พจน์จำนวนจริง และ พจน์จินตภาพให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะสามารถเขียนสมการเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (Condition of Oscillation) ได้ ดังนี้

$$a_1a_2 - a_0a_3 = 0 \quad (2.21)$$

และสามารถเขียนสมการความถี่การกำเนิดสัญญาณ (Frequency of Oscillation) จากเงื่อนไขข้างต้น ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

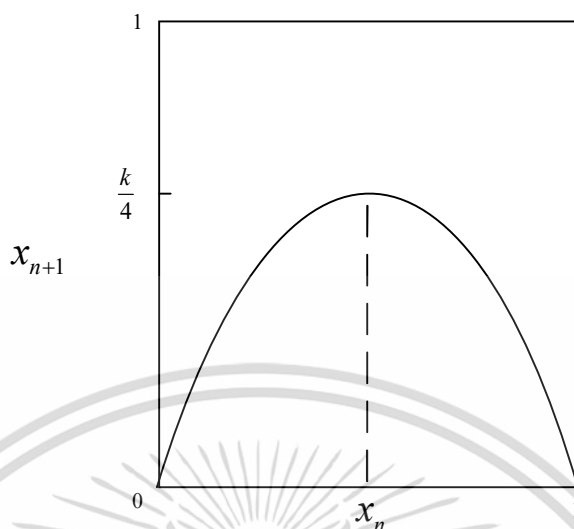
$$\omega^2 = \frac{a_2}{a_0} = \frac{a_3}{a_1} \quad (2.22)$$

2.4 ทฤษฎีการแยกไปสองทาง (The Bifurcation)

ในการเกิดสัญญาณอลวน ของระบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear dynamic system) มีผลทางทฤษฎีอธิบายการเกิดสัญญาณอลวน หลายวิธี เช่น Poincare map, LE (Lyapunov Exponent), The Bifurcation เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอทฤษฎี การแยกไปสองทาง เพื่อพิสูจน์การเกิดสัญญาณอลวน โดยทฤษฎีการแยกไปสองทาง เป็นทฤษฎีที่อธิบายการกระจายค่าที่ได้จากชุดตัวแปรของสมการที่มี มิติ หรือ พูดย่อยๆคือสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งขึ้นไป โดยปัจจัยสำคัญในการแสดงแผนภาพการแยกไปสองทาง คือ รูปแบบของชุดสมการอนุพันธ์ที่ใช้และพารามิเตอร์ที่ควบคุมอยู่ โดยทฤษฎีนี้สามารถบอกภาพรวมของระบบที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ได้ ทำให้สามารถนำผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบมายืนยันควบคู่กับแผนภาพการแยกไปสองทาง เพื่อยืนยันความถูกต้องได้

ในหัวข้อนี้จะอธิบายให้เห็นภาพ ด้วยการยกตัวอย่างของสมการไม่เป็นเชิงเส้น 1 มิติ หรืออนุพันธ์อันดับหนึ่งที่มีพารามิเตอร์ควบคุม 1 ตัว เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ โดยคุณสมบัติทั้งหมดจะเกี่ยวข้องกับหัวข้อ 2.1 ที่เป็นพื้นฐานของระบบอลวน ด้วยลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าที่ไม่คงที่ (ระบบไม่เป็นเชิงเส้น : nonlinear system) และมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามสถานะปัจจุบัน (State current) ของตัวแปรเมื่อเวลาผ่านไป (ระบบพลวัต : Dynamic system) โดยรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแผนภาพการแยกไปสองทาง (Bifurcation diagram) จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการที่กำหนด (มีความไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น : Sensitive to initial condition) สมการที่ใช้ คือ สมการ Logistic map ดังนี้

$$x_{n+1} = kx_n(1-x_n) \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์สมการ Logistic map [48]

สมการที่ (2.23) คือ สมการ Logistic ที่มีความไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time) สมการอยู่ในรูปแบบของตัวแปร State 1 มิติ จากรูปที่ 2.15 เป็นกราฟพาราโบลาที่ได้จากสมการ Logistic ที่มีพจน์ $-kx_n^2$ เนื่องจากรูปสมการเมื่อจัดรูปแล้ว จะได้เป็น

$$x_{n+1} = kx_n - kx_n^2 \quad (2.24)$$

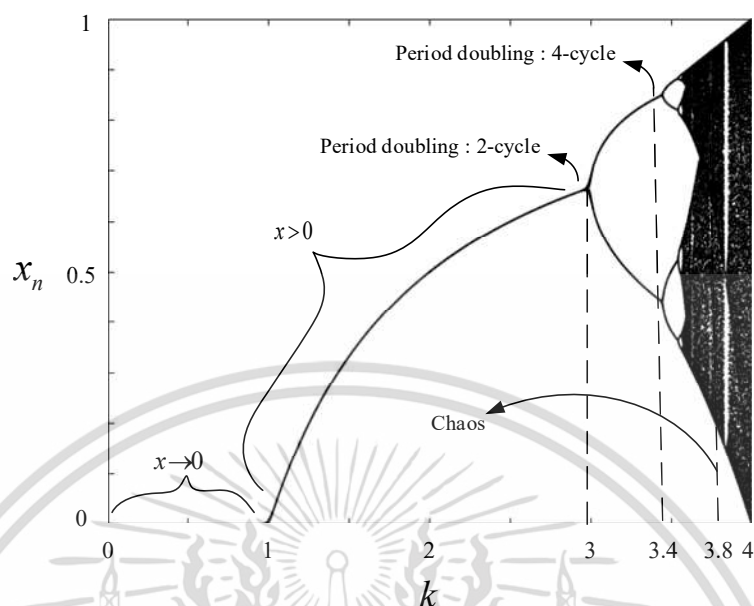
ที่ $0 \leq x_n \leq 1$ เนื่องจากมีเงื่อนไข $(1-x_n)$ และ k คืออัตราการเติบโตของกราฟ จากรูปที่ 2.16 มีจุดสูงสุดของกราฟพาราโบลา คือ $\frac{k}{4}$ ที่ตำแหน่ง $x_n = \frac{1}{2}$ ค่าพารามิเตอร์ k จึงถูกจำกัดอยู่ในช่วง $0 \leq k \leq 4$ เพื่อให้ค่า x_n อยู่ในเงื่อนไข ด้วยคุณสมบัติของสมการเมื่อนำไปพล็อตจะสามารถบ่งบอกค่าของตัวแปร State ที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นระเบียบโดยมีพารามิเตอร์ควบคุมได้อย่างถูกต้อง

กำหนดให้ k คือ พารามิเตอร์ควบคุมอัตราการเพิ่มของตัวแปร state x_n

x_n คือ ค่าตัวแปร State

x_0 คือ ค่าเริ่มต้น (ในตัวอย่างนี้ จะกำหนด $x_0 = 0.1$)

โดยมีเงื่อนไข $0 \leq k \leq 4$ และ $0 \leq x \leq 1$



รูปที่ 2.16 แผนภาพการแยกไปสองทาง (Bifurcation diagram)

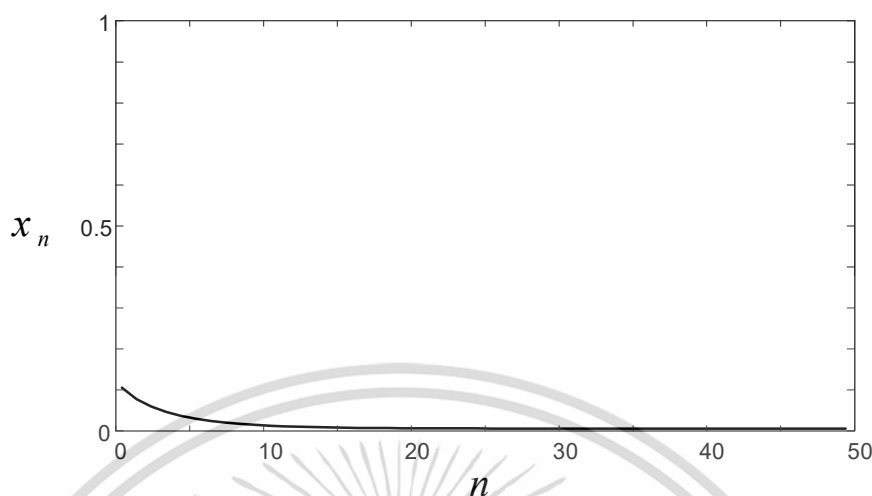
จากรูปที่ 2.16 แสดงการแยกไปสองทาง จากสมการ Logistic โดยพล็อตค่า x_n และ k ของสมการ จากแผนภาพ คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร State (x_n) เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์อยู่ในช่วง $0 \leq k \leq 1$ คือช่วงที่ค่าตัวแปร ลู่เข้าศูนย์ หรือช่วงที่ยังไม่เกิดการกำเนิดสัญญาณ เมื่อปรับพารามิเตอร์สูงขึ้น จนอยู่ในช่วง $1 < k < 3$ ค่าตัวแปรจะมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอยู่ในระดับเลขชี้กำลัง (Exponential) จนถึงจุดที่ปรับพารามิเตอร์ $k = 3$ เป็นจุดที่เริ่มเกิดการแกว่งของค่าตัวแปร มีเส้นวงโคจรของสัญญาณ 2 วง หรือเรียกช่วง period-2 cycle เมื่อปรับพารามิเตอร์สูงถึง $k = 3.4$ ค่าตัวแปรเกิดการแกว่งจนได้เส้นวงโคจร 4 วง หรือเรียกช่วง period-4 cycle จะสังเกตได้ว่า เมื่อมีการปรับพารามิเตอร์สูงค่าของตัวแปรจะเกิดการแกว่งของค่าที่มากขึ้น จนกระทั่งปรับพารามิเตอร์ถึง $k = 3.8$ ค่าตัวแปรจะแกว่งจนเกือบไม่ซ้ำค่า มีเส้นวงโคจรที่ไม่สามารถคาดเดาได้ เรียกรูปแบบการแกว่งของจุดนี้ว่า Chaos [49]

จากรูปที่ 2.16 จะนำมาขยายแสดงให้เห็นภาพได้ชัดเจนขึ้นในรูปแบบของการเกิดสัญญาณ โดยพล็อตค่า x_n เทียบกับ n แล้วปรับค่าพารามิเตอร์ k ให้เห็นในแต่ละช่วง [50] ดังต่อไปนี้

2.4.1 ช่วงการเกิดทวีค่า (period doubling)

จากรูปที่ 2.16 เมื่อค่าพารามิเตอร์ k อยู่ในช่วง $k < 1$ กำหนดค่า $x_0 = 0.1$ จะได้ค่าตัวแปร State $x_n \rightarrow 0$ ที่ $n \rightarrow \infty$ แสดงผลด้วยค่า x_n เทียบกับ n ได้ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



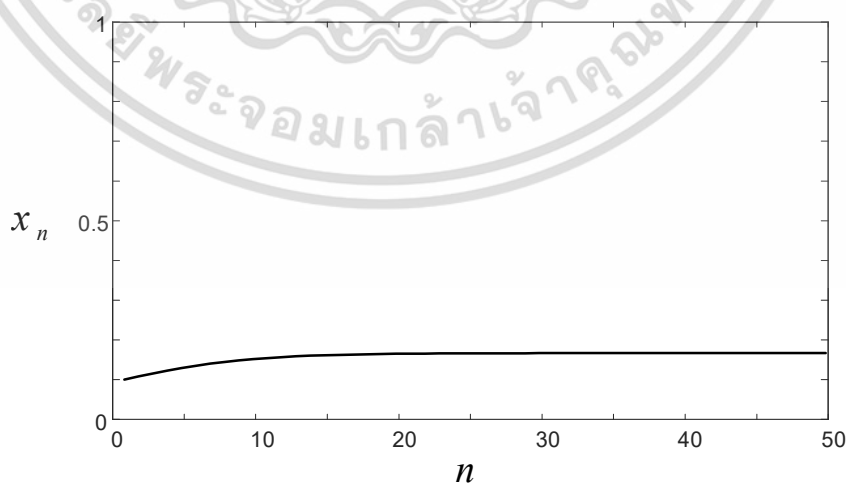
รูปที่ 2.17 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาพารามิเตอร์ $k < 1$

สำหรับค่าพารามิเตอร์ k ในช่วง $1 < k < 3$ ค่าของ x_n จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ไม่คงที่แล้วเข้าสู่ช่วงเกิดการทวิค่า

โดยเริ่มจากค่า $k = 1.1$ จะเห็นได้ว่าค่า x_n เริ่มมีค่ามากขึ้น ดังตารางที่ 2.2 และการแสดงผลในรูปที่ 2.18

ตารางที่ 2.2 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_1 ถึง x_7

x_n	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$
$k=1.1$	0.108	0.115	0.122	0.129	0.134	0.141	0.144



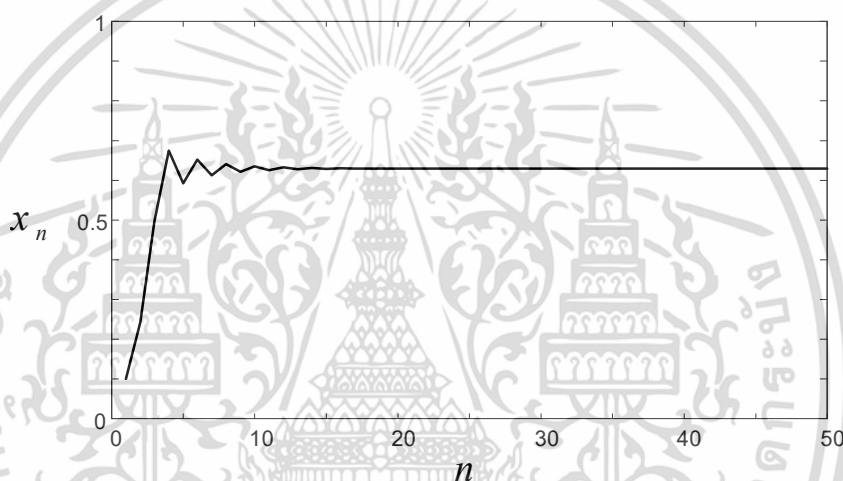
รูปที่ 2.18 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาพารามิเตอร์ $k = 1.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงค่าพารามิเตอร์ k ที่มากขึ้น ค่าตัวแปร State ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่พอถึงช่วง $k = 2.7$ การเพิ่มขึ้นของค่าตัวแปร State เริ่มไม่คงที่ ทำให้เกิดการแกว่งเล็กน้อยของกราฟในช่วงหนึ่ง แสดงในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.19

ตารางที่ 2.3 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_1 ถึง x_7

x_n	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$
$k=2.7$	0.243	0.496	0.674	0.592	0.652	0.612	0.639

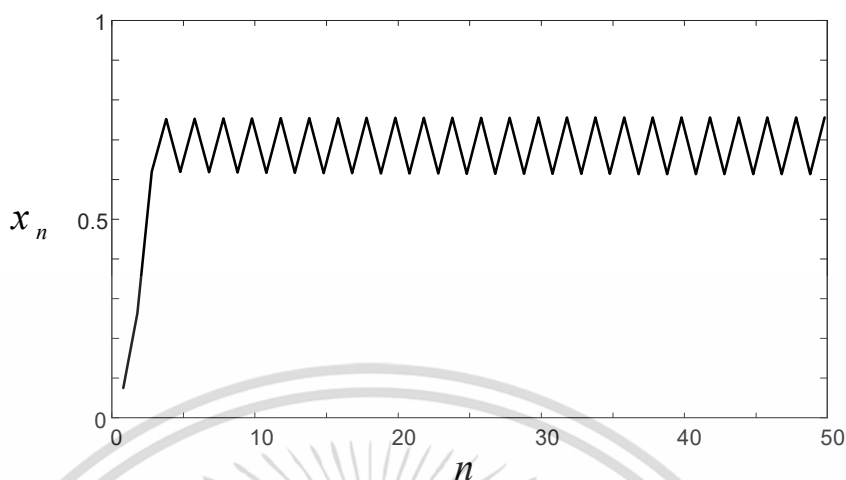


รูปที่ 2.19 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาพารามิเตอร์ $k = 2.7$

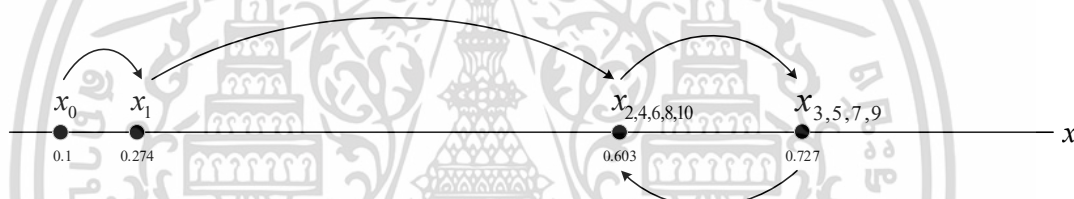
จนถึงช่วง $k = 3$ การเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าตัวแปร State เริ่มคงที่ ดังตารางที่ 2.4 ทำให้เกิดการแกว่งที่คงที่ของกราฟ แสดงผลในรูปที่ 2.20 การแกว่งชนิดนี้ทำให้เกิดค่าที่ซ้ำกันไปมา 2 ค่าในหนึ่งช่วงเวลา เรียกว่า period-2 cycle แสดงให้เห็นในลักษณะของเส้นวงโคจร 1 มิติ บนแกน x ดังรูปที่ 2.21 จะสังเกตเห็นว่าเส้นวงโคจร จะคงที่ 2 วง ที่จุด 0.603 และ 0.727

ตารางที่ 2.4 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_1 ถึง x_{10}

x_n	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$
$k=3$	0.274	0.603	0.727	0.603	0.727	0.603	0.727	0.603	0.727	0.603



รูปที่ 2.20 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาที่มีพารามิเตอร์ $k = 3$



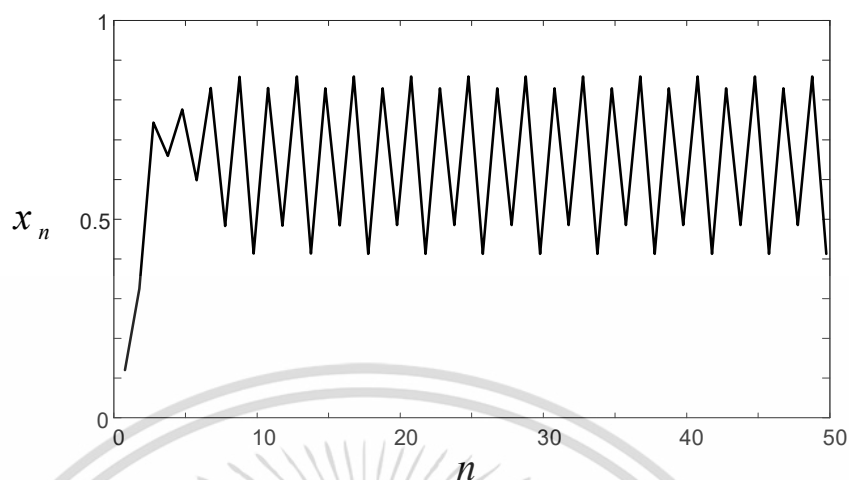
รูปที่ 2.21 แสดงเส้นวงโคจรที่มีพารามิเตอร์ $k = 3$

ช่วง $k = 3.4$ การเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าตัวแปร State เกิดการแกว่งที่มากขึ้น โดยจะเกิดค่าที่ซ้ำกันไปมาถึง 4 ค่าในหนึ่งช่วงเวลา ดังตารางที่ 2.5 ทำให้เกิดการแกว่งของกราฟ แสดงผลในรูปที่ 2.22 การแกว่งรูปแบบนี้ เริ่มเข้าสู่ช่วง period-4 cycle เป็นช่วงที่ค่าเริ่มเกิดความไม่เสถียร (Instability) สูงมาก ซึ่งเป็นช่วงที่การทวีค่า (period doubling) กำลังเข้าสู่ช่วง ความอลวน หรือเรียกว่า route to chaos และแสดงให้เห็นในลักษณะของเส้นวงโคจร (Orbits) 1 มิติ บนแกน x ดังรูปที่ 2.23 ลักษณะของเส้นวงโคจรที่มีพารามิเตอร์ $k = 3.4$ จะเริ่มการแยกออกไป 4 วงที่คงที่

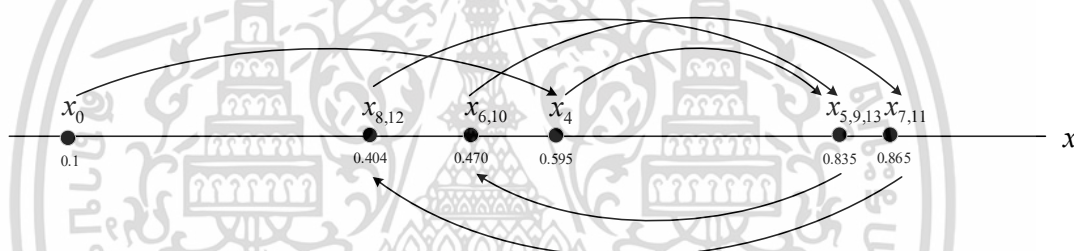
ตารางที่ 2.5 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_4 ถึง x_{13}

x_n	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$	$n=11$	$n=12$	$n=13$
$k=3.4$	0.595	0.835	0.470	0.865	0.404	0.835	0.470	0.865	0.404	0.835

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาที่มีพารามิเตอร์ $k = 3.4$



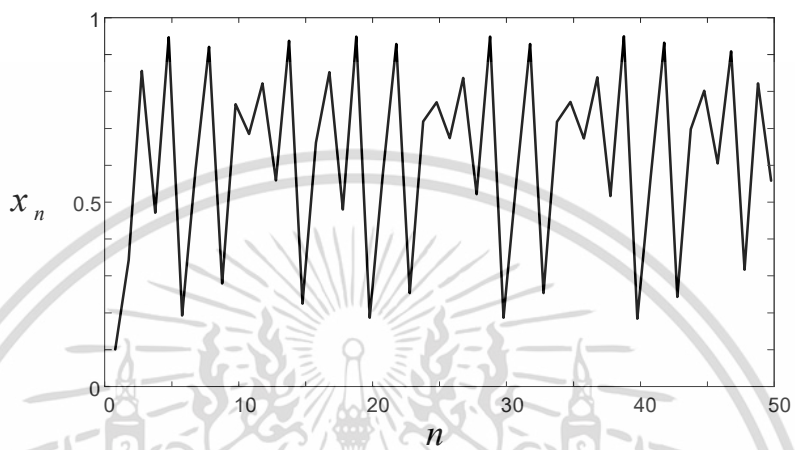
รูปที่ 2.23 แสดงเส้นวงโคจรที่มีพารามิเตอร์ $k = 3.4$

2.4.2 การแกว่งรูปแบบอลวน (Chaos aperiodic)

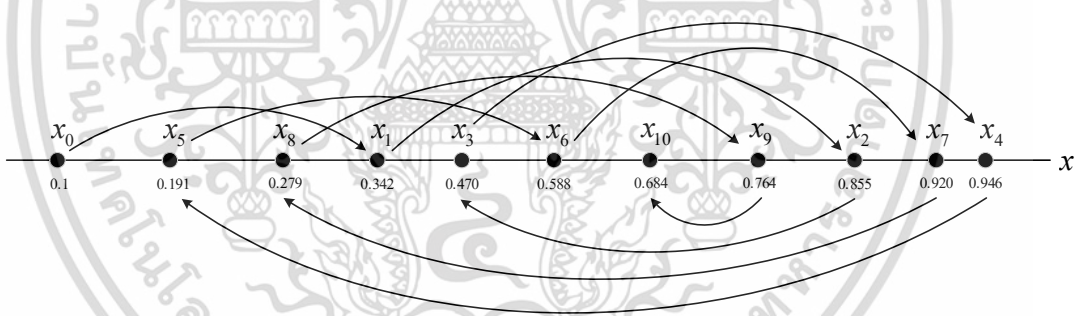
ช่วง $k = 3.8$ ขึ้นไป การเพิ่มขึ้นและลดลงของ x_n ไม่คงที่และมีพฤติกรรมของช่วงคาบเวลาที่คาดเดาไม่ได้ เรียกว่า aperiodic การแกว่งของค่าตัวแปร State ในช่วงตั้งแต่ $k = 3.8$ ขึ้นไป ลักษณะการแกว่งจะไม่เกิดการซ้ำค่าของระบบ สังเกตได้ดังตารางที่ 2.6 แสดงเป็นลักษณะของสัญญาณอลวนได้ ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งในรูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นลักษณะของเส้นวงโคจร (Orbits) ที่ไม่คงที่ และไม่สามารถคาดเดาทิศทางเคลื่อนที่ได้ เป็นลักษณะของวิถีวงโคจร (Trajectory) 1 มิติ บนแกน x รูปแบบอลวน จากสมการ Logistic

ตารางที่ 2.6 แสดงจำนวนประชากรของ x_n ในช่วง x_1 ถึง x_{10}

x_n	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$
$k=3.8$	0.342	0.855	0.470	0.946	0.191	0.588	0.920	0.279	0.764	0.684



รูปที่ 2.24 แสดงผลของ x_n แต่ละช่วงเวลาที่มีพารามิเตอร์ $k = 3.8$



รูปที่ 2.25 แสดงเส้นวงโคจรที่มีพารามิเตอร์ $k = 3.8$

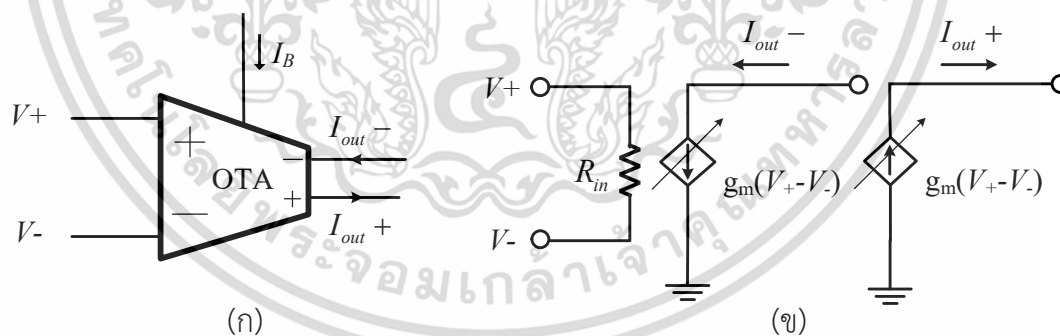
จากตัวอย่างที่กล่าวมาเป็นหลักการพื้นฐานของทฤษฎีการแยกไปสองทาง ที่แสดงผลในลักษณะของแผนภาพ (Diagram) โดยใช้สมการ Logistic แค่ 1 มิติ มาแสดงให้เห็นภาพรวมเพื่อช่วยต่อความเข้าใจในการศึกษา ซึ่งหากเป็นระบบอลวน ที่ใช้แสดงลักษณะตัวตั้งจุด ที่เกิดลักษณะการบิด (Distortion) ที่ชัดเจนจาก State model จะต้องเป็นสมการตัวแปร state ถึง 3 มิติ หรือเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสาม มีความซับซ้อนของโครงสร้างสูง รวมถึงลักษณะการควบคุมของพารามิเตอร์ จะไม่สามารถอธิบายอย่างตรงไปตรงมาได้แบบระบบ 1 มิติ จำเป็นต้องศึกษาจากพื้นฐานเพื่อให้เกิดความเข้าใจภาพรวม จึงจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถไปประยุกต์ใช้แบบจำลองต่างๆของระบบอลวน และสามารถนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีได้อย่างถูกต้อง

2.5 โอทีเอ

ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นอุปกรณ์หลัก ในการออกแบบวงจรของงานวิจัย มีโครงสร้างโดยรวมของวงจรไม่ซับซ้อน วงจรที่ออกแบบมีคุณสมบัติสามารถปรับอัตราขยายได้ และสามารถนำไปประยุกต์สร้างเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ออกแบบคือ วงจรขยายความนำ (Operational transconductance amplifier : OTA) หรือที่เรียกกันว่า โอทีเอ เป็นอุปกรณ์แอกทีฟชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และสามารถปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ โอทีเอจะมีลักษณะเสมือนเป็นอุปกรณ์แหล่งจ่ายกระแส [51] ที่สามารถควบคุมกระแสเอาต์พุตได้จากแรงดันอินพุต (Voltage Control Current Source : VCCS) และค่าความนำถ่ายโอน (g_m) ของอุปกรณ์ อุปกรณ์ดังกล่าวมีคุณสมบัติที่หลากหลาย เช่น สามารถออกแบบในรูปแบบ Monolithic ได้ สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดกระแส และแรงดัน สามารถปรับค่าความนำได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถประยุกต์ใช้กับวงจรต่างๆได้ง่าย [52] จากข้อดีที่กล่าวมาทำให้โอทีเอถูกนำไปใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น ประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก การสร้างตัวแปลงแรงดันเป็นกระแส และวงจรรองความถี่ [53] โดยโอทีเอจะมีสัญลักษณ์แสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 (ก) สัญลักษณ์ และ (ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.26 (ก) คือ สัญลักษณ์ของอุปกรณ์โอทีเอ และรูปที่ 2.26 (ข) คือ วงจรสมมูลของโอทีเอ ในสถานะอุดมคติ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันได้แสดงดังนี้

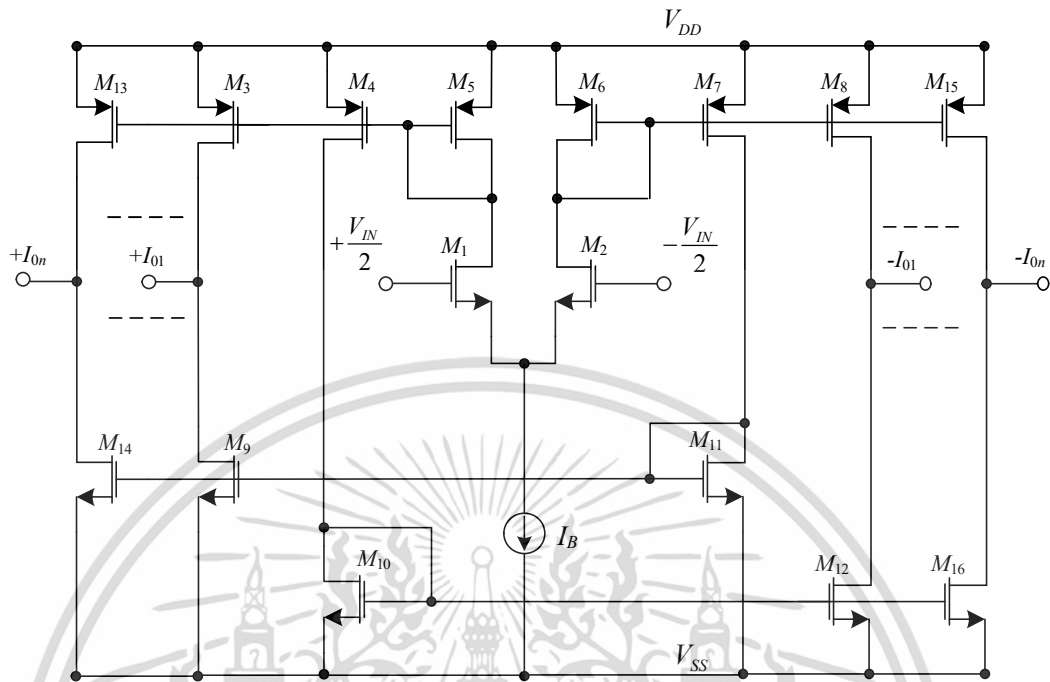
$$I_{out} = g_m (V_+ - V_-) \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.16) g_m คือค่าความนำ (Transconductance) ที่สามารถปรับได้จากกระแสไบอัสภายนอก หรือเรียกว่ากระแสควมคุม (I_B) ดังรูปที่ 2.26 (ก) ซึ่งส่วนมากค่าความนำ (g_m) และค่ากระแสควมคุม (I_B) จะถูกแสดงในหน่วยของ μS และ μA ตามลำดับ โดยขนาดของเกนแบนด์วิดท์ในช่วงการทำงานจะแปรผันตามกระแสควมคุม (I_B) ซึ่งโอทีเออาจสามารถทำงานได้สูงสุดถึง $100-300MHz$ ขึ้นอยู่กับการออกแบบและโมเดลของโอทีเอที่ใช้

2.5.1 โอทีเอแบบมอสทรานซิสเตอร์

วงจรโอทีเอแบบมอสทรานซิสเตอร์ คือการสร้างโอทีเอด้วยเทคโนโลยีซีมอส โดยใช้โครงสร้างของวงจรคูตีฟเฟอเรนเชียล (Differential Pair) ที่สร้างจากซีมอส ต่อกับวงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror) และนำผลต่างของกระแสจากคูตีฟเฟอเรนเชียล (Differential Pair) ออกเป็นเอาต์พุต ซึ่งสามารถออกแบบโอทีเอให้มีหลายเอาต์พุตได้ โดยเพิ่มคูตีฟเฟอเรนเชียลในวงจร โอทีเอแบบมอสทรานซิสเตอร์จะมีสมการค่าความนำ (Transconductance) [54] แสดงดังนี้

$$g_m = \left. \frac{\partial \Delta I_d}{\partial \Delta V_{id}} \right|_{V_{id}=0} = \sqrt{\mu_0 C_{OX} (I_B) (W/L)_{1,2}} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.27 โครงสร้างโอทีเอหลายเอาต์พุตแบบมอสทรานซิสเตอร์

จะเห็นว่าค่าทรานคอนดักแตนซ์ของโอทีเอสามารถปรับได้ตามกระแสไบอัสตามสมการที่ (2.26) แต่การปรับดังกล่าวจะไม่เป็นการปรับแบบเชิงเส้น ซึ่งการปรับค่าทรานคอนดักแตนซ์ได้ด้วยการปรับกระแสไบอัสนั้นคือหนึ่งในลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์โอทีเอ และโอทีเอแบบมอสทรานซิสเตอร์นั้น มีความต้านทานอินพุตของซิมอสโอทีเอที่มีค่าสูงมาก และมีช่วงปฏิบัติการของอินพุตที่กว้าง

2.6 หลักการกรองความถี่ต่ำผ่าน [55]

ในงานวิจัยเล่มนี้มีการใช้หลักการกรองความถี่ต่ำผ่านในการสร้างวงจรรวม โดยใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง สร้างจากฟังก์ชันอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย และใช้หลักการของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง สามารถปรับค่า Quality factor (Q) ของวงจรในงานวิจัยเล่มนี้ ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ซึ่งจะอธิบายหลักการพื้นฐานของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์ Phase และ Magnitude เทียบกับความถี่ (ω) เป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ ฟังก์ชันโครงข่าย สามารถทำได้ด้วยการพล็อตกราฟ โดยฟังก์ชันโครงข่าย $H(s)$ เขียนสมการได้ดังนี้

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = k \frac{\prod_{i=1}^n (s - z_i)}{\prod_{i=1}^m (s - p_i)} \quad (2.27)$$

โดยค่า Pole (p) และ Zero (z) สามารถเป็นได้ทั้งค่าจำนวนจริง (Real) และค่าเชิงซ้อน (Imagine) ซึ่งเมื่อเขียนสมการให้อยู่ในรูปของขนาด $H(j\omega)$ จะได้เป็น

$$dB = 20 \log |H(j\omega)| \quad (2.28)$$

$$dB = 20 \log |k| - \sum_{i=1}^m 20 \log |j\omega - p_i| + \sum_{i=1}^n 20 \log |j\omega - z_i| \quad (2.29)$$

และสมการของ phase สามารถเขียนในรูปของ Radians ได้ดังนี้

$$Phase = \tan^{-1} \frac{I_m H(j\omega)}{R_e H(j\omega)} \quad (2.30)$$

$$Phase = \sum_{i=1}^n \tan^{-1} \left(\frac{I_m (j\omega - z_i)}{R_e (j\omega - z_i)} \right) - \sum_{i=1}^m \tan^{-1} \left(\frac{I_m (j\omega - p_i)}{R_e (j\omega - p_i)} \right) \quad (2.31)$$

การวิเคราะห์อย่างละเอียดมักใช้การประมาณค่าเพื่อนำมาพล็อตกราฟ ซึ่งการพล็อตด้วยการประมาณค่าในลักษณะของฟังก์ชัน Magnitude และ Phase เรียกว่า Bode Plot

ตัวประกอบในรูปของ $N(s)$ และ $D(s)$ สามารถแยกเป็นสี่แบบได้ ดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ k
2. ตัวประกอบ s
3. ตัวประกอบ $s + \alpha$
4. ตัวประกอบ $s^2 + \alpha s + \beta$

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การวิเคราะห์ตัวประกอบแบบที่สามเป็นหลัก เนื่องจากใช้ฟังก์ชันโครงข่ายการส่งผ่านอันดับหนึ่ง ด้วยการวิเคราะห์ตัวประกอบ $s + \alpha$ โดยฟังก์ชัน $H(s) = s + \alpha$ สามารถนำมาหาค่า magnitude และ phase ได้ด้วยสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

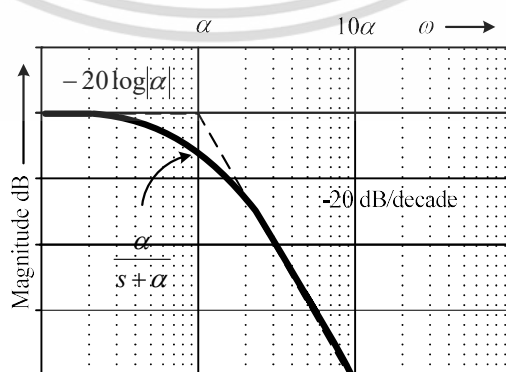
$$\text{Magnitude} = 20 \log_{10} |j\omega + \alpha| = 20 \log_{10} (\omega^2 + \alpha^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

$$\text{Phase} = \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\alpha} \right) \quad (2.33)$$

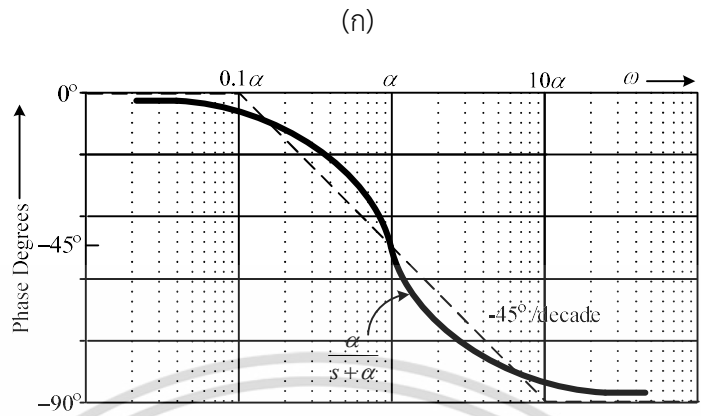
จากสมการที่ (2.33) แสดงเส้นกราฟความถี่ที่ phase 0° ไปจนถึงความถี่ที่ phase 90° ได้ดังรูปที่ 2.28 (ข) ใช้การวิเคราะห์ด้วยส่วนกลับของตัวประกอบกรณีสามซึ่งตรงกับสมการส่งผ่านของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่งโดยพล็อต magnitude และ phase ของ $\frac{\alpha}{s + \alpha}$ ซึ่งเปรียบค่าที่ได้จริงเป็นเส้นทึบ และค่าที่ประมาณด้วยทฤษฎีเป็นเส้นประ ซึ่งผลของ phase ที่ได้จากการประมาณค่าคือ $45^\circ/\text{decade}$ ทำให้เห็นว่าที่ความถี่ $\omega = \alpha$ มีการเลื่อน phase ไป 45°

รูปที่ 2.28 (ก) และ (ข) แสดง magnitude และ phase ของกรณิ pole เป็น $s = -\alpha$ โดยแทนสมการด้วย $\frac{\alpha}{s + \alpha}$ ตามลำดับ

คุณสมบัติพื้นฐานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน คือยอมให้การทำงานย่านความถี่ต่ำผ่านได้โดยมีค่าการสูญเสียน้อยมาก แต่ที่การทำงานย่านความถี่สูงนั้นทำหน้าที่เป็นตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator) รูปที่ 2.29 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยแสดงค่าการสูญเสีย (Loss) เทียบกับแกนความถี่ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านทำหน้าที่ให้สัญญาณผ่านได้ตั้งแต่ย่าน DC ไปจนถึงความถี่ที่จุด Cut-Off (ω_p) มีการลดทอนคือ $\max A$ (dB) ช่วงนี้ถูกเรียกว่าแถบความถี่ผ่าน (Pass Band) ช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง ω_p จนถึง ω_s ถูกเรียกว่าแถบเปลี่ยนผ่านความถี่ (Transition Band) และ เมื่อความถี่สูงกว่า ω_s จะเกิดการลดทอนของสัญญาณ ซึ่งย่านความถี่จาก ω_s ไปจนถึงความถี่อนันต์ถูกเรียกว่าแถบความถี่หยุด (Stop Band) โดย ω_s เรียกว่า ขอบความถี่หยุด

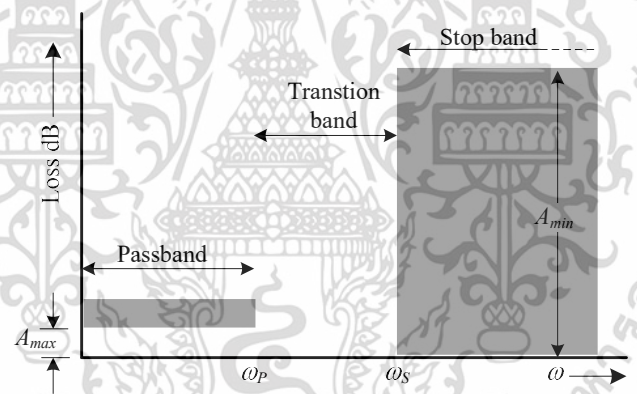


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.28 ผลการตอบสนองตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง
 (ก) พล็อตขนาดของ $\frac{\alpha}{s + \alpha}$ (ข) พล็อตเฟสของ $\frac{\alpha}{s + \alpha}$



รูปที่ 2.29 คุณสมบัติของวงจกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ในการสร้างวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณอลวน ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.2 มี State model ต้นแบบของหลายคน que คิดค้นแบบจำลองใช้สร้างและออกแบบวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณอลวนขึ้นมา ซึ่งแบบจำลองแต่ละชุดก็มีการพัฒนารูปแบบให้่ง่ายต่อการสร้างมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงปัจจุบัน ในหลายๆงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมความอลวนยังจำเป็นต้องใช้แบบจำลองต้นแบบเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อ เนื่องจากการคิดแบบจำลองใหม่ขึ้นมายังเป็นเรื่องยากและยังไม่มีทฤษฎีรองรับที่เพียงพอต่อการศึกษาหลักการสร้างของมันอย่างแน่ชัด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองที่สามารถออกแบบลักษณะสัญญาณอลวน ได้หลากหลายและมีเงื่อนไขของสมการที่ไม่ซับซ้อน โดยในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยอื่นๆที่สร้างวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณอลวนจากต้นแบบต่างๆที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้า รวมถึงงานวิจัยที่ใช้เป็นแนวทางในการศึกษาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

3.2 แบบจำลองที่ใช้เป็นแนวทางในการศึกษาของงานวิจัย

การสร้างวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณอลวนของงานวิจัยต่าง ๆ ที่นำเสนอในอดีตใช้หลักการสร้างบนพื้นฐานแบบจำลองต่างๆ ที่กล่าวไปในบทที่ 2 ซึ่งแต่ละงานมีการออกแบบโดยใช้อุปกรณ์หลักของงานวิจัยที่แตกต่างกัน มีการออกแบบทั้งในรูปแบบแรงดันและแบบกระแส สำหรับการประยุกต์สร้างวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณอลวนจากแบบจำลองต่างๆ มีดังต่อไปนี้

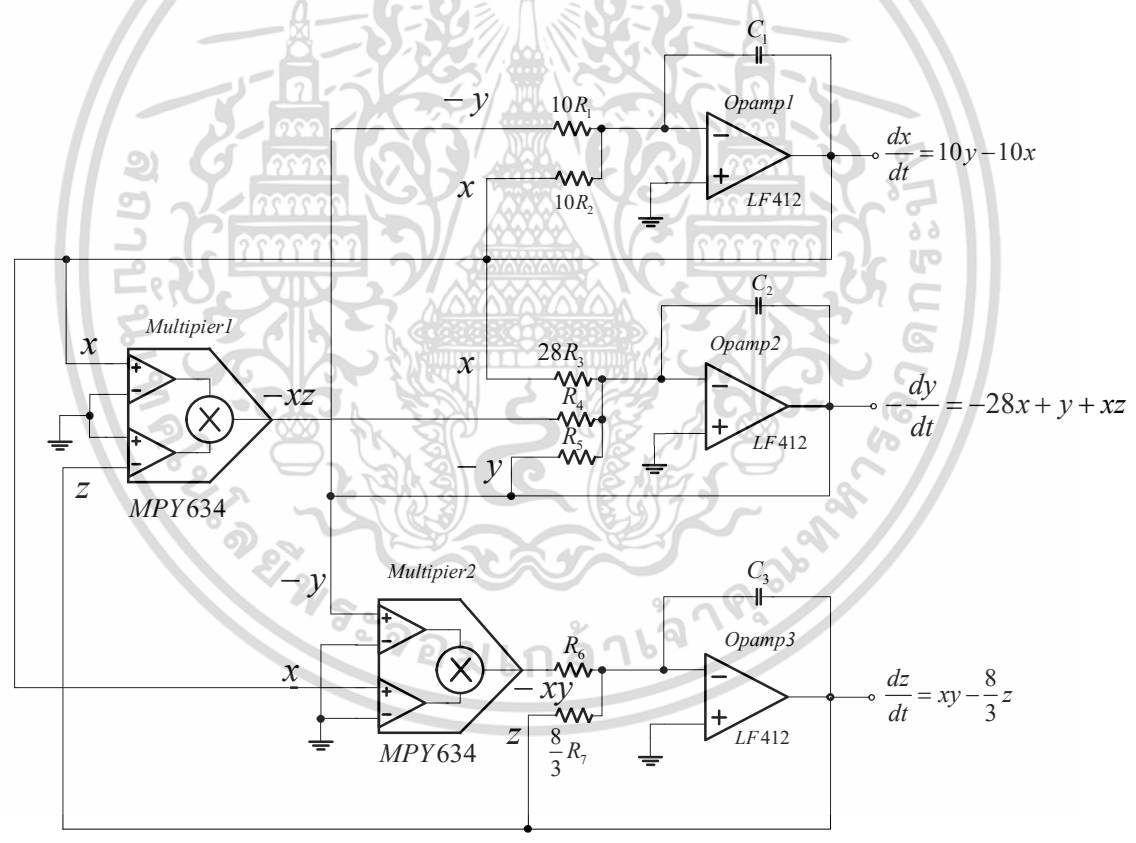
3.2.1 การออกแบบวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณอลวนแบบ Lorenz model

แบบจำลองของ Lorenz เป็นต้นแบบยุคแรกๆที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมความอลวน (Chaos behavior) ตัวอย่างงานที่จะนำเสนอนี้ออกแบบโดย Paul Horowitz เป็นวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณอลวน ด้วยแบบจำลอง Lorenz รูปแบบแรงดัน [56] ซึ่งมีสมการอนุพันธ์ที่ใช้สำหรับออกแบบดังสมการที่ (3.1) มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์หลัก 3 ตัว เพื่อปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ คือ $\alpha = 10$, $\lambda = 28$, และ $\beta = \frac{8}{3}$ และมีการกำหนดความไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้พจน์ xy และ xz จากสมการอนุพันธ์ของ Lorenz สามารถแบ่งออกเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่ง 3 สมการ และแทนค่าพารามิเตอร์ เพื่อง่ายต่อการออกแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= 10y - 10x \\ \frac{dy}{dt} &= 28x - y - xz \\ \frac{dz}{dt} &= xy - \frac{8}{3}z \end{aligned} \tag{3.1}$$

จากงานวิจัยมีการออกแบบโดยใช้อุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์ (Operational Amplifier: OA) ในการออกแบบ และใช้ตัวคูณแบบแอนะล็อกในการคูณตัวแปรเพื่อสร้างพจน์ไม่เป็นเชิงเส้น ออกแบบวงจรได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณลอเรนซ์แบบแรงดัน ด้วยแบบจำลอง Lorenz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณลอเรนซ์ด้วยแบบจำลอง Lorenz รูปแบบแรงดัน โดยใช้ อุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์ เบอร์ LF412 3 ตัว และใช้อุปกรณ์ตัวคูณแบบแอนะล็อก เบอร์ MPY634 2 ตัว กำหนดความต้านทานของวงจร $R_1, R_2 = 100k\Omega$; $R_3 = 35.7k\Omega$; $R_4, R_6 = 10k\Omega$; $R_5 = 1M\Omega$; และ $R_7 = 374k\Omega$; และใช้ตัวเก็บประจุ $C = 0.1\mu F$; เท่ากันทุกตัว ใช้ไฟเลี้ยงที่อุปกรณ์ทุกตัว $\pm 15V$ โดยตัวคูณแอนะล็อก *Multiplier1* ให้เอาต์พุตของตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้น $-xz$ และตัวคูณแอนะล็อก *Multiplier2* ให้เอาต์พุตของตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้น xy ซึ่งวงจรมีการออกแบบโดยใช้วงจรผลรวมอินทิเกรเตอร์ เพื่อให้ได้เอาต์พุตดังสมการที่ (3.1) จากวงจรรูปที่ 3.1 สามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอิสระอันดับหนึ่ง สามชุด ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} -C \frac{dx}{dt} &= -\left(-\frac{y}{R_1} + \frac{x}{R_2} \right) \\ -C \frac{d(-y)}{dt} &= \left(\frac{x}{R_3} - \frac{xz}{100R_4} - \frac{y}{R_5} \right) \\ -C \frac{dz}{dt} &= \left(-\frac{xy}{100R_6} + \frac{z}{R_7} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

จัดรูปใหม่ ได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{y}{CR_1} - \frac{x}{CR_2} \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{x}{CR_3} - \frac{xz}{100CR_4} - \frac{y}{CR_5} \\ \frac{dz}{dt} &= \frac{xy}{100CR_6} - \frac{z}{CR_7} \end{aligned} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) เมื่อจัดรูปให้ได้ดังสมการต้นแบบ (3.1) จะเห็นว่าวงจรสามารถควบคุมตัวแปรพารามิเตอร์ได้ ดังนี้

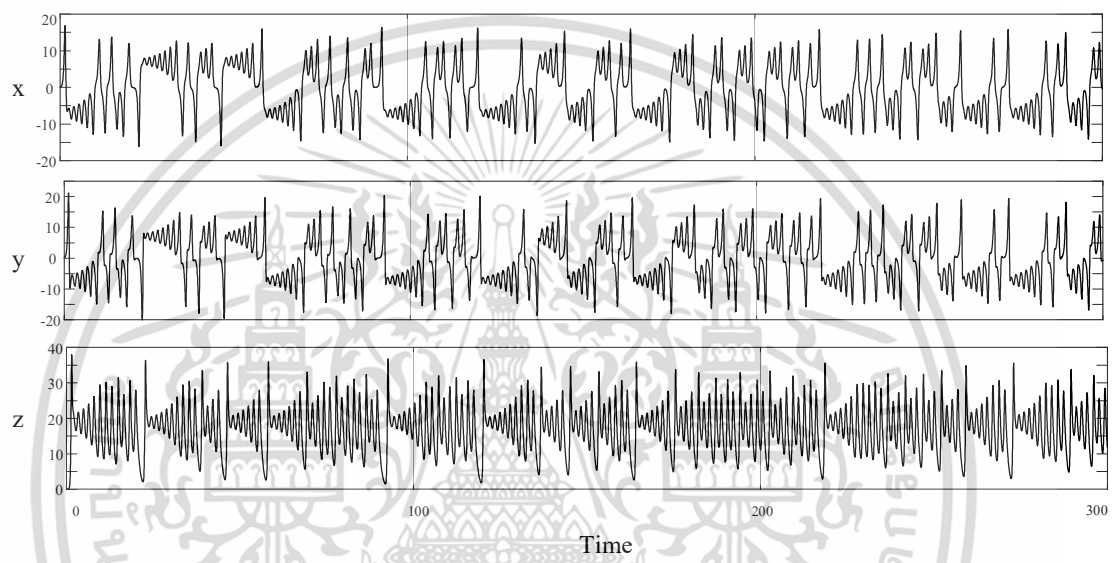
ปรับค่าตัวต้านทาน R_1, R_2 เพื่อปรับ α

ปรับค่าตัวต้านทาน R_3 เพื่อปรับ λ

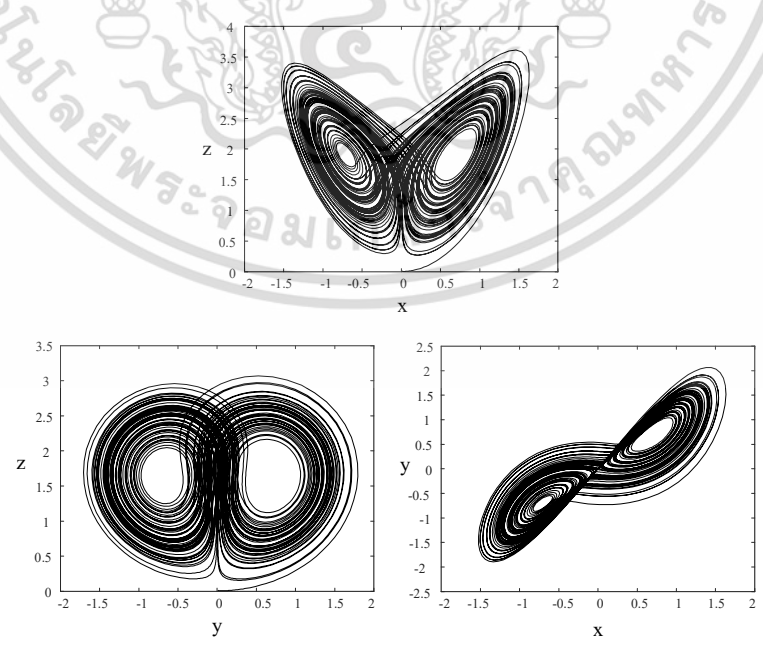
ปรับค่าตัวต้านทาน R_7 เพื่อปรับ β

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะปรับค่าพารามิเตอร์ให้ได้ $\alpha = 10, \lambda = 28$, และ $\beta = \frac{8}{3}$ ตามลำดับ ซึ่งวงจรสามารถดูสัญญาณของเอาต์พุตได้ที่ตำแหน่งเอาต์พุตของออปแอมป์ *Opamp1, Opamp2* และ *Opamp3* จะสังเกตว่าวงจรสามารถแสดงสัญญาณเอาต์พุตได้ 3 ตำแหน่ง ซึ่งสามารถแสดงเป็นลักษณะของสัญญาณแต่ละเอาต์พุตได้ดังรูปที่ 3.2 แสดงเป็นลักษณะของตัวดึงดูตอลวน 2 มิติ และ 3 มิติ ได้ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ

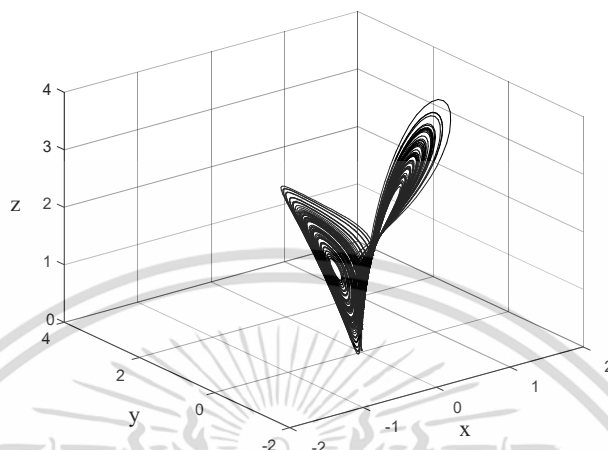


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะสัญญาณอลวนที่เอาต์พุต x, y, z จากวงจรแบบจำลอง Lorenz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ลักษณะตัวดึงดูดคู่ตอลวน 2 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Lorenz



รูปที่ 3.4 ลักษณะตัวดึงดูดคู่ตอลวน 3 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Lorenz

จากตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ที่สร้างจากแบบจำลองของ Lorenz จะเห็นว่ามีการมีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 3 ตัวในการปรับเงื่อนไขของวงจรให้สามารถกำเนิดสัญญาณที่มีพฤติกรรมความอลวน คือ α, λ และ β ดังสมการที่ (3.1) ทำให้มีการปรับค่าความต้านทานที่วงจรถึง 4 ตำแหน่ง คือ R_1, R_2, R_3 และ R_7 (กำหนดค่าตัวเก็บประจุคงที่ ที่ $C = 0.1\mu F$) จะสังเกตเห็นว่าวงจรที่สร้างจากแบบจำลองของ Lorenz ต้องมีการปรับเงื่อนไขให้คงที่ถึง 3 ตำแหน่ง และไม่สามารถออกแบบความไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างอิสระ เนื่องจากมีการกำหนดพจน์ของความไม่เป็นเชิงเส้น คือ xz และ xy ส่งผลให้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตัวคูณแอนะล็อก (Multiplier analog) เพิ่มถึง 2 ตัว คือ *Multipler1, Multipler2* ดังรูปที่ 3.1 เพื่อสร้างการคูณกันของตัวแปร State อีกทั้งยังไม่สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัญญาณและลักษณะของตัวดึงดูดคู่ตอลวนได้ จากความไม่เป็นเชิงเส้นที่ถูกกำหนดด้วยแบบจำลอง แต่หลังจากนั้นได้มีแบบจำลองที่ลดความซับซ้อนของพจน์ไม่เป็นเชิงเส้นลง โดยใช้พจน์ไม่เป็นเชิงเส้นแค่ตำแหน่งเดียว ทำให้สามารถลดการคูณกันของตัวแปร State ไปได้ 1 ตำแหน่ง วงจรที่ออกแบบจึงสามารถลดอุปกรณ์ตัวคูณแอนะล็อกไปได้ 1 ตัว แบบจำลองนั้นชื่อว่า Rössler model

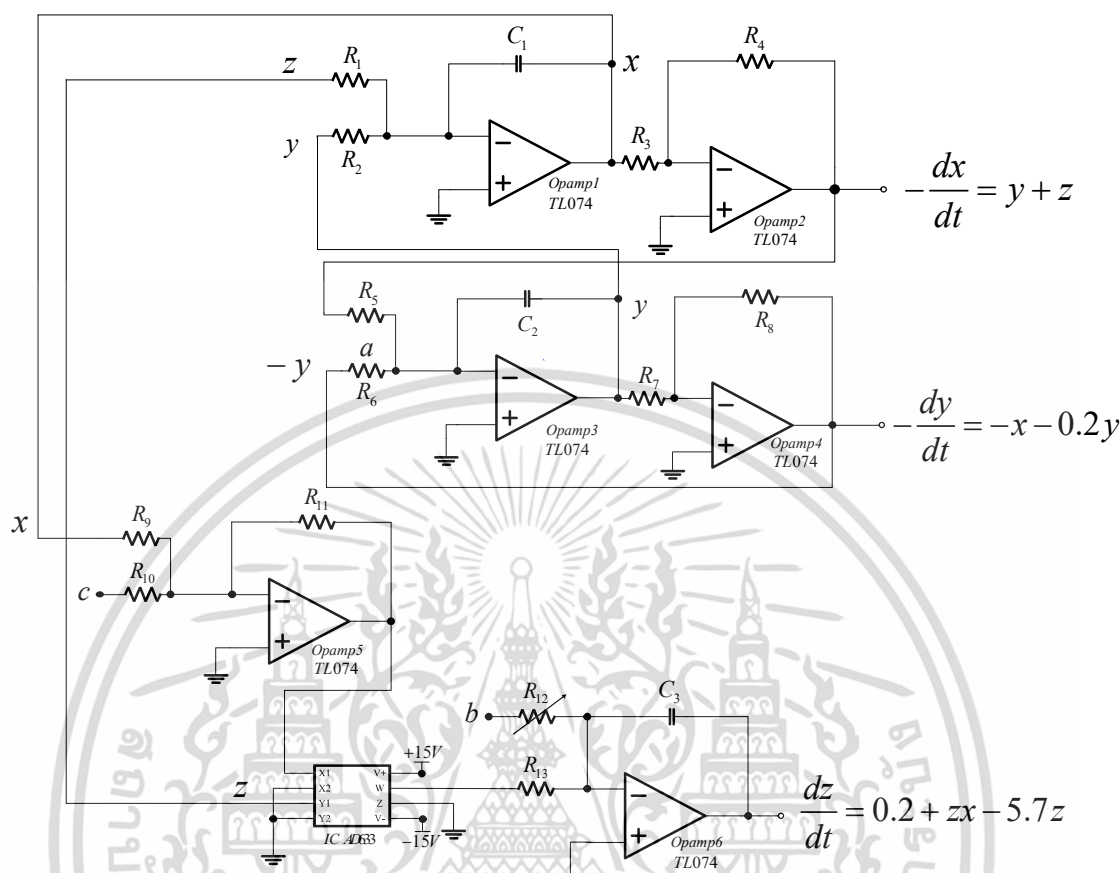
3.2.2 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบ Rössler model

ต่อมาได้มีการนำแบบจำลองต้นแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ที่มีความซับซ้อนน้อยลง และออกแบบได้ง่ายกว่า มาออกแบบเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบแรงดัน โดย Glensstuff [57] ซึ่งแบบจำลองมีการใช้สมการต้นแบบดังสมการที่ (2.2) โดยมีการปรับเงื่อนไขพารามิเตอร์สำหรับกำเนิด

สัญญาณ 3 ตำแหน่ง กำหนดพารามิเตอร์ $a = 0.2, b = 0.2$ และ $c = 5.7$ และใช้พจน์ของความไม่เป็นเชิงเส้น แค่ 1 พจน์ คือ zx เขียนเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่ง 3 สมการ ที่ใช้สำหรับออกแบบได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -y - z \\ \frac{dy}{dt} &= x + 0.2y \\ \frac{dz}{dt} &= 0.2 + zx - 5.7z\end{aligned}\tag{3.4}$$

จากแบบจำลองของ Rössler มีต้นแบบที่สำคัญมาจาก แบบจำลองของ Lorenz ซึ่งมาพัฒนาต่อให้การออกแบบซับซ้อนน้อยลง โดยลดพจน์ของความไม่เป็นเชิงเส้นลง 1 ตำแหน่ง แต่ยังคงลักษณะความเป็นสัญญาณอลวน มีการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ โดยปรับพารามิเตอร์ 3 ตำแหน่ง จากสมการอนุพันธ์ สมการที่ (3.4) สามารถออกแบบเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้ ดังรูปที่ 3.5

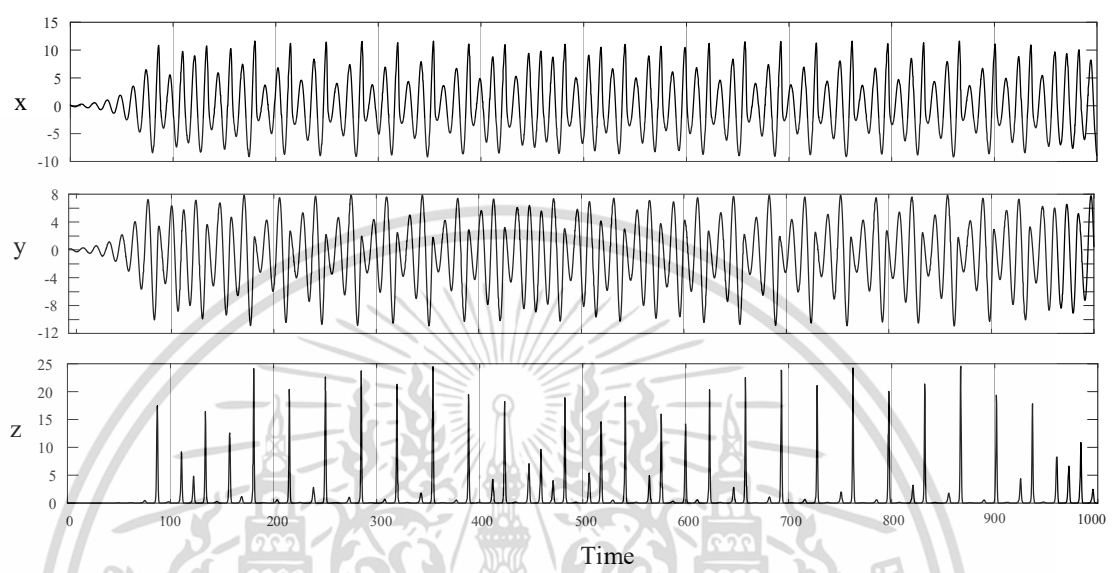


รูปที่ 3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบแรงดัน ด้วยแบบจำลอง Rössler

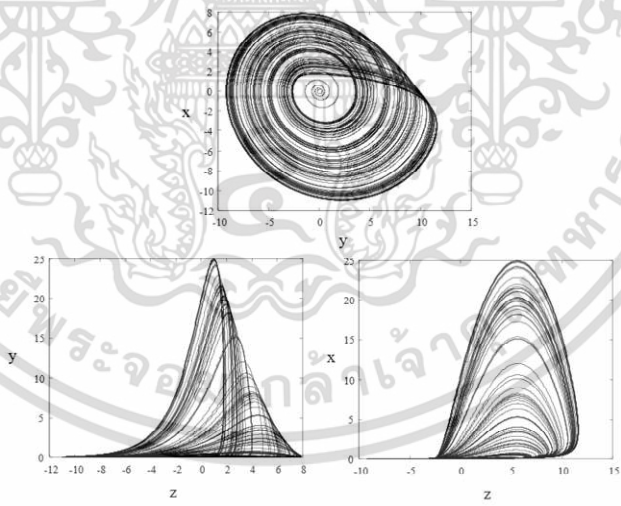
จากรูปที่ 3.5 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน รูปแบบแรงดันจากแบบจำลอง Rössler ที่ออกแบบโดย Glensstuff โดยมีการใช้อุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์เบอร์ TL074 และตัวคูณแอนะล็อก เบอร์ AD633 1 ตัว มีการกำหนดค่าตัวต้านทาน $R_1, R_2, R_5 = 100k\Omega$; $R_3, R_4, R_7, R_8, R_9 = 10k\Omega$; $R_{13} = 5.1k\Omega$; และค่าตัวเก็บประจุ $C = 2.2nF$; เท่ากันทุกตัว จ่ายไฟเลี้ยงให้อุปกรณ์ทุกตัว $\pm 15V$ โดยที่ R_6, R_{10} และ R_{12} เป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรให้ตรงตามเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณของแบบจำลอง จะได้ $R_6 = 560k\Omega$; $R_{10} = 56k\Omega$; $R_{12} = 390k\Omega$; ตรงตามค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (3.7) - (3.9) สำหรับ R_6, R_{10} เป็นการกำหนดเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ $a = 0.2, c = 5.7$ ตามที่แบบจำลอง Rössler ใช้ แต่สามารถปรับลักษณะของรูปแบบตัวดึงดูดได้อีก จากค่าพารามิเตอร์ b โดยการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ R_{12} จากวงจรสามารถจับเอาต์พุต x, y, z ได้ที่ตำแหน่ง *Opamp2, Opamp4* และ *Opamp6* ตามลำดับ ซึ่งสามารถจับเอาต์พุตทั้ง 3 ตำแหน่ง โดยแสดงเป็นลักษณะสัญญาณอลวนได้ ดังรูปที่ 3.6 แสดงเป็นลักษณะตัวดึงดูดอลวน 2 มิติ ด้วยการจับเอาต์พุต 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งพร้อมกันได้ดังรูปที่ 3.7 และแสดงเป็นลักษณะตัวตั้งตุลอลวน 3 มิติ ของแบบจำลอง Rössler ได้ดังรูปที่ 3.8

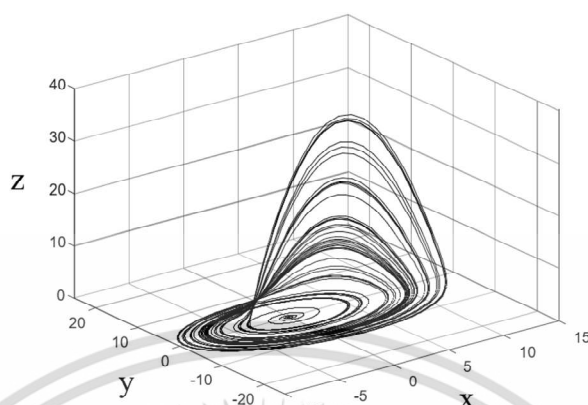


รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะสัญญาณอลวน ที่เอาต์พุต x, y, z จากวงจรแบบจำลอง Rössler



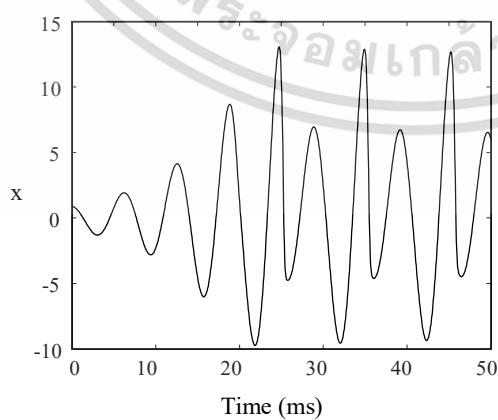
รูปที่ 3.7 ลักษณะตัวตั้งตุลอลวน 2 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Rössler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ลักษณะตัวดึงดูดอลวน 3 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Rössler

จากตัวอย่างของงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า ในการออกแบบวงจร ดังรูปที่ 3.5 มีการใช้ตัวคูณแอนะล็อกแค่ 1 ตัว เพื่อสร้างพจน์ความไม่เป็นเชิงเส้น แต่ยังคงปรับค่าตัวต้านทาน 3 ตำแหน่ง เพื่อปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณของ Rössler ซึ่งการลดตำแหน่งของความไม่เป็นเชิงเส้นลง 1 ตำแหน่ง มีข้อดีต่อการออกแบบที่ซับซ้อนน้อยลง แต่ก็มีข้อเสียตามมา สังเกตได้จากรูปที่ 3.6 ถึง 3.8 ลักษณะการแกว่ง (Oscillation) ของสัญญาณที่ได้ ถึงจะมีลักษณะการแกว่งของค่าที่ไม่ซ้ำกันที่คงอยู่ในรูปแบบของสัญญาณอลวน แต่มีผลให้ช่วงการแกว่งของคาบ (period) น้อยลง จากการลดของพจน์ความไม่เป็นเชิงเส้น 1 พจน์ แสดงลักษณะสัญญาณเปรียบเทียบให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.9 และมีการบิด (distortion) ของลักษณะตัวดึงดูดอลวน ที่น้อยลง จากรูปที่แสดง Phase space รูปที่ 3.7 และ 3.8 จะสังเกตเห็นว่ามีลักษณะการบิดของเส้นวงโคจร (Trajectory) แคบๆ เดียว ทำให้แบบจำลองของ Rössler ที่ใช้ออกแบบแม้จะลดตัวแปรส State ลง แต่ยังมีข้อเสียในการแสดงผลอยู่



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

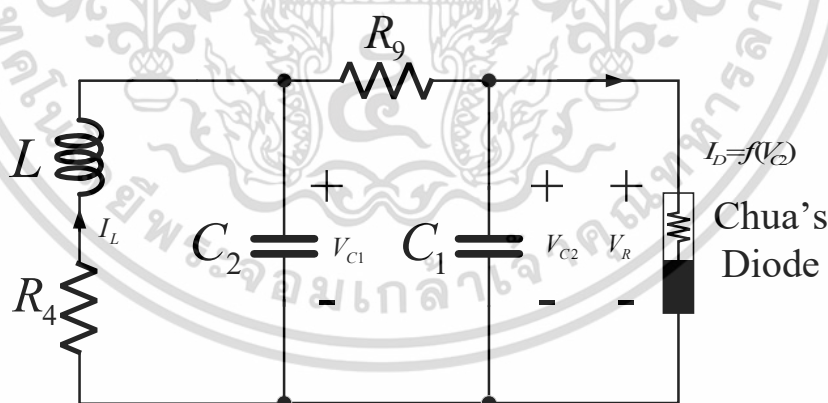
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบลักษณะการแกว่งของคาบสัญญาณอลวน (Chaos Periodic) ในหนึ่งช่วงเวลาที่เท่ากัน

(ก) ลักษณะสัญญาณอลวน ของ Rössler (ข) ลักษณะสัญญาณอลวน ของ Lorenz

แต่หลังจากนั้นก็มีแบบจำลองที่สามารถออกแบบให้ลักษณะของสัญญาณมีการแกว่งที่ชัดเจน และลักษณะของตัวดึงดูดอลวน มีการบิดเป็นเส้นวงโคจร 2 วง โดยใช้ตำแหน่งความไม่เป็นเชิงเส้นแค่ 1 ตำแหน่ง และมีการปรับพารามิเตอร์ลดลงเหลือแค่ 2 ตัว โดยจะกล่าวถึงแบบจำลองนี้ในหัวข้อถัดไป

3.2.3 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ (Chaos) แบบ Chua model

แบบจำลองชุดนี้ถูกคิดค้นโดย Leon Ong Chua ซึ่งแบบจำลองของ Chua เป็นแบบจำลองที่น่าสนใจและโดดเด่นในสาขาของระบบอลวน เนื่องจากวงจรมีความเรียบง่าย และมีการแสดงตัวดึงดูดอลวน ที่ชัดเจนด้วยลักษณะเส้นวงโคจร 2 วง (double scroll) และสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบในการออกแบบวงจรได้หลากหลาย มีรูปวงจรต้นแบบดังรูปที่ 3.10 จากวงจรสามารถดัดแปลงได้ทั้งตัวเหนี่ยวนำ (inductor) และไดโอดที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นของ Chua (Diode's Chua) รวมถึงมีการปรับพารามิเตอร์แค่ 2 ตัว และออกแบบความไม่เป็นเชิงเส้นแค่ 1 ตำแหน่ง เห็นได้จากสมการที่ (3.5) โดยจะยกงานวิจัยที่มีการนำวงจรต้นแบบของ Chua ไปออกแบบ และชี้ให้เห็นถึงข้อดีข้อเสียในการใช้แบบจำลองของ Chua



รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวน พื้นฐาน ของ Leon Ong Chua

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \alpha(-x + y - f(x)) \\ \frac{dy}{dt} &= x - y + z \\ \frac{dz}{dt} &= -\beta y\end{aligned}\quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.5) กำหนด α และ β คือ พารามิเตอร์ควบคุม $f(x)$ คือ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตำแหน่ง เป็นความต้านทานเชิงลบที่ได้จากไดโอดของ Chua จากวงจรรูปที่ 3.9 สามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยอิสระอันดับหนึ่ง 3 สมการ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}C_2 \frac{dV_{C_2}}{dt} &= \left(\frac{V_{C_1} - V_{C_2}}{R_9} \right) - f(V_{C_2}) \\ C_2 \frac{dV_{C_1}}{dt} &= \left(\frac{V_{C_1} - V_{C_2}}{R_9} \right) - I_L \\ L \frac{dI_L}{dt} &= V_{C_1} - R_4 I_L\end{aligned}\quad (3.6)$$

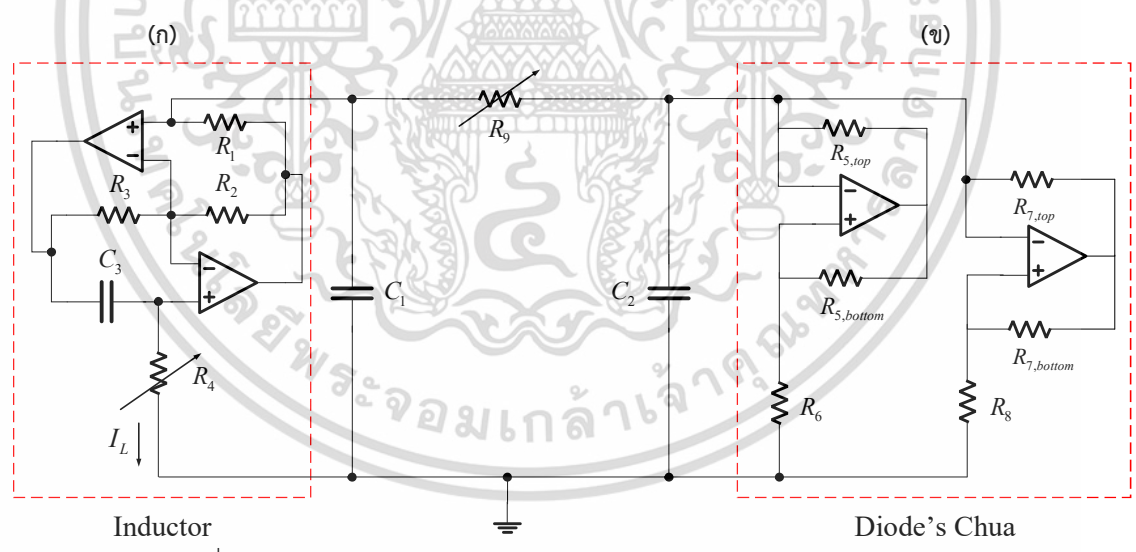
จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned}\frac{dV_{C_2}}{dt} &= \left(\frac{1}{R_9 C_2} \right) (V_{C_1} - V_{C_2}) - \left(\frac{1}{C_2} \right) f(V_{C_2}) \\ \frac{dV_{C_1}}{dt} &= \left(\frac{1}{R_9 C_2} \right) (V_{C_1} - V_{C_2}) - \left(\frac{1}{C_2} \right) I_L \\ \frac{dI_L}{dt} &= \left(\frac{1}{L} \right) V_{C_1} - \left(\frac{R_4}{L} \right) I_L\end{aligned}\quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.5) และ (3.7) เมื่อดูเปรียบเทียบกับวงจรรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณโดยปรับพารามิเตอร์ควบคุมของระบบ 2 ตำแหน่ง คือที่ α และ β ซึ่งภายในวงจรสามารถปรับได้โดยปรับค่าตัวต้านทาน R_4 และ R_9 ของวงจร ในแบบจำลองของ Chua การปรับค่าพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับรูปแบบสร้างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้จากค่า $v-i$ จากตำแหน่งไดโอดของ Chua ด้วย ด้วยเหตุนี้ แบบจำลองของ Chua จึงสามารถออกแบบได้อย่างอิสระตามรูปแบบการสร้างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นของวงจร และยังมี การปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณแค่ 2 ตำแหน่ง

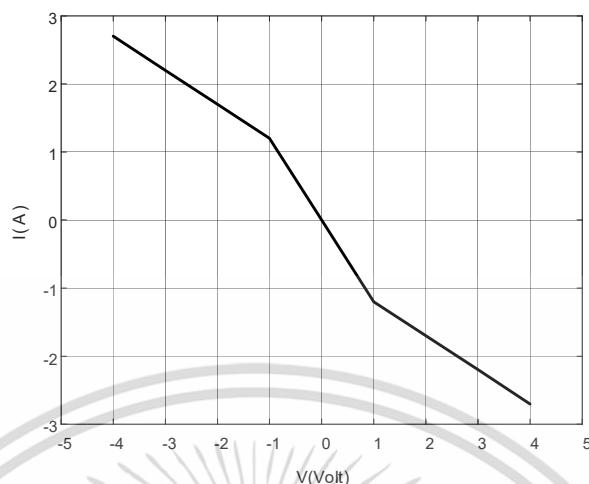
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างงานวิจัยที่จะนำเสนอจากแบบจำลองของ Chua ถูกออกแบบและวิเคราะห์โดย Trent Ziemer เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน รูปแบบแรงดัน [58] โดยมีการดัดแปลงจากวงจรต้นแบบของ Chua จากรูปที่ 3.9 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรไม่สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำทั่วไปเพียง 1 ตัวได้ เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำปกติมีความต้านทานภายในสูงเกินไปที่จะนำไปใช้ออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน และได้โอดจากทางขวาของรูปที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นก็ไม่สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ไดโอดปกติเพียง 1 ตัว ได้ มันทำงานเป็นตัวต้านทานเชิงลบที่ไม่เป็นเชิงเส้นหมายความว่า มันทำงานตรงข้ามกับตัวต้านทานปกติแบบบวก โดยตัวต้านทานปกติจะลดแรงดันไฟฟ้าต่างขั้วตามสัดส่วน ไปยังกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน แต่ตัวต้านทานเชิงลบจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าต่างขั้วตามสัดส่วนไปยังกระแสที่ไหลผ่าน ซึ่งอุปกรณ์จากรูปต้นแบบเป็นเพียงทฤษฎีส่วหนึ่งที่ใช้ในการต่อยอดเพื่อสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน แต่ด้วยทฤษฎีจากแบบจำลองของวงจรและทางคณิตศาสตร์ของ Chua ไม่ได้มีความซับซ้อน และยังถือว่าออกแบบได้ง่าย เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่เคยมีมา การดัดแปลงตัวเหนี่ยวนำและไดโอดของวงจรจึงเป็นข้อดีที่ทำให้วงจรต้นแบบของ Chua สามารถนำไปต่อยอดได้หลากหลายในเชิงปฏิบัติ ซึ่งวงจรของ Trent Ziemer มีการดัดแปลงตัวเหนี่ยวนำและไดโอดของ Chua ออกมาด้วยอุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์ ซึ่งออกแบบแล้วได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.11 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ดัดแปลงจากวงจรต้นแบบของ Chua

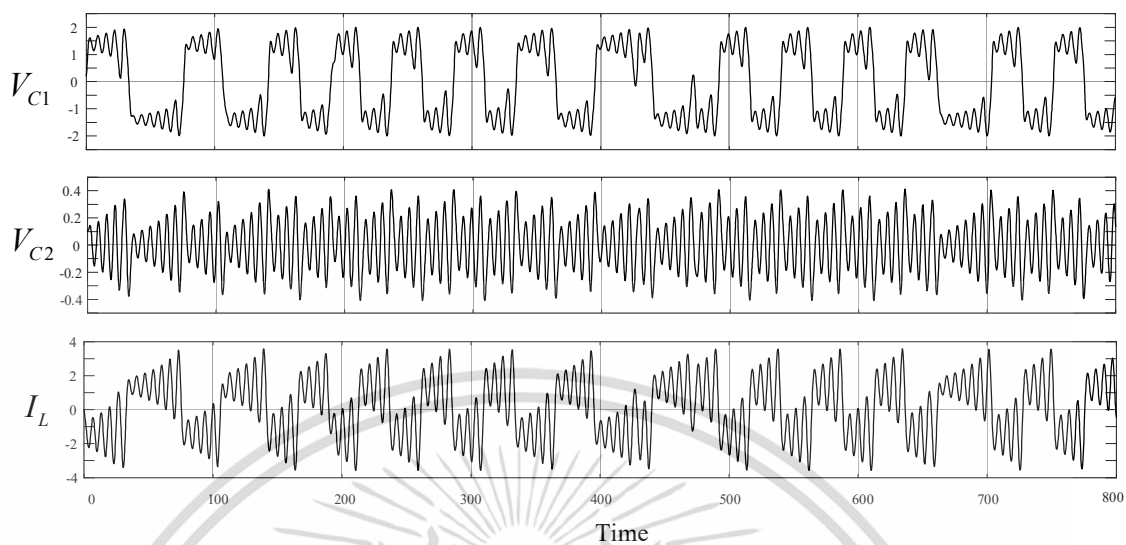
จากรูปที่ 3.11 บล็อก (ก) และ (ข) เป็นการสร้างวงจรเพื่อให้ได้คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานเชิงลบ ตามลำดับ โดยบล็อก (ข) จะสร้างลักษณะของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 3.12



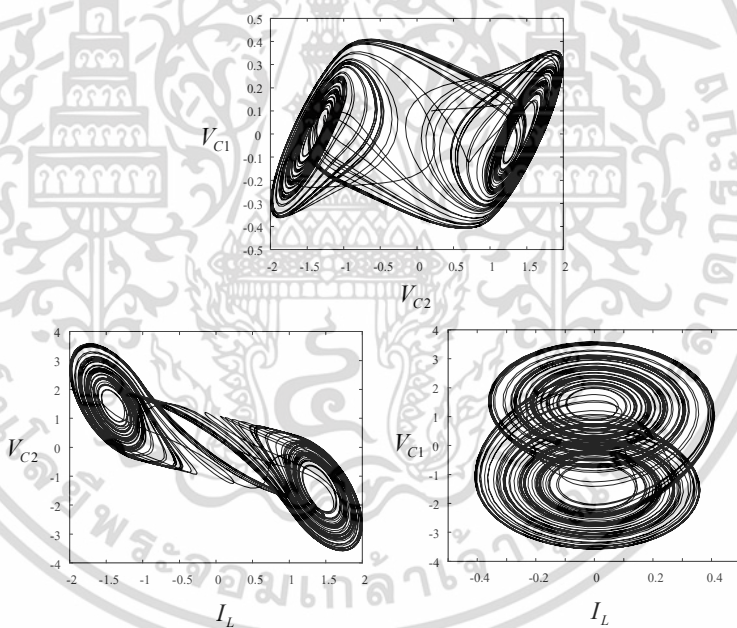
รูปที่ 3.12 ลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้จากไดโอด Chua พล็อตแกน $v-i$
 จากรูป 3.12 เป็นการสร้างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นจากสมการ

$$f(x) = Gb \cdot x + \frac{1}{2}(Ga - Gb)(|x + E| - |x - E|) \quad (3.8)$$

โดยมีเงื่อนไขในการปรับ Slope ของฟังก์ชันคือ $Ga < Gb < 0$ และกำหนด $E = 1$ ซึ่งกำหนดโดยค่าตัวต้านทานในบล็อก (B) รูปที่ 3.10 คือ $R_{5,top} = 17.63k\Omega$, $R_{5,bottom} = 17.74k\Omega$, $R_{7,top} = 212.8\Omega$, $R_{7,bottom} = 213.3\Omega$; และ $R_6 = 2.7k\Omega$, $R_8 = 1.4k\Omega$, ทำให้ได้ลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้สำหรับกำเนิดสัญญาณอลวน ดังรูปที่ 3.12 สามารถดูการสร้างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นของไดโอด Chua ด้วยวิธีต่างๆได้ใน [30] และมีการกำหนดค่าตัวต้านทานอื่นๆของวงจร คือ $R_1 = 99\Omega$, $R_2 = 103.2\Omega$, และ $R_3 = 1k\Omega$, กำหนดตัวเก็บประจุในวงจร $C_1 = 102nF$, $C_2 = 9.2nF$, และ $C_3 = 99.2nF$; จากการกำหนดค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุในบล็อก (A) ทำให้ได้ค่าตัวเหนี่ยวนำในวงจร $L = 119mH$; ใช้ไฟเลี้ยงให้อุปกรณ์ทุกตัว $\pm 15V$ ซึ่ง R_4, R_9 คือตัวต้านทานปรับแรงดันกำเนิดสัญญาณของวงจร ซึ่งค่าที่ทำให้เกิดการกำเนิดสัญญาณ คือ $R_4 = 1.36k\Omega$, $R_9 = 260\Omega$; เมื่อปรับเงื่อนไขของวงจรตามที่กำหนด จะได้สัญญาณอลวน ดังรูปที่ 3.13 โดยจับเอาต์พุตได้ 3 ตำแหน่งจากวงจรเป็นเอาต์พุตแรงดัน 2 เอาต์พุต และเอาต์พุตกระแส 1 เอาต์พุต แสดงเป็นลักษณะตัวดึงดูด 2 มิติ บนพื้นที่เฟส (Phase space) ทั้ง 3 ด้าน ได้ดังรูปที่ 3.14 และแสดงเป็นลักษณะตัวดึงดูด 3 มิติ ได้ดังรูปที่ 3.15

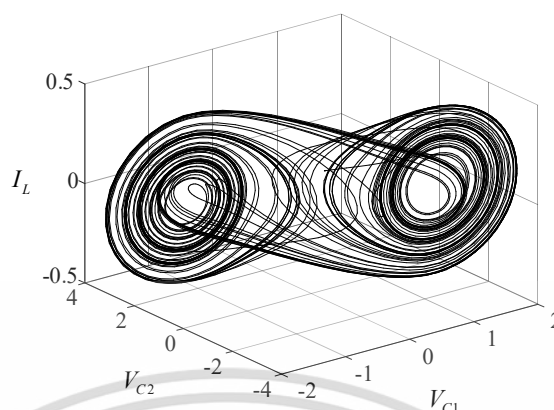


รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะสัญญาณอลวน จากวงจรแบบจำลอง Chua



รูปที่ 3.14 ลักษณะตัวดึงดูดอลวน 2 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Chua

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



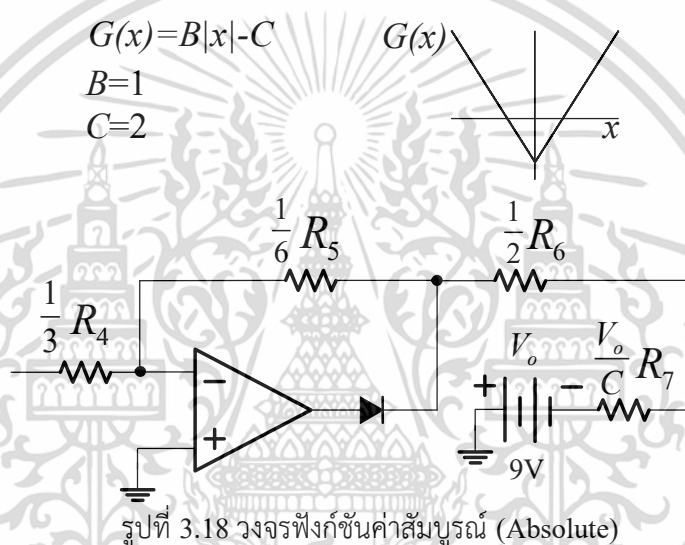
รูปที่ 3.15 ลักษณะตัวดึงดูดอลวน 3 มิติ จากวงจรแบบจำลอง Chua

จากตัวอย่างวงจรที่นำเสนอจากแบบจำลองของ Chua จะเห็นได้จากการออกแบบวงจรในรูปที่ 3.11 วงจรย่อยในบล็อก (ก) ทำหน้าที่เป็นคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำของวงจรต้นแบบ และวงจรย่อยในบล็อก (ข) ทำหน้าที่เป็นคุณสมบัติไดโอดหรือตัวต้านทานเชิงลบจากวงจรต้นแบบ ซึ่งในหลายวิจัยสามารถนำวงจรต้นแบบของ Chua ไปดัดแปลงได้หลากหลายจากคุณสมบัติของอุปกรณ์ทั้งสอง ทำให้ง่ายต่อการออกแบบ และโครงสร้างในการปรับเงื่อนไขที่ไม่ซับซ้อนจากการปรับพารามิเตอร์เพียง 2 ตำแหน่ง และออกแบบวงจรไม่เป็นเชิงเส้นแค่ 1 ตำแหน่งโดยที่ไม่ต้องมีอุปกรณ์ตัวคูณเพื่อสร้างพจน์ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear terms) ทำให้แบบจำลองของ Chua มักถูกใช้เข้าไปเป็นต้นแบบในการออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน แต่วงจรก็ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากวงจรต้นแบบถูกออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.10 จึงไม่สามารถนำไปออกแบบแยกส่วนได้อย่างอิสระ รวมถึงฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ออกแบบถูกกำหนดด้วยรูปแบบฟังก์ชันที่ตายตัว ด้วยคุณสมบัติตัวต้านทานเชิงลบ ซึ่งจะสามารถปรับค่าคงที่และ Slope ของฟังก์ชันได้ แต่ยังคงมีลักษณะที่ทำให้เกิดรูปแบบการแกว่งของสัญญาณอลวนแบบเดิม ดูได้จากรูปแบบของตัวดึงดูดอลวน ดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 แต่ถึงแม้จะมีข้อจำกัดอยู่ ด้วยความเรียบง่ายและสะดวกต่อการออกแบบเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่เคยมีมา แบบจำลองของ Chua จึงถือเป็นต้นแบบที่สำคัญของระบบอลวน (Chaos system)

3.2.4 การออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนแบบ Jerk model

แบบจำลอง Jerk model ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Julien Clinton sportt ในปี ค.ศ.2000 [12] เป็นแบบจำลองต้นแบบในการออกแบบวงจรของงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยมีรูปแบบสมการอนุพันธ์อันดับสาม ดังสมการที่ (3.9) และ State Block diagram สำหรับออกแบบดังรูปที่ 3.16

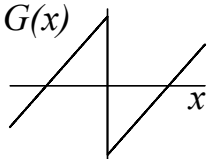
จากวงจรรูปที่ 3.17 เป็นการออกแบบวงจรจาก Jerk model โดยใช้อุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์เบอร์ AD844/AD และอุปกรณ์แพสซีฟ RC เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณ ซึ่งมีตำแหน่ง $G(x)$ สำหรับแทนฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้วงจรสามารถกำเนิดสัญญาณเป็นพฤติกรรมมอลวนได้ ซึ่งจะยกตัวอย่างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในวงจรรูปที่ 3.17 มา 2 ฟังก์ชัน คือฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ (Absolute) และฟังก์ชันสัญญาณแบบตัดแปลง มีการออกแบบวงจรและกำหนดค่าคงที่ต่างๆในวงจรด้วย RC ดังต่อไปนี้

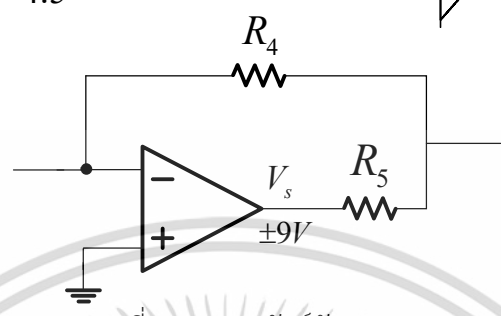


รูปที่ 3.18 เป็นการออกแบบวงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นค่าสัมบูรณ์ (Absolute) โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ AD845/AD และไดโอดเบอร์ D1N4148 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีการกำหนดค่าคงที่ให้ฟังก์ชันด้วยค่า B และ C โดยสามารถกำหนดค่า B ได้ด้วย R_4, R_5 และ R_6 และกำหนดค่าคงที่ C ได้ด้วย R_7 จากฟังก์ชันที่ออกแบบมีการกำหนดค่า $B=1$ โดยปรับค่า R_4, R_5 และ R_6 เป็นสัดส่วนกันดังรูป จะได้ค่า $R_4 = 3.33k\Omega, R_5 = 1.67k\Omega$ และ $R_6 = 5k\Omega$ และค่าคงที่ $C=2$ กำหนดด้วย $R_7 = 45k\Omega$ ก็จะได้ลักษณะฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ที่ใช้ในวงจรกำเนิดสัญญาณมอลวน

$$G(x) = Bx - C \operatorname{sgn}(x)$$

$$B=1.2$$

$$C=4.5$$




รูปที่ 3.19 วงจรฟังก์ชัน Signum

รูปที่ 3.19 เป็นการออกแบบวงจรฟังก์ชันไม่เชิงเส้น $G(x)$ ประกอบด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นกับฟังก์ชันสัญลักษณ์ Signum ใช้อุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์ เบอร์ AD845/AD ในการสร้างวงจร มีการกำหนดค่าคงที่ให้ฟังก์ชันโดยกำหนด $B=1.2$ ด้วย $R_4 = 8.33k\Omega$ และ $C=4.5$ ด้วย $R_5 = 20k\Omega$ จะได้ลักษณะฟังก์ชันดังรูปที่ใช้ในวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่ออกแบบจาก Jerk model

โดยมีการกำหนดค่า RC ให้กับวงจรหลักที่ต่างกันของแต่ละฟังก์ชัน โดยสามารถปรับค่าคงที่ k ได้ที่ C_1 และ C_2 ของวงจรหลัก

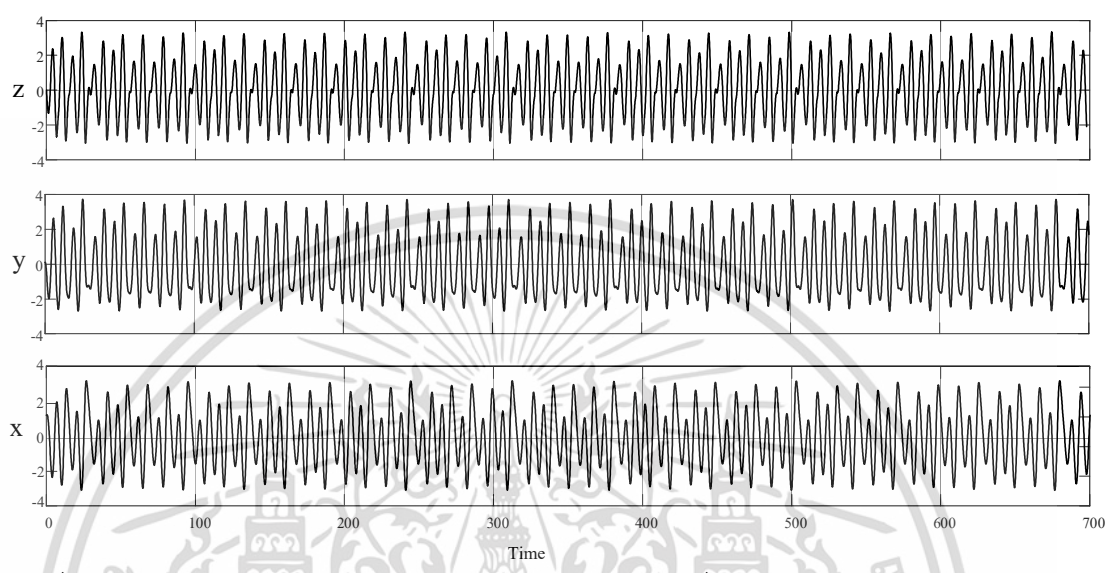
ตารางที่ 3.1 ค่า RC ที่ใช้ในวงจรหลัก

อุปกรณ์ RC วงจรรูปที่ 3.17	ค่า RC	
	ฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ (Absolute)	ฟังก์ชัน Signum
C_1	0.01 μF	0.50 μF
C_2	0.50 μF	25.0 μF
C_3	0.02 μF	1.00 μF
R_1	1k Ω	1k Ω
R_2	1k Ω	1k Ω
R_3	1k Ω	1k Ω

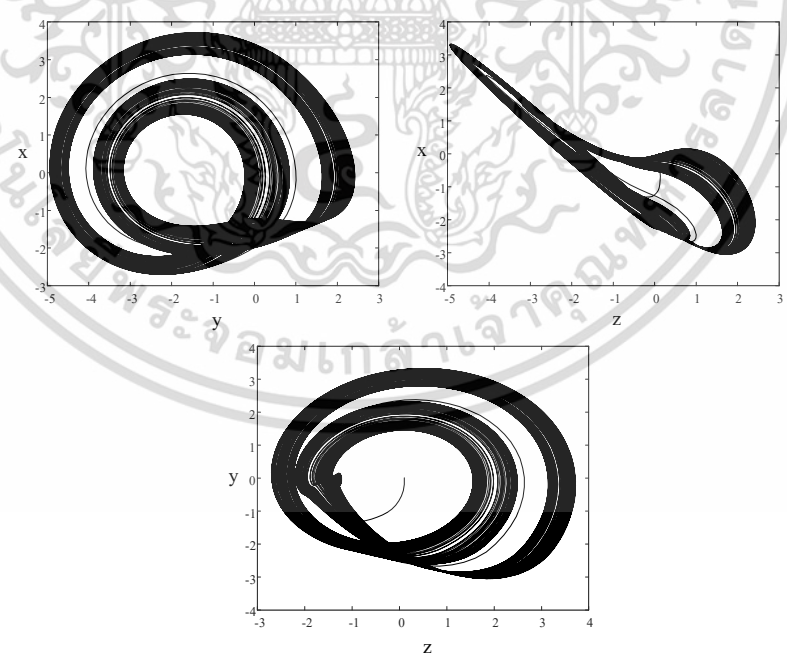
เมื่อกำหนดค่า RC ดังตารางที่ 3.1 ในการกำเนิดสัญญาณอลวนของงานวิจัยนี้สามารถปรับค่าคงที่ B และ C ที่วงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อปรับรูปแบบของสัญญาณได้ โดยสามารถจับตำแหน่งเอาต์พุต x, y, z ได้ที่ตำแหน่งของวงจรหลัก รูปที่ 3.17 สำหรับ $G(x) = |x| - 2$ ใช้ $k=0.6$ แสดงลักษณะของสัญญาณอลวน ทั้ง 3 เอาต์พุตได้ดังรูป 3.20 แสดงเป็นลักษณะตัวดิ่งดูอลวน 2 มิติ ได้ดังรูป 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยการจับตำแหน่งเอาต์พุตพร้อมกัน 2 ตำแหน่ง และแสดงเป็นลักษณะตัวดึงดูดคอวน 3 มิติ ได้ดังรูปที่ 3.22 ด้วยการจับตำแหน่งเอาต์พุตพร้อมกันทั้ง 3 ตำแหน่ง

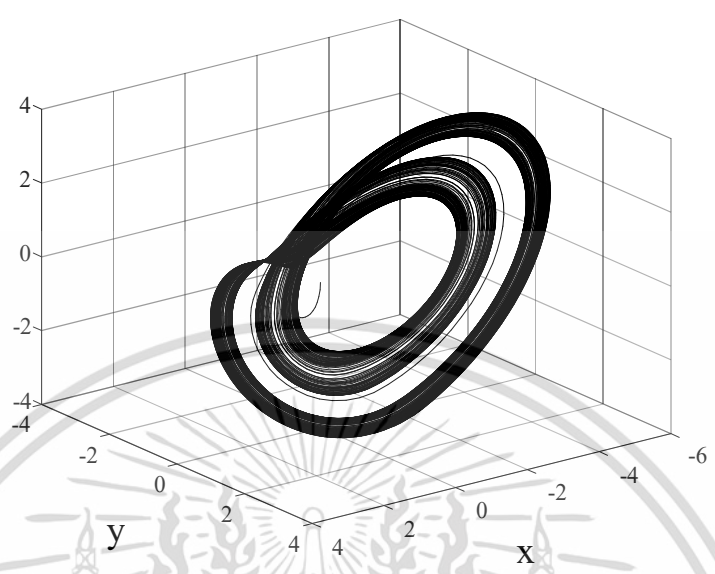


รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะสัญญาณคอวน จากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นค่าสัมบูรณ์ (Absolute) โดยกำหนด $B=1, C=2$ และ $k=0.6$



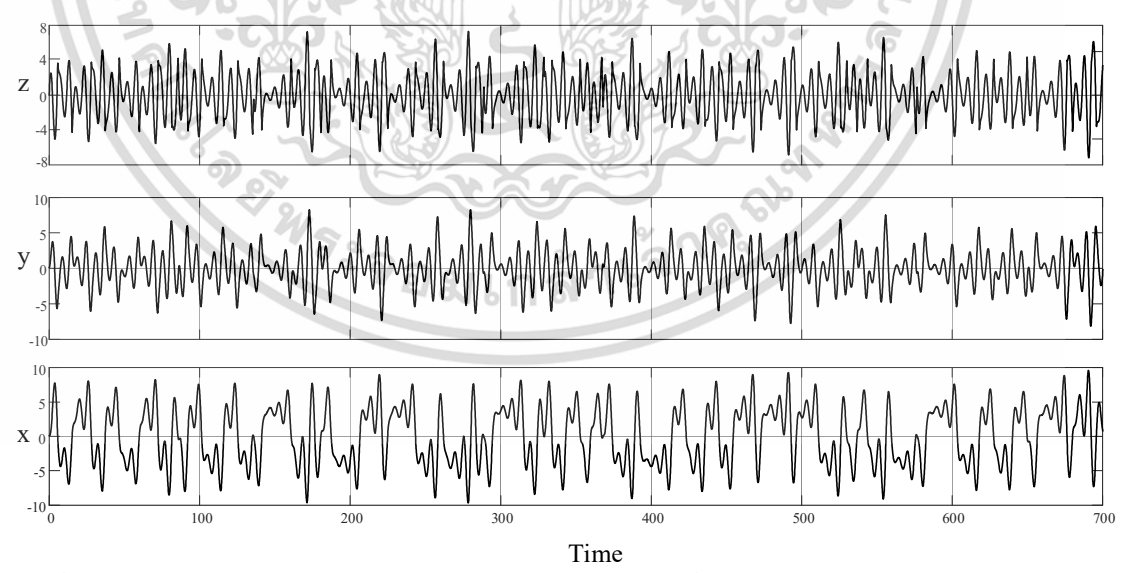
รูปที่ 3.21 ลักษณะตัวดึงดูดคอวน 2 มิติ จากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นค่าสัมบูรณ์ (Absolute) โดยกำหนด $B=1.2, C=2$ และ $k=0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



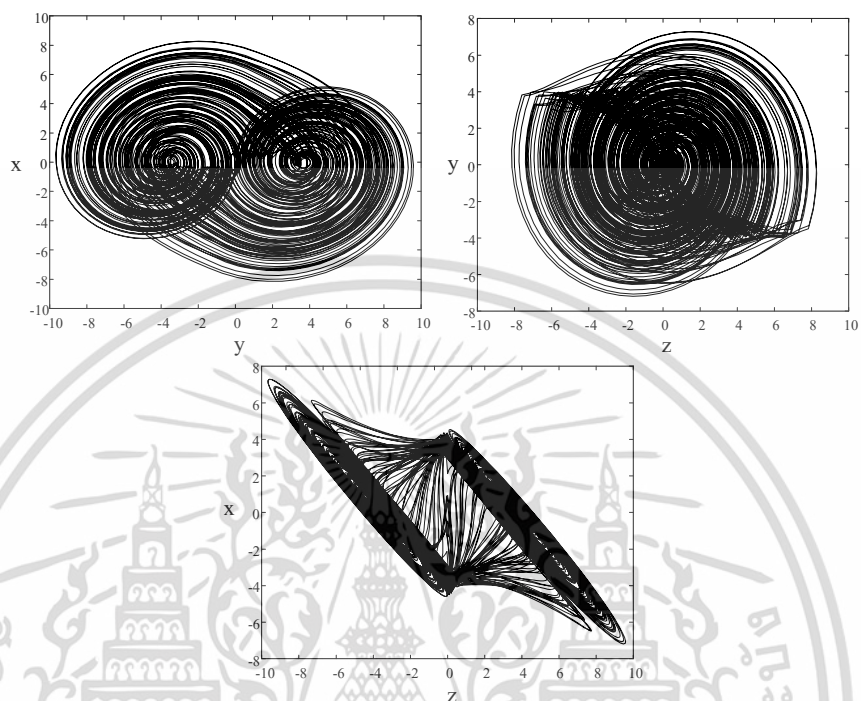
รูปที่ 3.22 ลักษณะตัวดึงดูดอลวน 3 มิติ จากวงจรถ Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นค่าสัมบูรณ์ (Absolute) โดยกำหนด $B=1, C=2$ และ $k=0.6$

ต่อมาเป็นผลของวงจรถหลักที่ใช้ $G(x) = 1.2x - 4.5\text{sgn}(x)$ โดยกำเนิดสัญญาณที่ $k=0.6$ แสดงลักษณะของสัญญาณอลวน ทั้ง 3 เอาต์พุต ดังรูปที่ 3.23 แสดงเป็นลักษณะตัวดึงดูดอลวน 2 มิติ ได้ดังรูป 3.24 และแสดงเป็นลักษณะตัวดึงดูดอลวน 3 มิติ ได้ดังรูปที่ 3.25

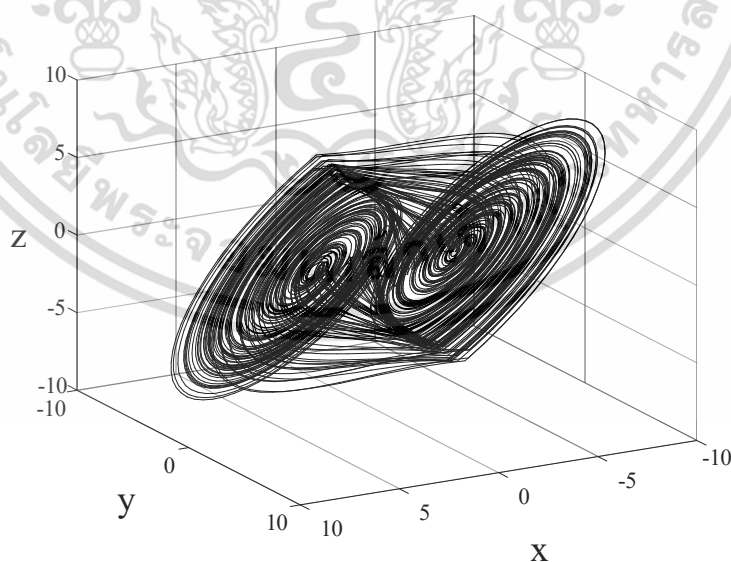


รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะสัญญาณอลวนจากวงจรถ Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum โดยกำหนด $B=1.2, C=4.5$ และ $k=0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ลักษณะตัวดึงดูดคอวน 2 มิติ จากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum โดยกำหนด $B=1.2, C=4.5$ และ $k=0.6$



รูปที่ 3.25 ลักษณะตัวดึงดูดคอวน 3 มิติ จากวงจร Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum โดยกำหนด $B=1.2, C=4.5$ และ $k=0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สรุป

จากแบบจำลองและงานวิจัยต่างๆที่กล่าวมา ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaotic Oscillators) ในรูปแบบแรงดันด้วยอุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์และอุปกรณ์แพสซีฟตัวเก็บประจุกับตัวต้านทานในวงจร มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบการสร้างวงจrkำเนิดสัญญาณอลวนจากงานวิจัยที่น่าเสนอ

Model ของแต่ละงานวิจัย	อุปกรณ์ที่ใช้สร้าง	จำนวนอุปกรณ์ทั้งหมดภายในวงจร			จำนวนตัวแปร State ที่ใช้	จำนวนพารามิเตอร์ควบคุม	ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	รูปแบบตัวดึงดูดอลวน
		OA	R,C	ตัวคูณแอนะล็อก				
Lorenz model [56]	OA	7	10	2	7	3	ใช้การคูณกันของตัวแปร State ไม่สามารถตัดแปลงรูปแบบของสัญญาณอลวนได้	สามารถสร้างลักษณะ Double scroll ได้ชัดเจน แต่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้
Rössler model [57]	OA	6	16	1	7	2	ใช้การคูณกันของตัวแปร State ไม่สามารถตัดแปลงรูปแบบของสัญญาณอลวนได้	ลักษณะ Attractor มีการบิดเพียงเล็กน้อย ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้
Chua model [58]	OA	4	14	-	7	2	ใช้ฟังก์ชันในออกแบบสามารถปรับลักษณะสัญญาณอลวนได้เล็กน้อย	สามารถสร้างลักษณะ Double scroll ได้ชัดเจน สามารถปรับรูปแบบ Attractor ได้เพียงเล็กน้อย
Jerk model [59]	CFOA	3,3	9,7	-	5	1	สามารถแทนฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้หลายรูปแบบ สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณอลวนได้	สามารถสร้างลักษณะ Double scroll ได้ชัดเจน และปรับรูปแบบของ Attractor ได้ สามารถเปลี่ยนรูปแบบ Attractor ได้ตามลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยแบบจำลองการกระตุ้น รูปแบบกระแสโดยใช้โอทีเอ

4.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ที่กล่าวถึงการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ด้วยแบบจำลองต้นแบบที่เคยมีมาในอดีต รวมถึงการสร้างวงจรในรูปแบบแรงดัน ซึ่งส่วนใหญ่มักใช้อุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์ (Operational Amplifier: OA) และมีอุปกรณ์ตัวเก็บตัวประจุกับความต้านทานในการสร้าง ในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้นำแบบจำลองที่มีโครงสร้างซับซ้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่เคยมีมา คือแบบจำลองการกระตุ้นของ Sportt มีการออกแบบฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear function) ได้อย่างอิสระ โดยสามารถให้ลักษณะสัญญาณอลวน ที่มีรูปแบบการแกว่งของคาบที่ชัดเจน และเป็นตัวดึงดูดอลวน 2 วงโคจร มีการปรับเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณแค่ 1 ตำแหน่ง ซึ่งอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้มีเพียงอุปกรณ์แอกทีฟโอทีเอ (OTA: Operational Transconductance Amplifier) รูปแบบกระแสและตัวเก็บประจุ ไม่มีการใช้ความต้านทาน และไม่ต้องการการคูณสัญญาณทำให้ลดจำนวนอุปกรณ์ในวงจรและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ในการสร้างวงจรมีองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง และฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวงจรสามารถปรับค่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณได้จากตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง โดยในงานวิจัยมีการแสดงพฤติกรรมของสัญญาณอลวน จากการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice และมีการแสดงผลทางทฤษฎี Bifurcation ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อยืนยันความถูกต้องพฤติกรรมของสัญญาณอลวน รวมถึงแสดงผลการทดลองได้จากการต่อวงจรจริงด้วยโอทีเอเบอร์ LT1228 ณ ห้องตลาด

4.2 แบบจำลองที่ใช้สร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนของงานวิจัย

Sportt ได้นำเสนอรูปแบบจำลองการกระตุ้น ถูกนำเสนอครั้งแรกในปีค.ศ.2000 เป็นการทำงานของระบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถแสดงการเกิดสัญญาณอลวนได้ ประกอบด้วยมีฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น และสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์จากค่า k เพียงค่าเดียว ลดความซับซ้อนในการนำไปใช้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์

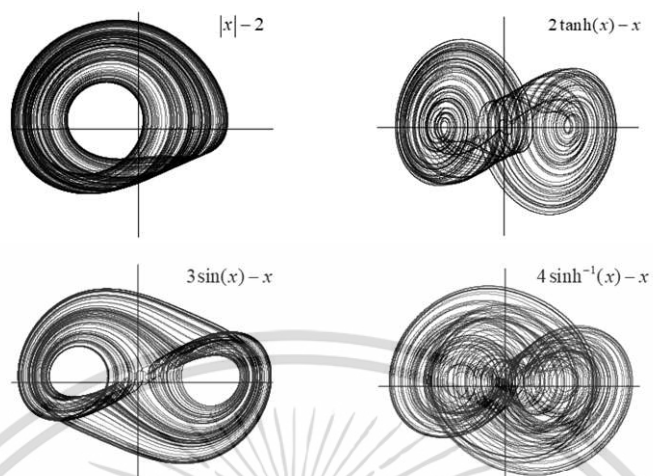
งานวิจัยนี้มีการสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีต้นแบบจากแบบจำลองการกระตุ้นของ Sportt เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสาม ดังสมการที่ (4.1) มีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์เพียงหนึ่งค่า และ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น $G(x)$ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นนี้ ก็จะสามารถปรับเปลี่ยนรูปการเกิดสัญญาณอลวนได้โดยง่าย

$$\frac{d^3x}{dt^3} = -k \frac{d^2x}{dt^2} - \frac{dx}{dt} + G(x) \quad (4.1)$$

รูปแบบของการกระตุ้นมาจากกลไกที่มี x เป็นค่าการกระตุ้น และ อนุพันธ์อันดับต่างๆ เทียบกับเวลาของ x คือ ความเร็ว $\left(\frac{dx}{dt}\right)$, ความเร่ง $\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)$ และ การกระตุ้น $\left(\frac{d^3x}{dt^3}\right)$ และ ตัวอย่างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น $G(x)$ ที่ใช้ในรูปแบบ Jerk แสดงพร้อมตัวอย่างรูปลักษณะของตัวดึงดูดอลวนของทั้ง 4 ฟังก์ชัน ดังสมการที่ (4.2) และ รูปที่ 4.1 ตามลำดับ

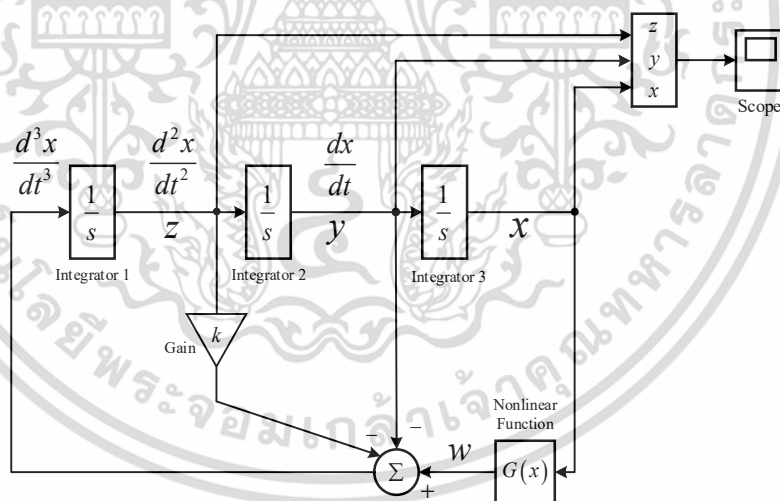
$$G(x) = \begin{cases} |x| - 2 & ; k = 0.6 \\ 2 \tanh(x) - x & ; k = 0.19 \\ 4 \sinh^{-1}(x) - x & ; k = 0.24 \\ 3 \sin(x) - x & ; k = 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างลักษณะตัวดึงดูดของแต่ละฟังก์ชัน

โครงสร้างการกระตุ้นของ Sportt สามารถแสดงเป็น State block diagram สำหรับออกแบบ ได้ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลอง Jerk ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= z, \\ \frac{dz}{dt} &= -kz - y + G(x),\end{aligned}\tag{4.3}$$

ในการสร้างวงจรจาก State block diagram รูปที่ 4.2 แบ่งการสร้างออกเป็นองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง และฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟโอทีเอ (Operational transconductance amplifier : OTA) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานและใช้ตัวเก็บประจุในการสร้างวงจร

โดยในการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองสร้างจากการแยกส่วนประกอบ state block diagram จากรูปที่ 4.2 โดยพิจารณาเฉพาะ state w - y สามารถเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 4.3 โดยจัดรูปสมการตัวแปรแล้วพบว่า มีฟังก์ชันถ่ายโอนอยู่ในรูป Biquadratic รูปแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง (Second order Lowpass filter :LPF) เขียนได้ดังสมการที่ (4.4)

$$\frac{y}{w} = \frac{ab}{s^2 + ska + ab}\tag{4.4}$$

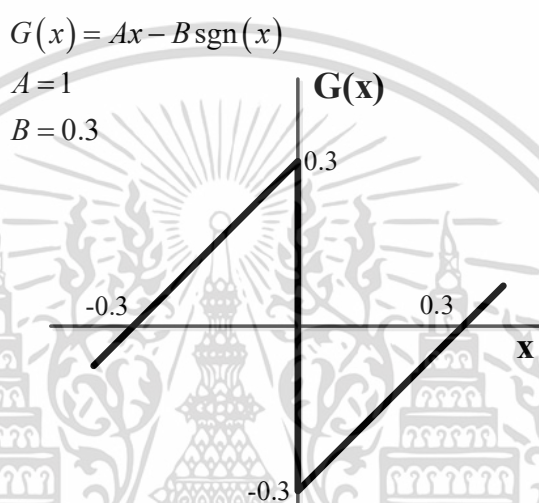
รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมแยกส่วนของแบบจำลอง Jerk

โดยที่ $\omega_0^2 = ab$ และ $Q_0 = (1/k)\sqrt{b/a}$ ซึ่งการออกแบบสามารถปรับความถี่ (ω_0) และตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor : Q_0) แยกกันได้อย่างอิสระ โดยความถี่สามารถปรับได้ด้วยค่าคงที่ a, b และ ปรับ Q_0 ด้วยค่าคงที่ k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ที่สามารถนำมาใช้กับรูปแบบ Jerk มีหลายแบบด้วยกันดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2 โดยฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในบทความนี้จะใช้ฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบตัดแปลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ประกอบจากฟังก์ชันสัญลักษณ์ และ ฟังก์ชันเชิงเส้น โดยในรูปที่ 4.4 เป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นอิสระปรับเงื่อนไขได้ ด้วยตัวแปร A และ B [60] สำหรับกำเนิดสัญญาณอลวน โครงสร้าง Jerk



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบตัดแปลง

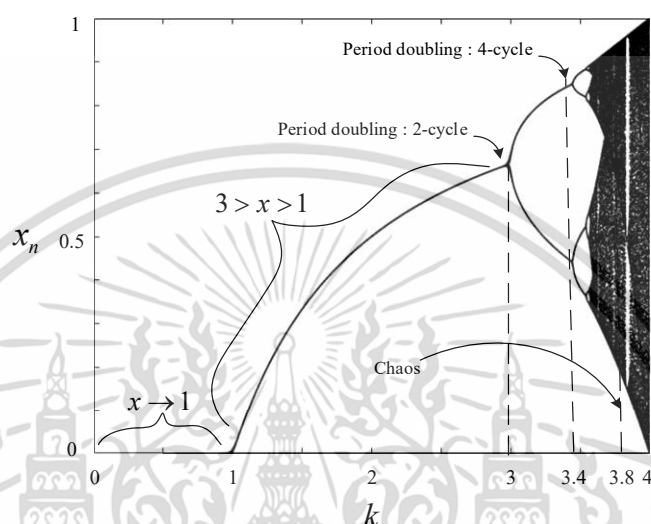
4.4 Bifurcation diagram

การเกิดสัญญาณอลวน ในระบบพลวัต มีผลทางทฤษฎีอธิบายการเกิดสัญญาณอลวน หลายวิธี เช่น Poincare map, LE (Lyapunov Exponent), Bifurcation Diagram เป็นต้น ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอทฤษฎี การแยกไปสองทาง เพื่อพิสูจน์การเกิดสัญญาณอลวน โดยใช้ทฤษฎีจากสมการ Logistic map ดังนี้

$$x_{n+1} = kx_n(1 - x_n) \quad (4.5)$$

โดยสมการที่ (4.5) คือ สมการ Logistic ที่มีความไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time) ซึ่งสมการสามารถบ่งบอกการเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นระเบียบของจำนวนตัวแปร state x_n โดยมีพารามิเตอร์ k

เป็นเงื่อนไขในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร ที่ x_0 คือ ค่าเริ่มต้น โดยมีเงื่อนไข $0 \leq k \leq 4$ และ $0 \leq x \leq 1$ รูปที่ 4.5 คือ แผนภาพการแยกไปสองทาง ที่สร้างจากสมการ Logistic 1 มิติ จากสมการที่ (4.5)



รูปที่ 4.5 แสดงการแยกไปสองทางของ Logistic Map

ซึ่งในบทความนี้ มีการใช้ แผนภาพการแยกไปสองทาง มาอธิบายช่วงในการเกิดสัญญาณอลวน เมื่อมีการปรับค่าคงที่ k จากรูปแบบจำลอง Jerk เมื่อนำสมการ Jerk มาเขียนอยู่ในรูปแบบตัวแปร state 3 มิติ สำหรับใช้จำลองผลในโปรแกรม MATLAB จะสามารถเขียนได้เป็น

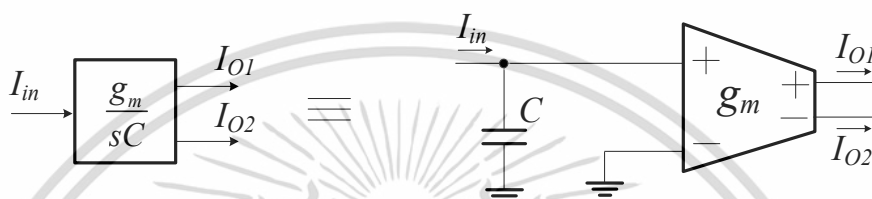
$$\begin{aligned} x_{n-1} &= y_n, \\ y_{n-1} &= z_n, \\ z_{n-1} &= -kz_n - y_n + Ax_n - B \operatorname{sgn} x_n, \end{aligned} \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.6) สามารถเขียนได้จากสมการอนุพันธ์อันดับสาม Jerk โดยที่ k คือ พารามิเตอร์ควบคุมของระบบ และใช้ฟังก์ชันสัญญาณแบบตัดแปลง พร้อมค่าคงที่เงื่อนไขของฟังก์ชัน $A=1$ และ $B=0.3$ มีการกำหนดค่าเริ่มต้นของแต่ละตัวแปร state $(x_0, y_0, z_0) = (0.6, 0.3, 0)$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน

ในส่วนการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนโดยใช้หลักการดังรูปที่ 4.2 นั้น วงจรที่ต้องใช้เป็นหลักคือ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย ซึ่งสามารถสร้างได้จากโอทีเอดังแสดงในรูปที่ 4.6 [61] มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (4.7) และ (4.8)

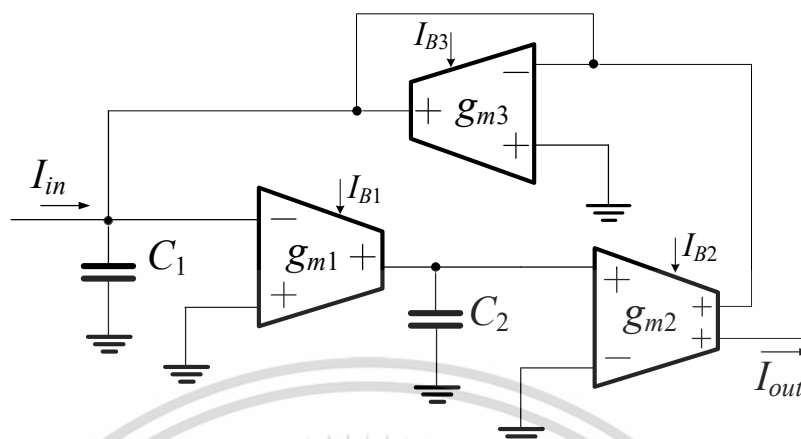


รูปที่ 4.6 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย

$$\frac{I_{o1}}{I_{in}} = \frac{g_m}{sC} \quad (4.7)$$

$$\frac{I_{o2}}{I_{in}} = -\frac{g_m}{sC} \quad (4.8)$$

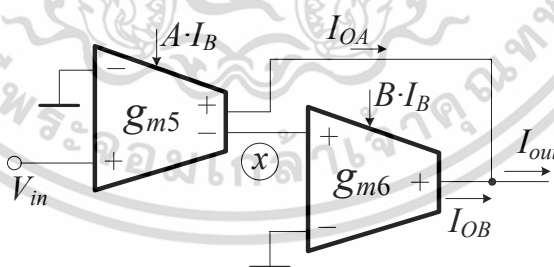
จากบล็อกไดอะแกรมแยกส่วนของแบบจำลองการกระตุ้น รูปที่ 4.3 นั้น มีคุณสมบัติเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ที่สามารถปรับค่าตัวประกอบคุณภาพได้อย่างเป็นอิสระกับความถี่ตอบสนอง สามารถออกแบบได้โดยใช้โอทีเอและตัวเก็บประจุ ดังแสดงดังรูปที่ 4.7 มีฟังก์ชันถ่ายโอนกระแสดังสมการที่ (4.9)



รูปที่ 4.7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + \left(\frac{g_{m3}}{C_1}\right)s + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (4.9)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (4.9) เปรียบเทียบกับสมการที่ (4.4) กำหนดให้ $g_{m1}=g_{m2}=g_m$ และ $C_1=C_2=C$, จะได้สมการของความถี่ (Frequency : ω_0) และตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor : Q_0) $\omega_0 = g_m/C$ และ $Q_0 = g_m/g_{m3}$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 วงจรฟังก์ชันสัญญาณแบบดัดแปลง (Modified Signum) สร้างจากโอทีเอ

จากบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง Jerk รูปที่ 4.2 จำเป็นต้องมีวงจรกำเนิดฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น $G(x)$ ซึ่งสามารถสร้างได้จากโอทีเอ ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดย OTA_5 ทำหน้าที่เป็นวงจรแปลงกระแส V/I (Converter) และ OTA_6 ทำหน้าที่เปรียบเทียบกระแส (Current Comparater) เพื่อให้วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

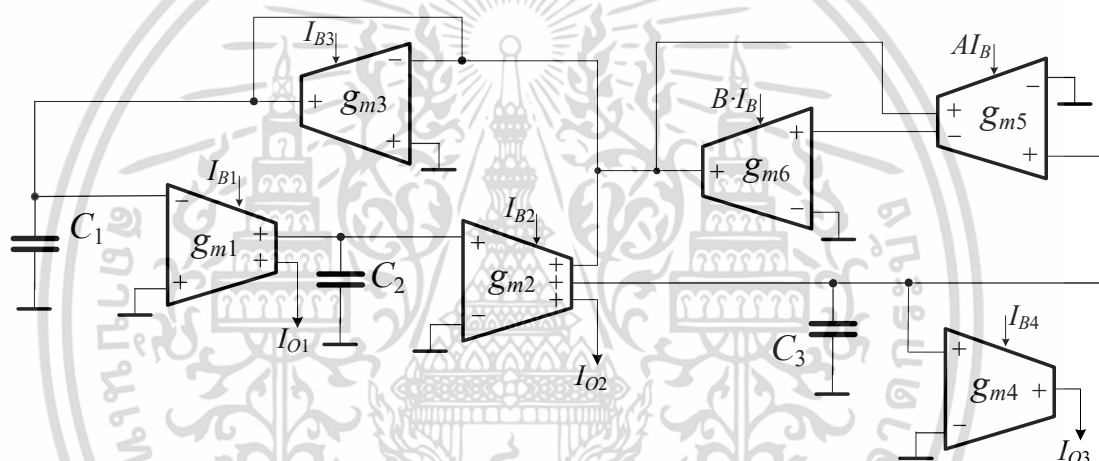
ทำงานเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น $G(x) = x_n - 0.3 \operatorname{sgn} x_n$ ตามรูปที่ 4.4 สามารถทำได้โดยปรับกระแสไบอัสของ OTA_5 และ OTA_6 ตามลำดับ ผลรวมเอาต์พุตกระแส สามารถสรุปสมการได้เป็น

$$I_{OA} = g_{m5} V_{in} \quad (4.10)$$

$$V_x = -V_{sat} \operatorname{sgn}(g_{m5} V_{in}) \quad (4.11)$$

$$I_{OB} = -(g_{m6} V_{sat}) \operatorname{sgn}(V_x) \quad (4.12)$$

$$I_{out} = I_{OA} + I_{OB} = g_{m5} V_{in} - (g_{m6} V_{sat}) \operatorname{sgn}(g_{m5} V_{in}) \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.9 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบกระแสโดยใช้ OTA

เมื่อนำวงจรย่อยรูปที่ 4.6-4.8 มาต่อร่วมกันตามบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองการกระตุ้นรูปที่ 4.2 จะได้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนดังรูปที่ 4.9 ซึ่งสามารถปรับค่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณและ ค่าคงที่ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอิสระต่อกัน โดยสัญญาณอลวนเอาต์พุตที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถนำออกจากเอาต์พุตของ I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3}

4.6 ผลการทดลอง

ในการยืนยันการทำงานของวงจรที่นำเสนอจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ผลการจำลองการทำงานด้วย PSpice และ MATLAB

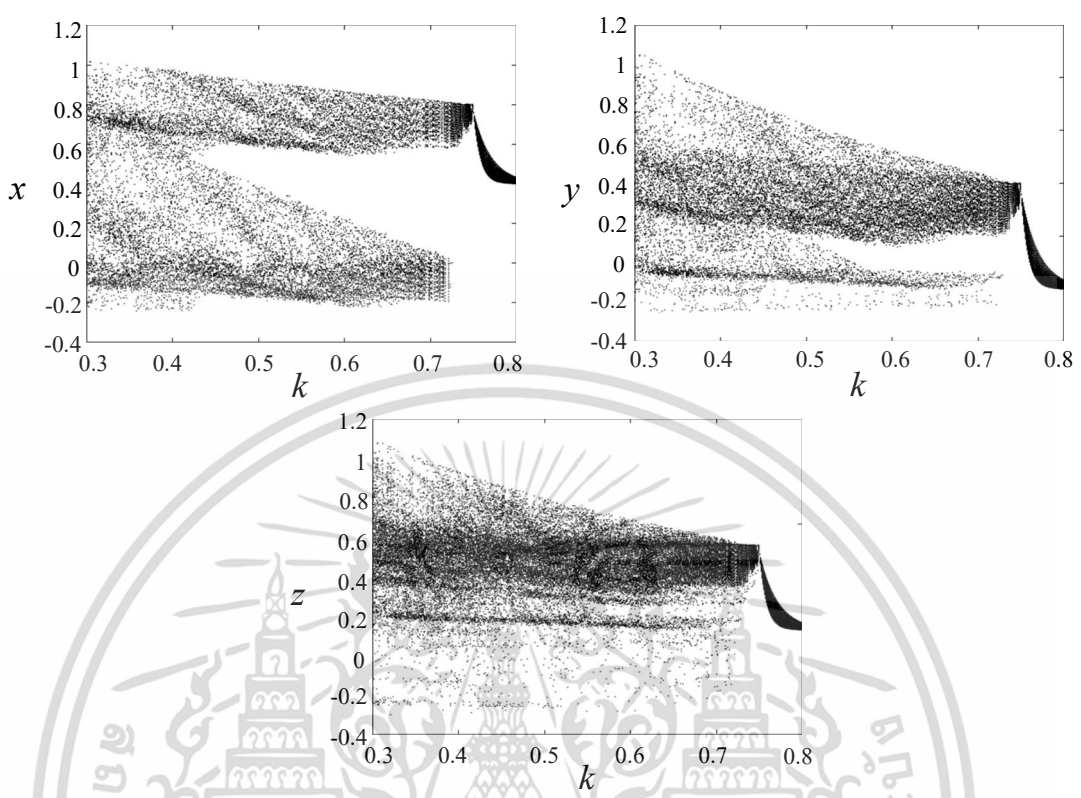
4.6.1 ผลจำลองการทำงาน MATLAB

ในส่วนผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

- ส่วนแรกเป็นการแสดงผลเพื่อพิสูจน์การเกิดสัญญาณออสซิลเลชัน ด้วยผลทางทฤษฎี Bifurcation แสดงเป็นแผนภาพเพื่อเปรียบเทียบการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณเข้าสู่ช่วงความเป็นออสซิลเลชัน (Route to Chaos) โดยการนำสมการที่ (4.6) มาพล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB
- ส่วนที่สองเป็นการแสดงผลการเกิดสัญญาณออสซิลเลชัน ด้วยโปรแกรม MATLAB และแสดงการปรับค่าคงที่ของ A และ B จากฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบตัดแปลง พร้อมปรับค่า k จากสมการที่ (4.6) แสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณและลักษณะของตัวตั้งดูออสซิลเลชัน

4.6.1.1 ผลจำลองการทำงาน Bifurcation

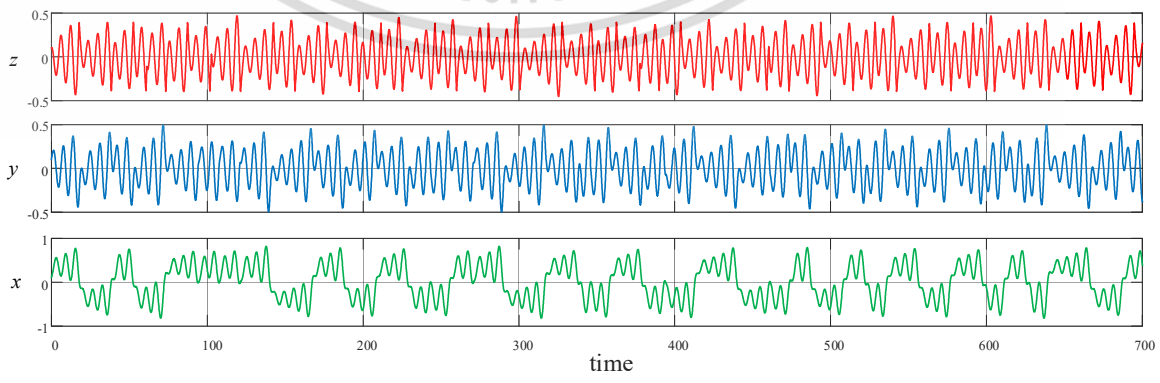
ในส่วนผลการทดลองเพื่อพิสูจน์การเกิดสัญญาณออสซิลเลชัน ใช้สมการที่ (4.6) เป็นสมการ state ในรูปแบบ 3 มิติ นำมาเขียนกราฟช่วงทวีค่า (Doubling period) ได้ใน Bifurcation Diagram โดยกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปร state ทั้งสาม $(x_0, y_0, z_0) = (0.6, 0.3, 0)$ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.10 เป็นการพล็อตตำแหน่ง x , y , และ z เทียบกับแกนพารามิเตอร์ k โดยกำหนดค่าคงที่ $A=1$ และ $B=0.3$ จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่า ช่วง 0.8 ถึง 0.75 เป็นช่วงเริ่มต้นของเวลาที่เอาต์พุตจะเกิดการทวีค่า (Period doubling: period-2 cycle) และ เมื่อเกิดค่าที่ไม่ซ้ำกันในหนึ่งช่วงเวลา จากช่วง k มีค่าระหว่าง 0.7 ถึง 0.3 ซึ่งในช่วงนี้นั่นเอง ระบบจะแสดงพฤติกรรมความอลวนได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.10 แผนภาพการแยกไปสองทาง

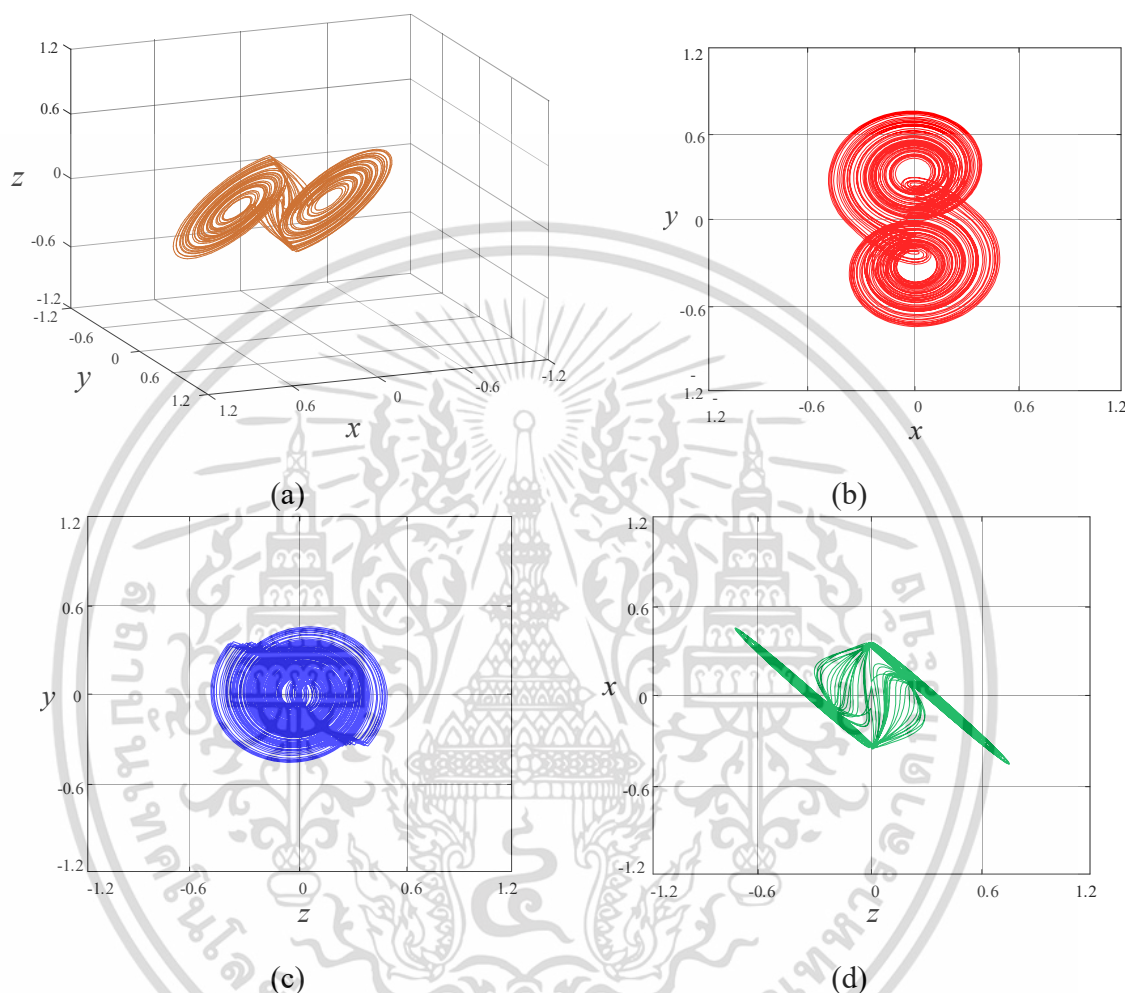
4.6.1.2 ผลจำลองการทำงานการเกิดสัญญาณอลวน พร้อมแสดงการปรับค่าคงที่ A และ B จากฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบตัดแปลง

ในส่วนนี้แสดงผลการปรับค่าพารามิเตอร์ A, B และ k จากแบบจำลองของงานวิจัยนี้ เพื่อแสดงให้เห็นการเกิดสัญญาณอลวน จากการควบคุมด้วยค่าพารามิเตอร์ทั้งสาม โดยรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 แสดงการเกิดลักษณะสัญญาณอลวน ของแต่ละตัวแปร state x, y, z และลักษณะตัวตั้งดูอลวน ทั้ง 3 มิติ ($x-y-z$) และ 2 มิติ ($x-y, z-y, z-x$) ตามลำดับ โดยกำหนดค่า $A=0.9, B=0.3$ และ $k=0.6$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

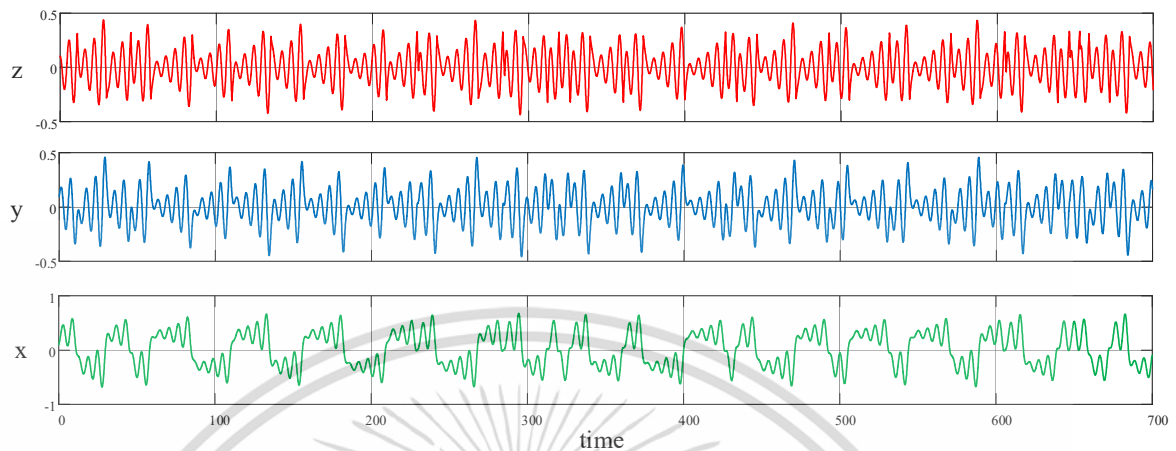
รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณทั้ง 3 เวกเตอร์ของ state x, y, z จากวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน กำหนดค่าคงที่ $A=0.9, B=0.3$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB



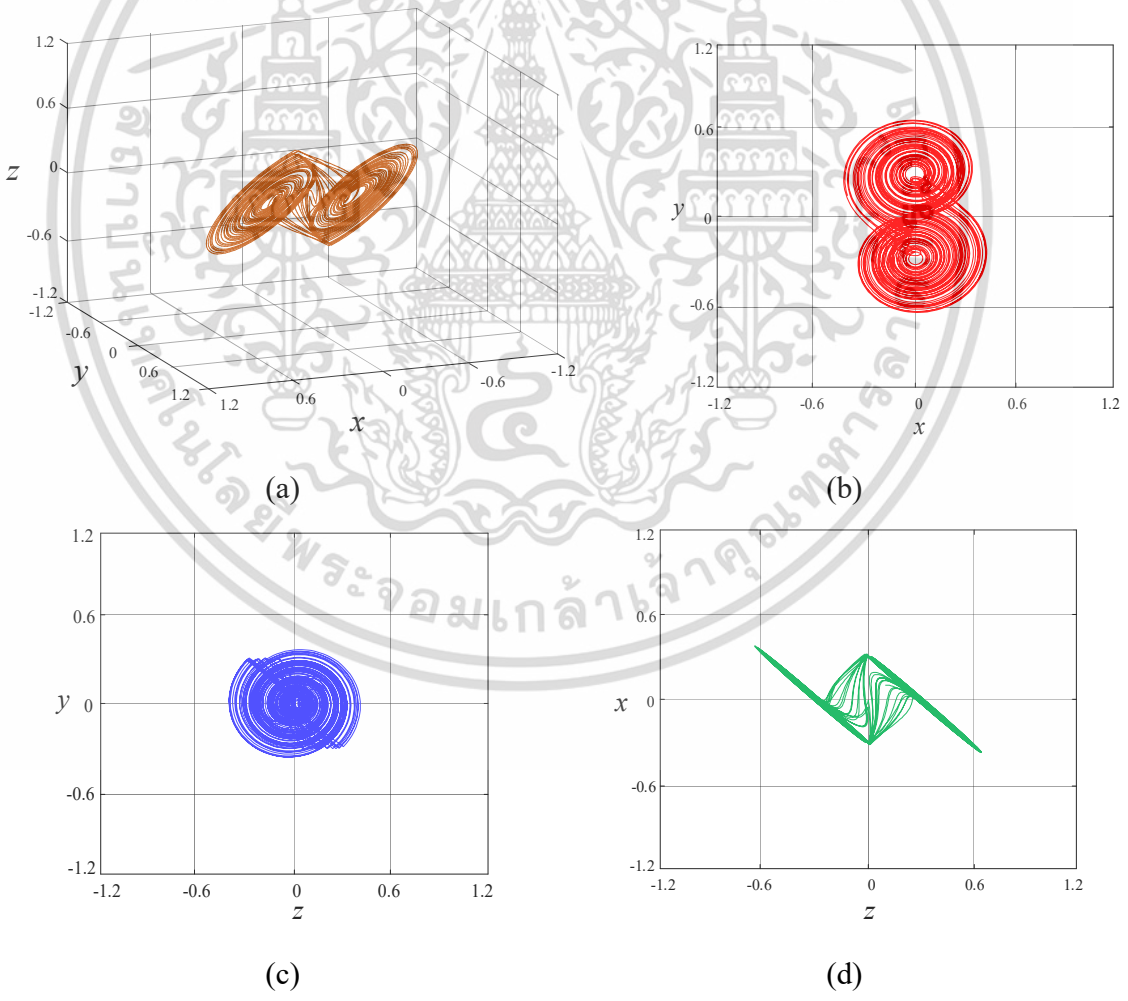
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะตัวตั้งคูดอสวน ของวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน กำหนดค่าคงที่ $A=0.9, B=0.3$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D x-y-z (b) x-y (c) z-y and (d) z-x

ต่อมาเป็นผลการเกิดสัญญาณ โดยกำหนดค่า $A=1$ และคงที่ค่า B กับ k ไว้ ดังรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 แสดงการเกิดลักษณะสัญญาณออสซิลเลชัน ของแต่ละตัวแปร state x, y, z และลักษณะตัวตั้งคูดอสวน ทั้ง 3 มิติ (x-y-z) และ 2 มิติ (x-y, z-y, z-x) ตามลำดับ จะสังเกตว่า เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.11 และ 4.12 ขนาดของสัญญาณและตัวตั้งคูดอสวนที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีการปรับค่า A ลดลง แต่ยังคงเกิดลักษณะของสัญญาณออสซิลเลชันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



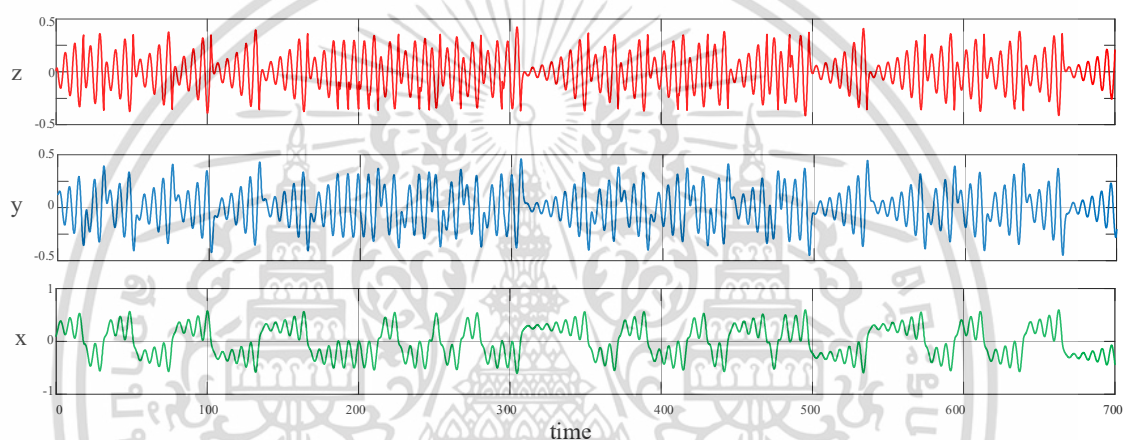
รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณทั้ง 3 เวกเตอร์ของ state x, y, z จากวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน กำหนดค่าคงที่ $A=1, B=0.3$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB



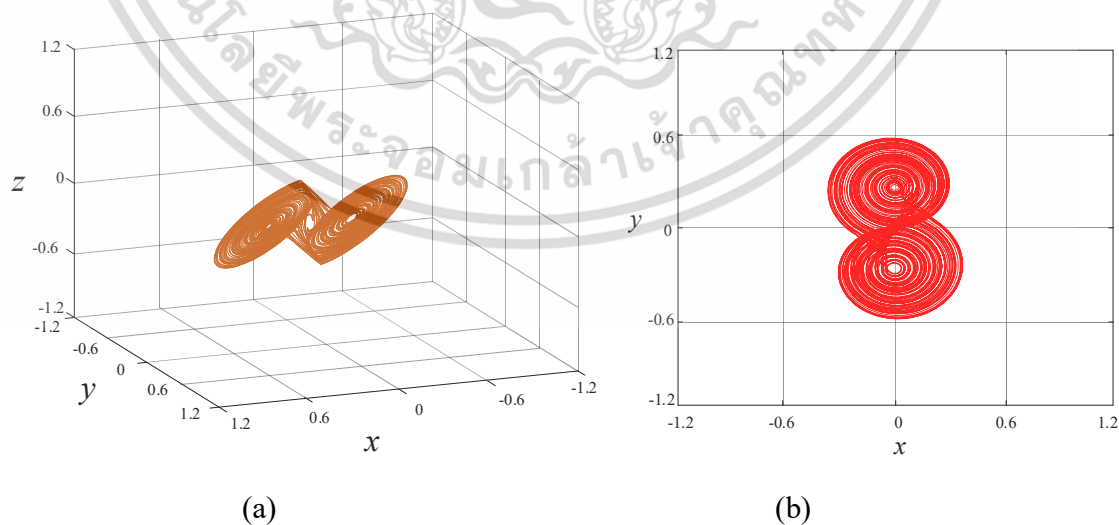
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะตัวดึงดูดของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1$, $B=0.3$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D x-y-z (b) x-y (c) z-y and (d) z-x

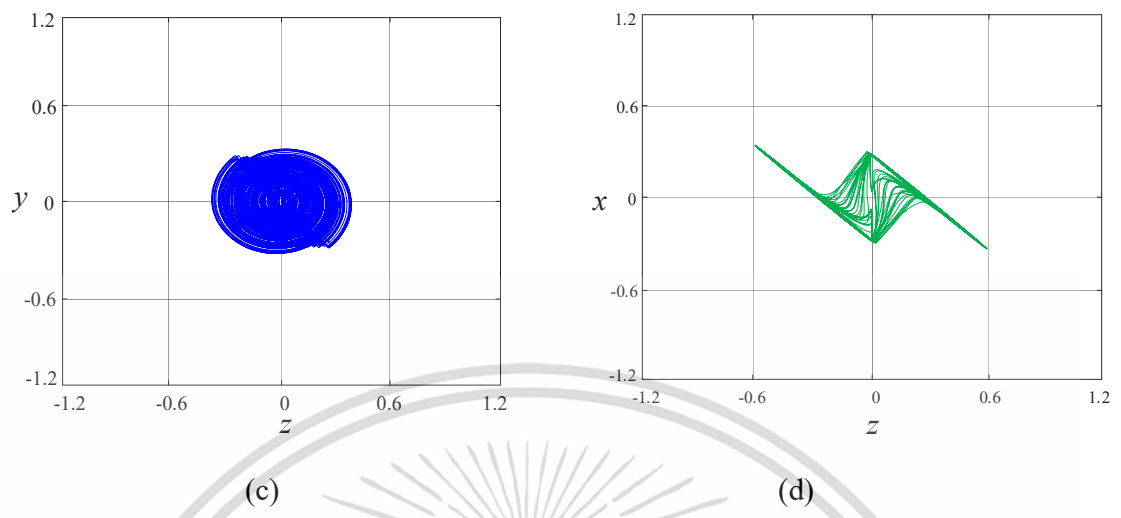
ต่อมาเป็นผลการเกิดสัญญาณ โดยกำหนดค่า $A=1.1$ และคงที่ค่า B ดังรูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.16 มีการปรับค่า $k=0.7$ เพื่อช่วยให้สามารถแสดงการเกิดลักษณะสัญญาณอลวนของแต่ละตัวแปร state x, y, z และลักษณะตัวดึงดูดทั้ง 3 มิติ (x-y-z) และ 2 มิติ (x-y, z-y, z-x) ตามลำดับ จะสังเกตว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.11 และ 4.12 ขนาดของสัญญาณและตัวดึงดูดที่ได้มีขนาด (Amplitude) ลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการปรับค่า A เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณทั้ง 3 แอต์พุตของ state x, y, z จากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1.1$, $B=0.3$ และ $k=0.7$ โดยใช้ MATLAB

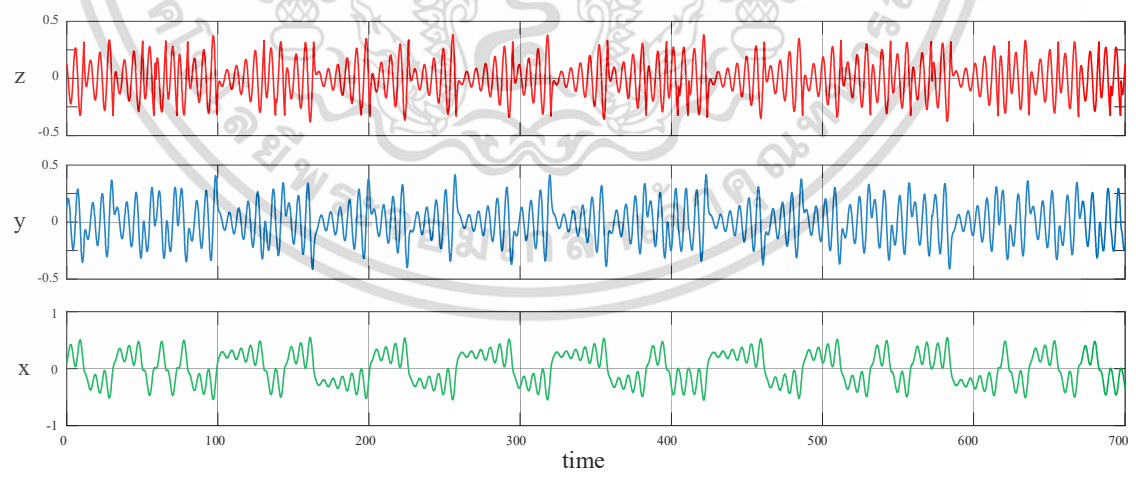


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



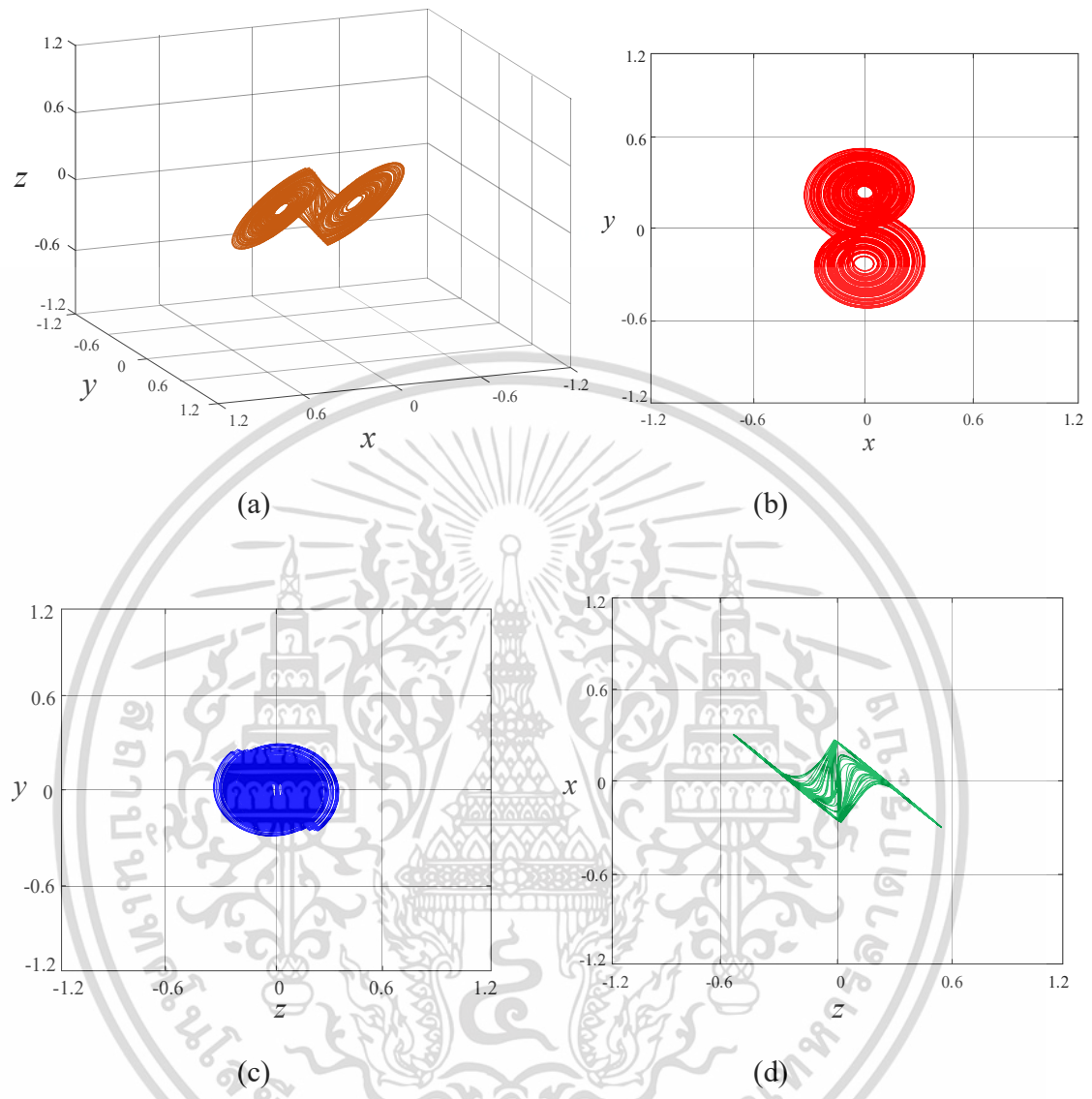
รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะตัวดึงดูดของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1.1$, $B=0.3$ และ $k=0.7$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D x-y-z (b) x-y (c) z-y and (d) z-x

ต่อมาเป็นผลการเกิดสัญญาณ โดยกำหนดค่า $A=1.2$ และคงที่ค่า B ดังรูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18 มีการปรับค่า $k=0.8$ เพื่อช่วยให้สามารถแสดงการเกิดลักษณะสัญญาณอลวน ของแต่ละตัวแปร state x, y, z และลักษณะตัวดึงดูดอลวน ทั้ง 3 มิติ (x-y-z) และ 2 มิติ (x-y, z-y, z-x) ตามลำดับ จะสังเกตว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.11 และ 4.12 ขนาดของสัญญาณและตัวดึงดูดอลวนที่ได้มีขนาดลดลงเล็กน้อย เมื่อมีการปรับค่า A เพิ่มขึ้น และขนาดเล็กกว่าค่า $A=1.1$



รูปที่ 4.17 แสดงสัญญาณทั้ง 3 เอตัพุดของ state x, y, z จากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1.2$, $B=0.3$ และ $k=0.8$ โดยใช้ MATLAB

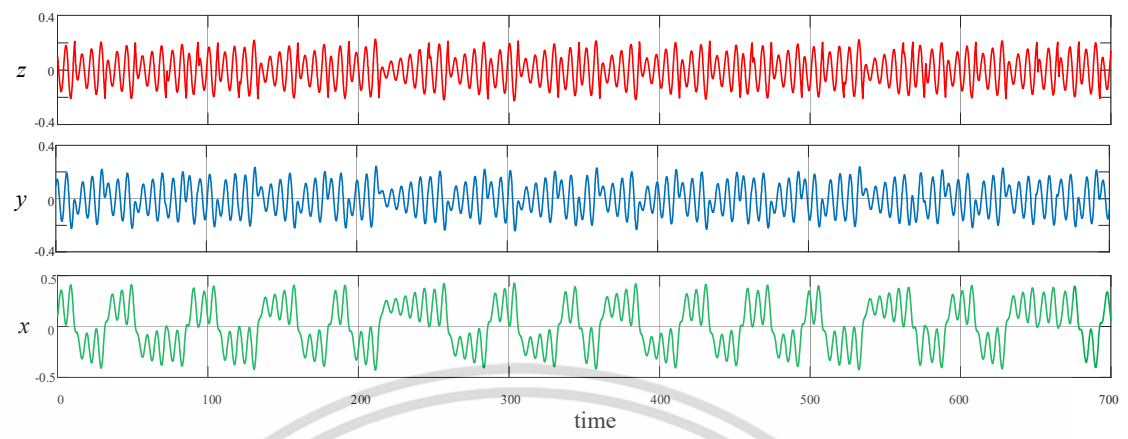
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



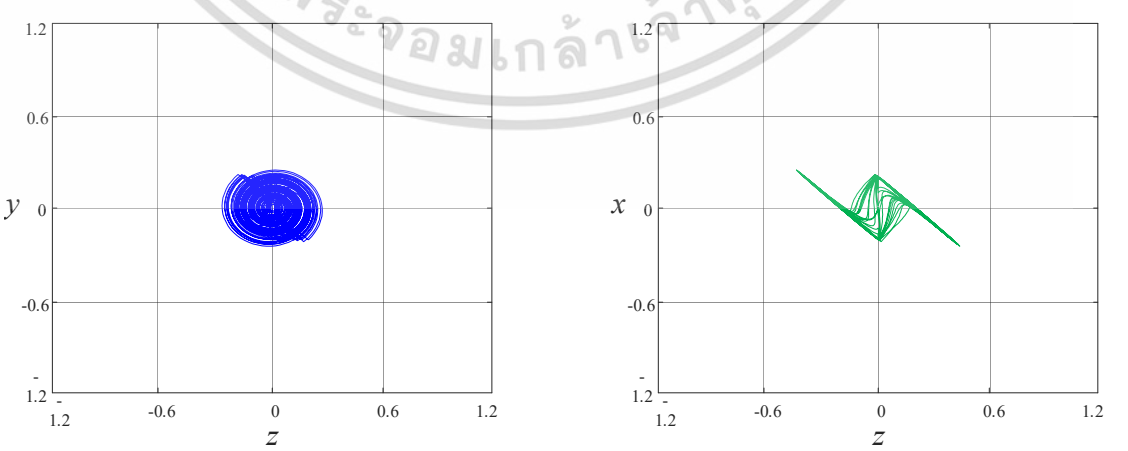
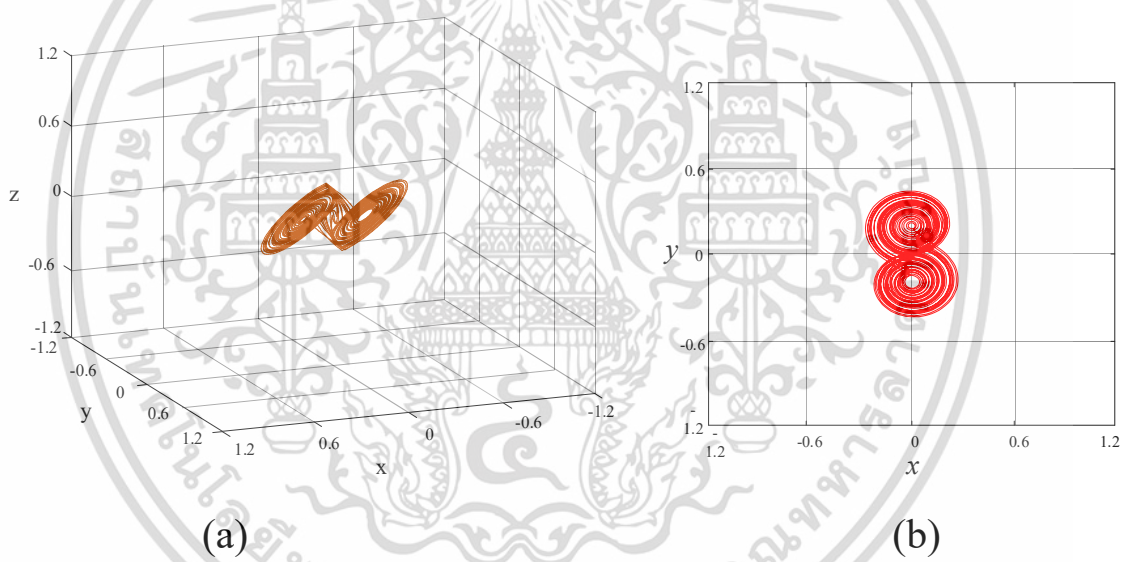
รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะตัวดึงดูดของวงจรถูกจำกัดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1.2$, $B=0.3$ และ $k=0.8$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D x-y-z (b) x-y (c) z-y and (d) z-x

ถัดมาเป็นผลการเกิดสัญญาณ โดยกำหนดค่า $B=0.2$ และคงที่ค่า A กับ k ไว้ ดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 แสดงการเกิดลักษณะสัญญาณอลวนของแต่ละตัวแปร state x, y, z และลักษณะตัวดึงดูดอลวน ทั้ง 3 มิติ (x-y-z) และ 2 มิติ (x-y, z-y, z-x) ตามลำดับ จะสังเกตว่า เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.11 และ 4.12 ขนาดของสัญญาณและตัวดึงดูดอลวนที่ได้มีขนาดเล็กลง เมื่อมีการปรับค่า B ลดลง แต่ยังคงความเป็นลักษณะสัญญาณอลวนได้ จึงแสดงให้เห็นว่า การเกิดสัญญาณอลวน สามารถควบคุมได้ด้วยค่าพารามิเตอร์ A, B และ k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงสัญญาณทั้ง 3 เวกเตอร์ของ state x, y, z จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1, B=0.2$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

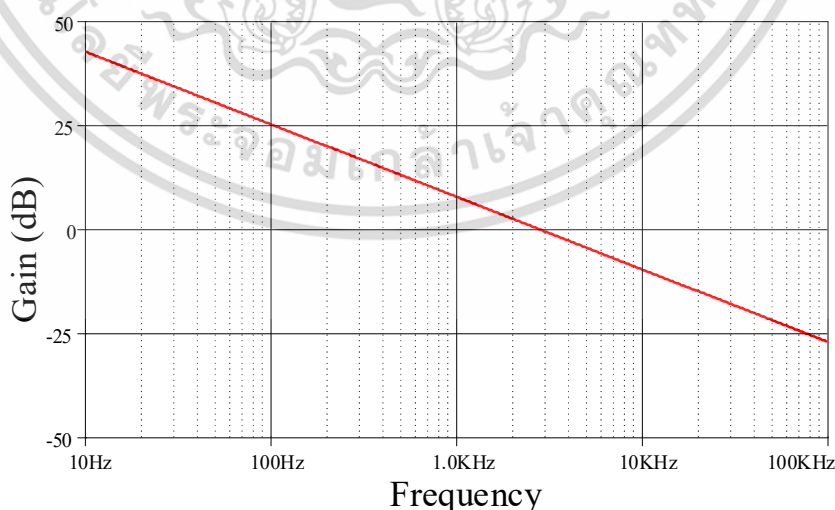
(c)

(d)

รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะตัวดึงดูคอวนของวงจรกำเนิดสัญญาณออลวน กำหนดค่าคงที่ $A=1$, $B=0.2$ และ $k=0.6$ โดยใช้ MATLAB (a) 3D x-y-z (b) x-y (c) z-y and (d) z-x

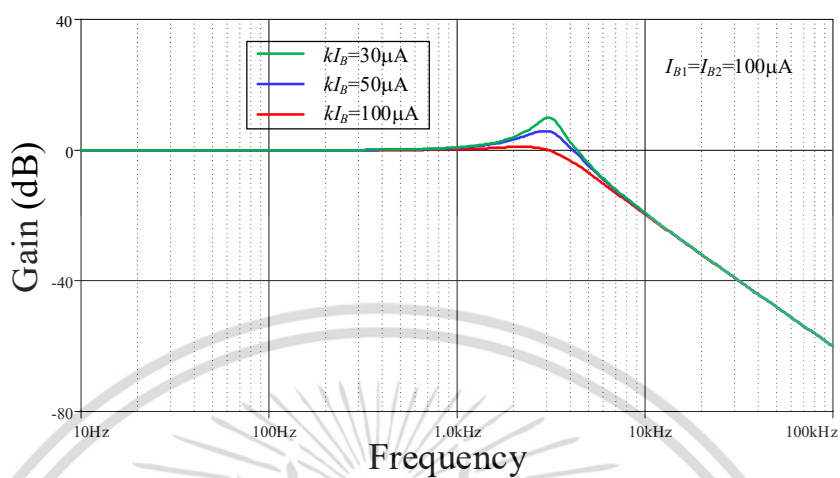
4.6.2 ผลจำลองการทำงาน PSpice

ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice มีผลการทดลอง 4 ส่วน วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง วงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น และ วงจรรวมในการเกิดสัญญาณออลวน โดยใช้แบบจำลอง MO-OTA กำหนดแรงดันไฟเลี้ยง $\pm 1V$ ใช้กระแสไบอัส $I_B=100\mu A$ ทุกตัว ยกเว้น OTA_6 กำหนดให้กระแสไบอัส $BI_B=30\mu A$ ตัวเก็บประจุทุกตัวเท่ากับ $50nF$ รูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงผลการตอบสนองทางขนาดของ วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย และ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ตามลำดับ ซึ่งพบว่าผลการตอบสนองทางความถี่จะมีค่าประมาณ $4kHz$ เท่ากันเนื่องจากใช้ ค่า C และ กระแสไบอัสเท่ากัน และ เมื่อสามารถปรับค่า $I_{B3}=kI_B$ ต่ำลงจะพบว่าค่า Q (Quality factor) ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีค่าสูงขึ้นแต่ไม่กระทบต่อความถี่ตอบสนอง สอดคล้องกับทฤษฎีทุกประการ รูปที่ 4.23 แสดงผล Magnitude ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง เมื่อมีผลกระทบจากอุณหภูมิ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลต่อค่า Q ในวงจร แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ $0^\circ C$, $27^\circ C$ และ $50^\circ C$ ตามลำดับ คงที่ค่า Q ที่ $kI_B=60\mu A$ ส่วนรูปที่ 4.24 เป็นวงจรฟังก์ชันสัญญาณแบบตัดแปลง โดยกำหนดกระแส $AI_B=100\mu A$ ให้กับ OTA_5 และ $BI_B=30\mu A$ ที่ OTA_6 แสดงผลของแต่ละเอาต์พุตจากวงจรรูปที่ 4.8 พบว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎีเป็นอย่างดี

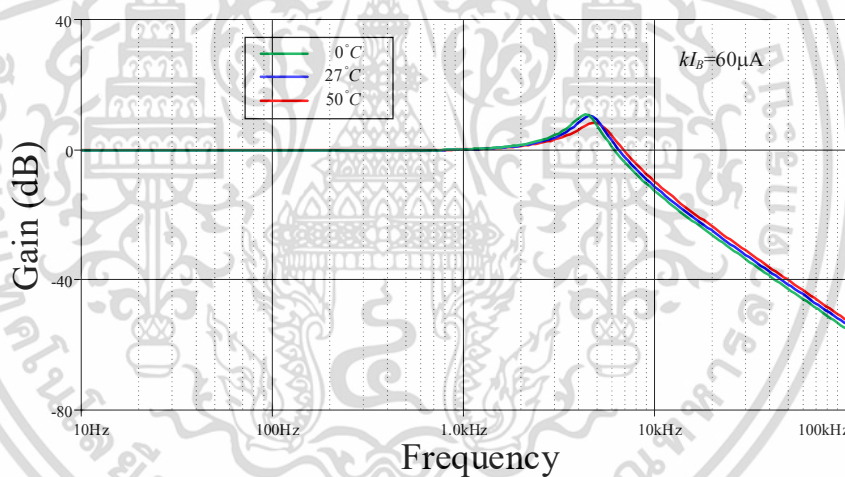


รูปที่ 4.21 ผลการตอบสนองของวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

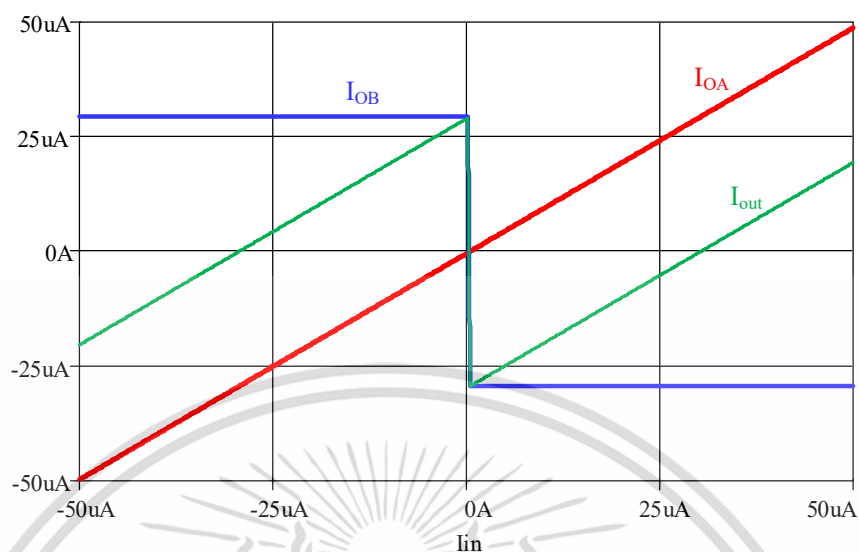


รูปที่ 4.22 ผลการตอบสนองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง



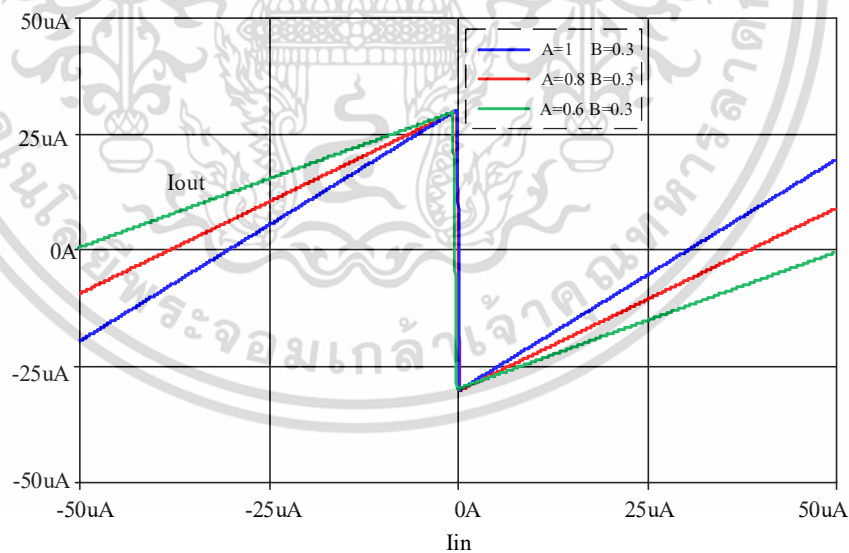
รูปที่ 4.23 ผลการตอบสนองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ที่ $I_{B1} = I_{B2} = 100\mu\text{A}$ และ $kI_B = 60\mu\text{A}$ ($k=0.6$) โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 0°C , 27°C และ 50°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Signum โดยกำหนด $I_B=100\mu\text{A}$, $AI_B=100\mu\text{A}$ และ $BI_B=30\mu\text{A}$

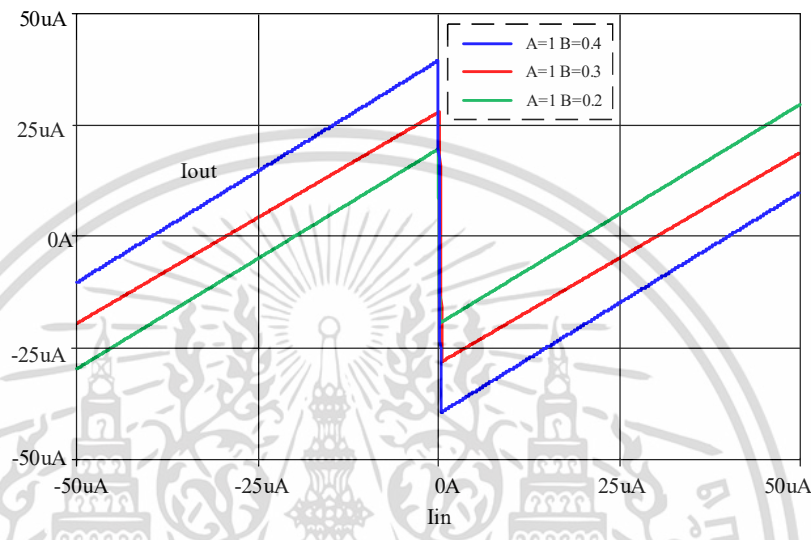
ส่วนรูปที่ 4.25 เป็นการแสดงผลของวงจรฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบดัดแปลง เมื่อมีการปรับกระแสไบอัส AI_B หรือค่าคงที่ A ที่ OTA_5 โดยคงที่กระแสไบอัส $BI_B=30\mu\text{A}$ ที่ OTA_6 จากการแสดงผลทำให้เห็นว่า การปรับ AI_B หรือค่าคงที่ A ส่งผลกับการเปลี่ยนแปลง Slope ของฟังก์ชัน



รูปที่ 4.25 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Signum โดยกำหนด $BI_B=30\mu\text{A}$ ($B=0.3$) และปรับกระแสไบอัสที่ค่า $AI_B=100\mu\text{A}$ ($A=1$), $AI_B=80\mu\text{A}$ ($A=0.8$), $AI_B=60\mu\text{A}$ ($A=0.6$)

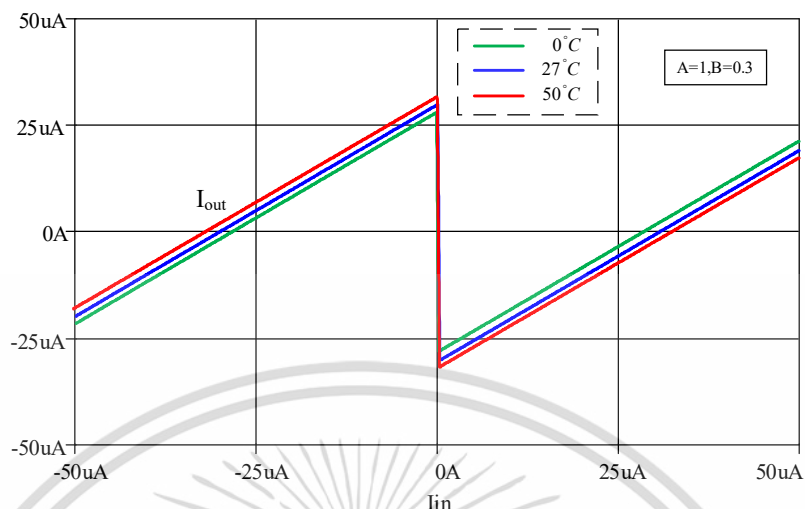
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนรูปที่ 4.26 เป็นการแสดงผลของวงจรฟังก์ชันสัญญาณแบบตัดแปลง เมื่อมีการปรับกระแสไบอัส BI_B หรือค่าคงที่ B ที่ OTA_6 โดยคงที่กระแสไบอัส $AI_B=100\mu A$ ที่ OTA_5 จากการแสดงผลทำให้เห็นว่า การปรับ BI_B หรือค่าคงที่ B ส่งผลกับการเปลี่ยนแปลง Amplitude ของฟังก์ชัน



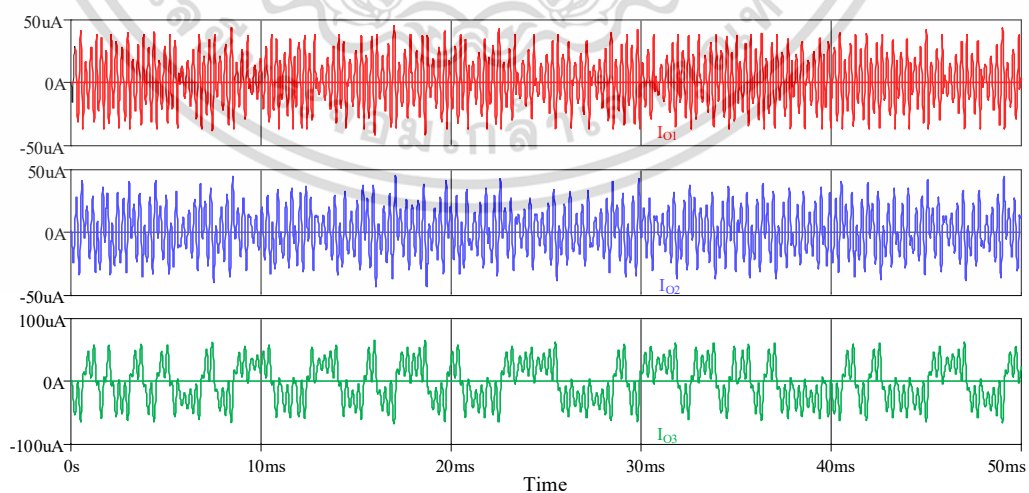
รูปที่ 4.26 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Signum โดยกำหนด $AI_B=100\mu A$ ($A=1$) และปรับกระแสไบอัสที่ค่า $BI_B=40\mu A$ ($B=0.4$), $BI_B=30\mu A$ ($B=0.3$), $BI_B=20\mu A$ ($B=0.2$)

ส่วนรูปที่ 4.27 เป็นการแสดงผลของวงจรฟังก์ชันสัญญาณแบบตัดแปลง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ $0^{\circ}C$, $27^{\circ}C$ และ $50^{\circ}C$ โดยกระแสไบอัส $AI_B=100\mu A$ ($A=1$) ที่ OTA_5 และปรับกระแสไบอัส $BI_B=30\mu A$ ($B=0.3$) ที่ OTA_6 จากการแสดงผลทำให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลกับการเปลี่ยนแปลง Amplitude ของฟังก์ชันเล็กน้อย



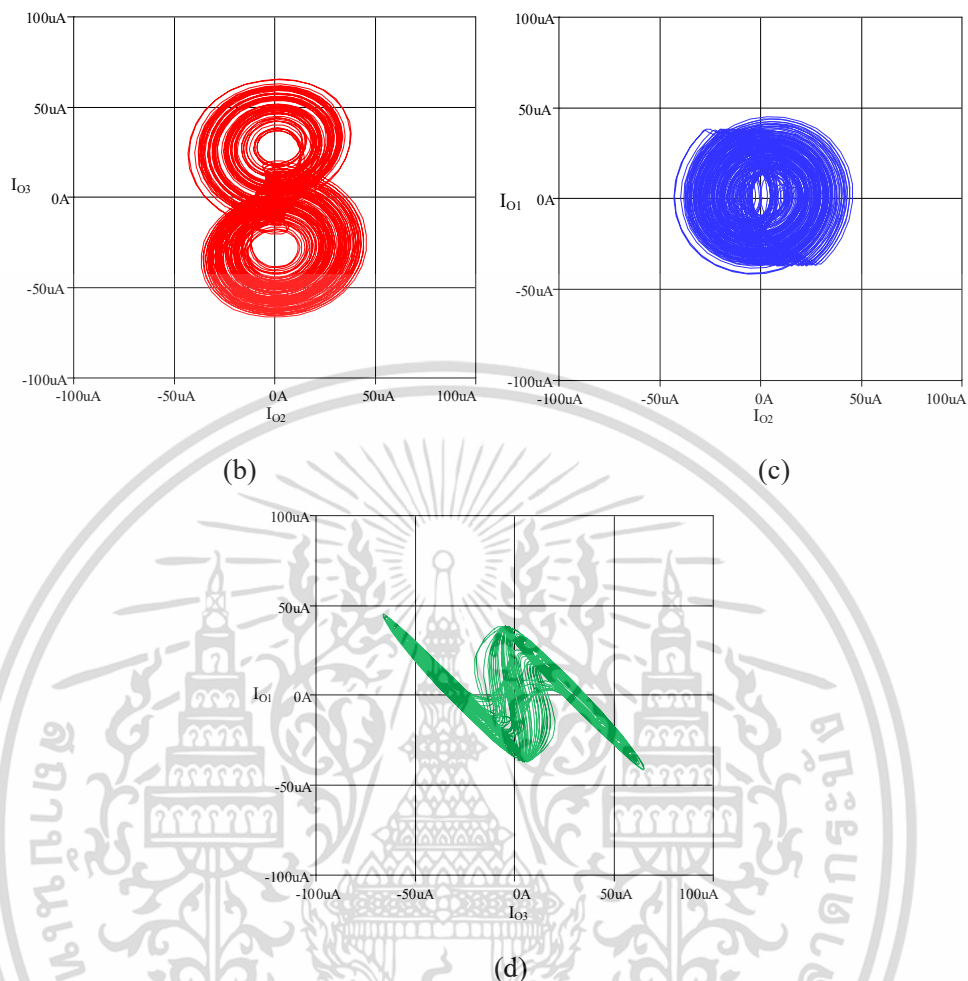
รูปที่ 4.27 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Sigma โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 0°C , 27°C และ 50°C

ต่อมาเป็นการจำลองผลการเกิดสัญญาณอลวน จากวงจรรูปที่ 4.9 ด้วยโปรแกรม PSpice มีการกำหนดกระแสไบอัสให้ OTA ทุกตัว $I_B=100\mu\text{A}$ โดยจะมีการปรับกระแสไบอัสที่ $\text{OTA}_3, \text{OTA}_5$ และ OTA_6 เท่ากับ $I_{B3}=kI_B=60\mu\text{A}$ ($k=0.6$), $AI_B=100\mu\text{A}$ ($A=1$) และ $BI_B=30\mu\text{A}$ ($B=0.3$) ตามลำดับ ผลการปรับค่าพารามิเตอร์ชุดแรกแสดงผลดังรูปที่ 4.28 เป็นการจำลองการเกิดสัญญาณอลวน รูปที่ 4.28 (a) เป็นการแสดงผล I_{O1}, I_{O2}, I_{O3} กับแกนเวลา และรูปที่ 4.28 (b)-(d) แสดงผลระนาบ x, y, z ของ $I_{O2}, I_{O3}, I_{O3}, I_{O1}$ และ I_{O2}, I_{O1} โดยจะมีการแสดงผลการปรับค่า A, B ให้เห็นในรูปที่ 4.29, 4.30, 4.31 และ 4.32 ในการปรับค่า A สามารถปรับได้ด้วยกระแสไบอัส AI_B และปรับค่า B สามารถปรับได้ด้วยกระแสไบอัส BI_B



(a)

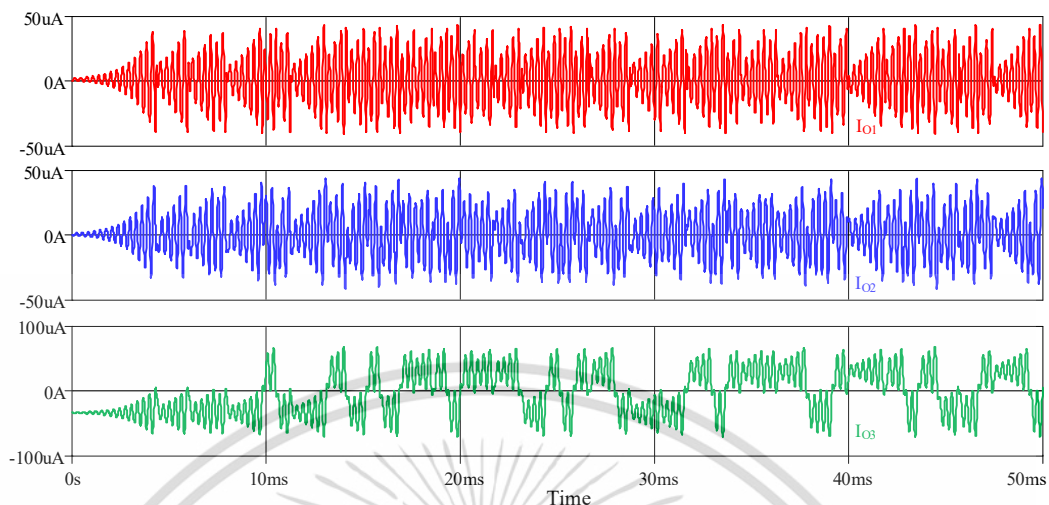
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



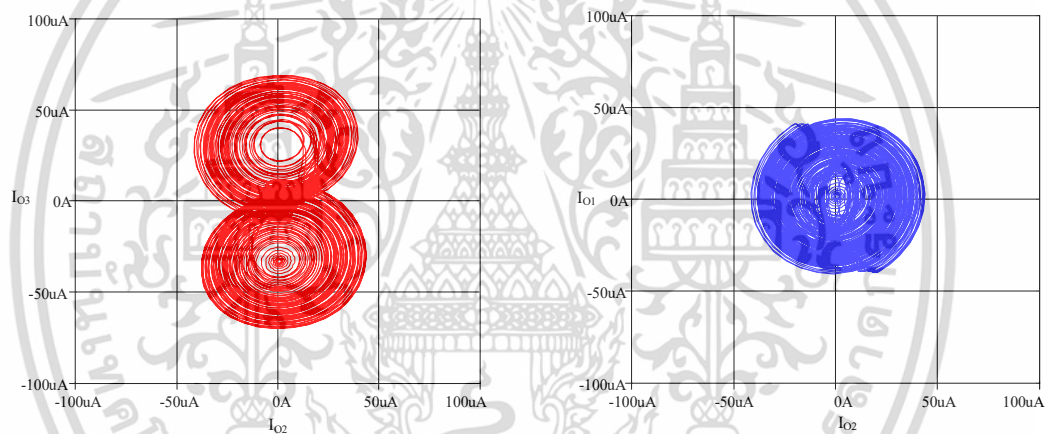
รูปที่ 4.28 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{01} , I_{02} และ I_{03} (b) I_{02} , I_{03} (c) I_{02} , I_{01} (d) I_{03} , I_{01} โดยปรับค่า $k=0.6$, $A=1$ และ $B=0.3$

ต่อมาแสดงผลการเกิดสัญญาณอลวน โดยปรับค่ากระแสไบอัสลดลงที่ OTA_5 คือ $AI_B=90\mu A$ ($A=0.9$) และคงที่กระแสไบอัสที่ OTA_3 และ OTA_6 เท่ากับ $I_{B3}=kI_B=60\mu A$ ($k=0.6$) และ $BI_B=30\mu A$ ($B=0.3$) ตามลำดับ โดยแสดงเป็นลักษณะสัญญาณอลวน ดังรูปที่ 4.29 (a) จากการแสดงผล I_{01} , I_{02} , I_{03} เทียบแกนเวลา และเป็นลักษณะตัวตึงดูตอลวน ดังรูปที่ 4.29 (b)-(d) แสดงผลระนาบ x, y, z ของ I_{02} , I_{03} , I_{03}, I_{01} และ I_{02}, I_{01} จากการปรับค่าคงที่ลดลงที่ $A=0.9$ ด้วยการปรับกระแสไบอัสที่ AI_B สังเกตว่าขนาดของสัญญาณอลวน นั้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่า $A=1$ ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งผลที่ได้สามารถบ่งบอกได้ว่า สามารถควบคุมการเกิดสัญญาณอลวน ได้ด้วยการปรับค่า A, B และ k และผลมีความสอดคล้องกับผลจาก MATLAB รูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

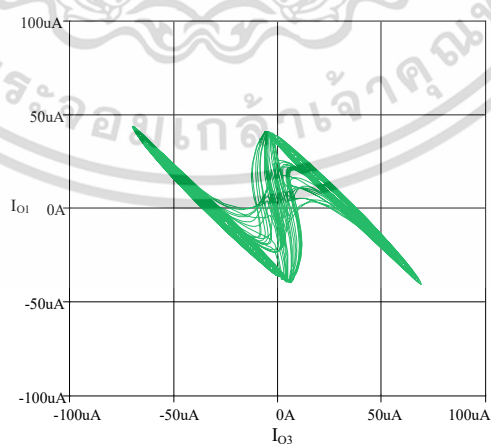


(a)



(b)

(c)

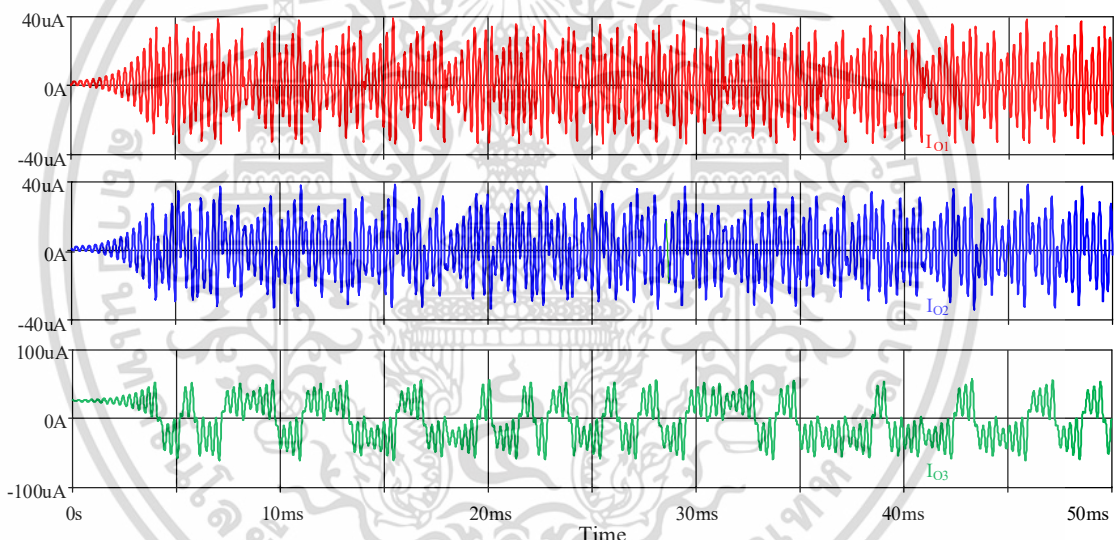


(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

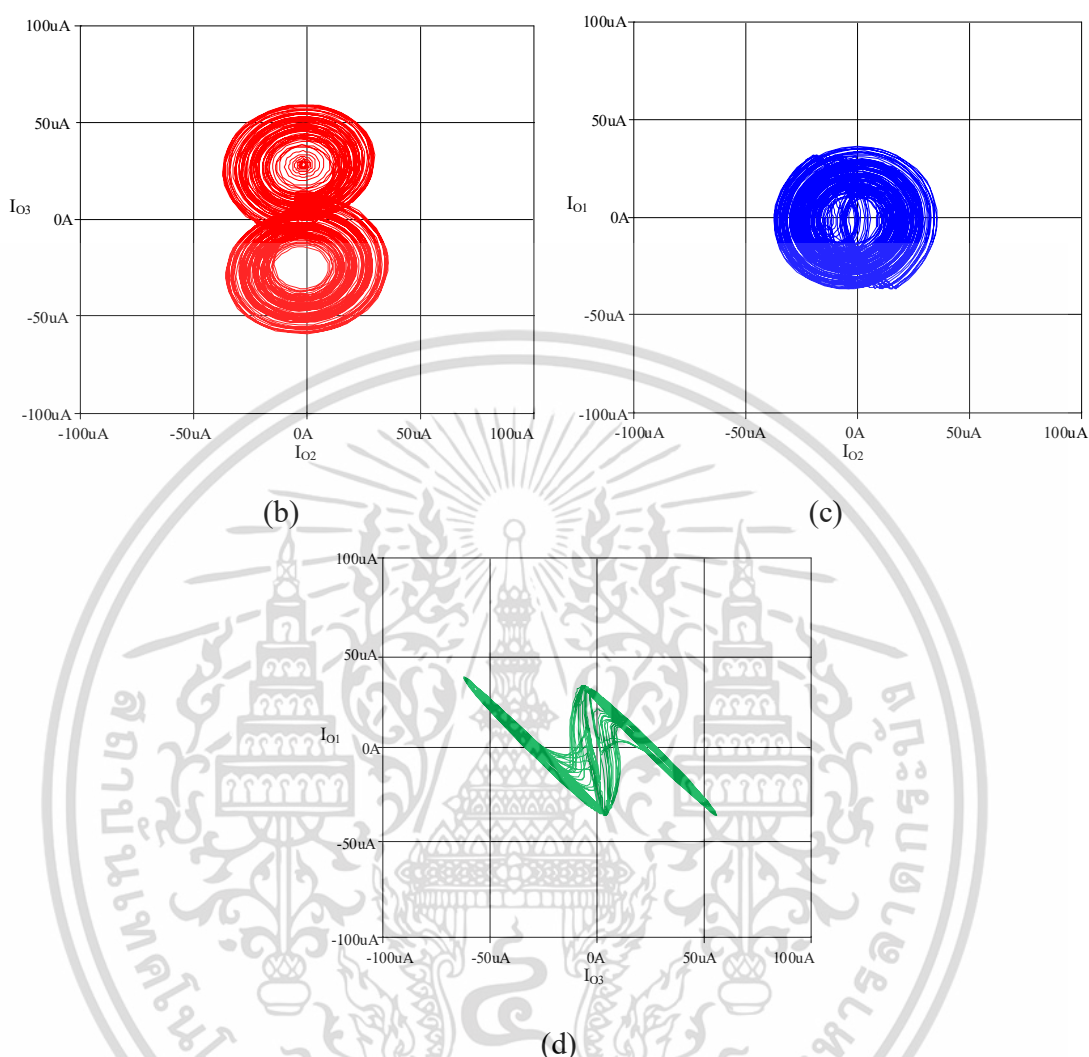
รูปที่ 4.29 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k=0.6$, $A=0.9$ และ $B=0.3$

ต่อมาแสดงผลการเกิดสัญญาณอลวน โดยปรับค่ากระแสไบอัสลดลงที่ OTA_5 คือ $AI_B=110\mu A$ ($A=1.1$) และคงที่กระแสไบอัสที่ OTA_3 คือ $BI_B=30\mu A$ ($B=0.3$) โดยมีการปรับกระแสไบอัสที่ OTA_6 ช่วยในการกำเนิดสัญญาณ เท่ากับ $I_{B3}=kI_B=70\mu A$ ($k=0.7$) โดยแสดงเป็นลักษณะสัญญาณอลวน ดังรูปที่ 4.30 (a) จากการแสดงผล I_{O1} , I_{O2} , I_{O3} เทียบแกนเวลา และเป็นลักษณะตัวตั้งดูอลวน ดังรูปที่ 4.30 (b)-(d) แสดงผลระนาบ x, y, z ของ I_{O2} , I_{O3} , I_{O3}, I_{O1} และ I_{O2}, I_{O1} จากการปรับค่าคงที่ลดลงที่ $A=1.1$ ด้วยการปรับกระแสไบอัสที่ AI_B สังเกตว่าขนาดของสัญญาณอลวน นั้นลดลงเมื่อเทียบกับค่า $A=1$ ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งมีผลที่สอดคล้องจาก MATLAB รูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.16



(a)

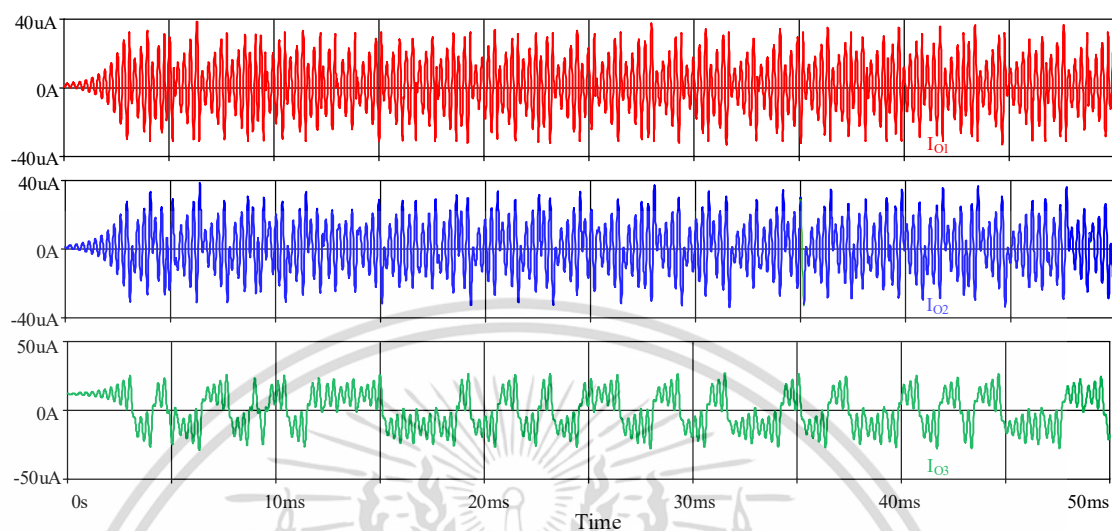
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



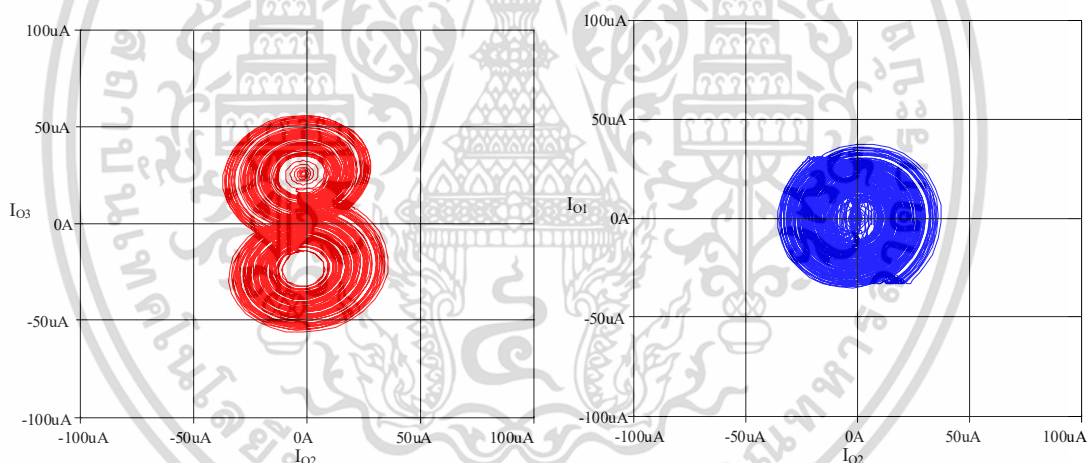
รูปที่ 4.30 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน (a) สัญญาณออสซิลเลชันที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k=0.7$, $A=1.1$ และ $B=0.3$

ต่อมาแสดงผลการเกิดสัญญาณออสซิลเลชัน โดยปรับค่ากระแสไบอัสลดลงที่ OTA_5 คือ $AI_B=120\mu A$ ($A=1.2$) และคงที่กระแสไบอัสที่ OTA_3 คือ $BI_B=30\mu A$ ($B=0.3$) โดยมีการปรับกระแสไบอัสที่ OTA_6 ช่วยในการกำเนิดสัญญาณ เท่ากับ $I_{B3}=kI_B=80\mu A$ ($k=0.8$) โดยแสดงเป็นลักษณะสัญญาณออสซิลเลชัน ดังรูปที่ 4.31 (a) จากการแสดงผล I_{O1} , I_{O2} , I_{O3} เทียบแกนเวลา และเป็นลักษณะตัวตั้งดูออสซิลเลชัน ดังรูปที่ 4.31 (b)-(d) แสดงผลระนาบ x, y, z ของ I_{O2} , I_{O3} , I_{O3}, I_{O1} และ I_{O2} , I_{O1} จากการปรับค่าคงที่ลดลงที่ $A=1.1$ ด้วยการปรับกระแสไบอัสที่ AI_B สังเกตว่าขนาดของสัญญาณออสซิลเลชัน นั้นลดลงเมื่อเทียบกับค่า $A=1$ ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งมีผลที่สอดคล้องจาก MATLAB รูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



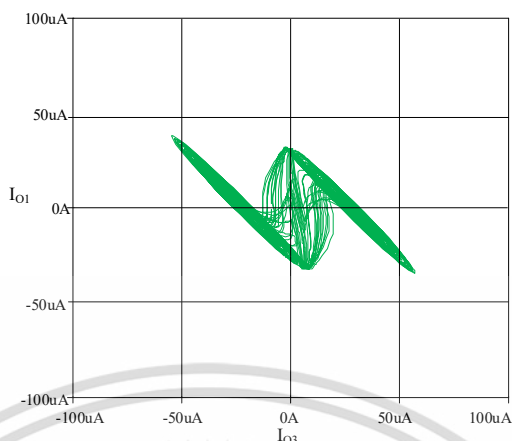
(a)



(b)

(c)

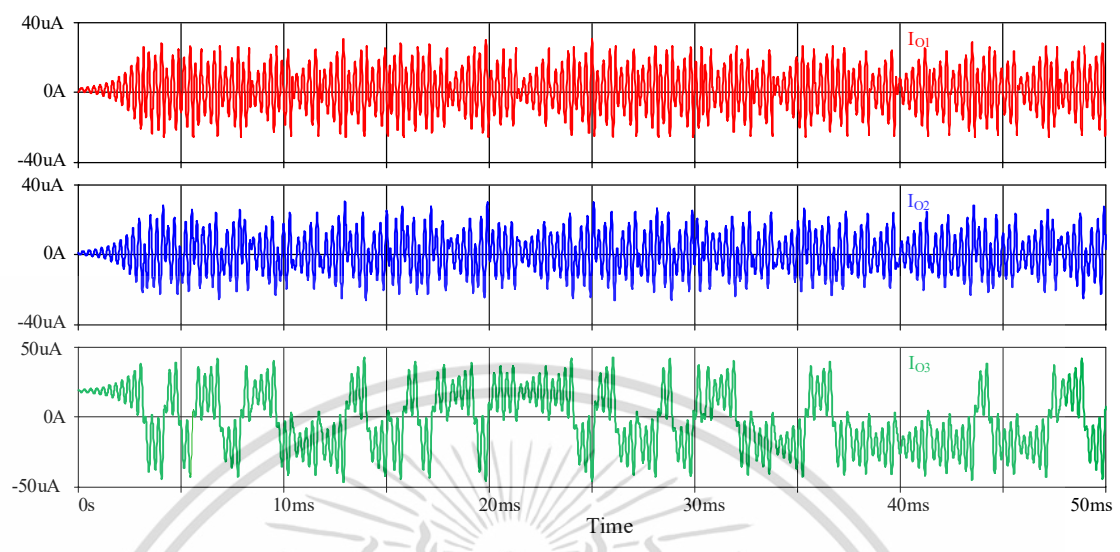
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



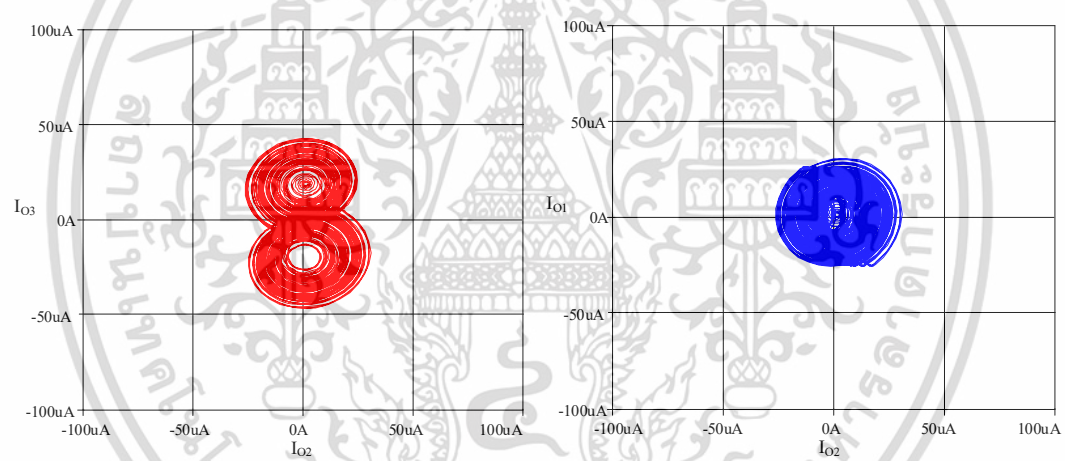
(d)

รูปที่ 4.31 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k=0.8$, $A=1.2$ และ $B=0.3$

ต่อมาแสดงผลการเกิดสัญญาณอลวน โดยปรับค่ากระแสไบอัสลดลงที่ OTA_6 คือ $BI_B=20\mu A$ ($B=0.2$) และคงที่กระแสไบอัสค่าพารามิเตอร์ชุดแรกที่ OTA_3 และ OTA_5 เท่ากับ $I_{B3}=kI_B=60\mu A$ ($k=0.6$) และ $AI_B=100\mu A$ ($A=1$) ตามลำดับ โดยแสดงเป็นลักษณะตัวดึงดูดอลวน ดังรูปที่ 4.32 (a) จากการแสดงผล I_{O1} , I_{O2} , I_{O3} เทียบแกนเวลา และเป็นลักษณะตัวดึงดูดอลวน ดังรูปที่ 4.32 (b)-(d) แสดงผลระนาบ x, y, z ของ I_{O2} , I_{O3} , I_{O3}, I_{O1} และ I_{O2}, I_{O1} จากการปรับค่าคงที่ลดลงที่ $B=0.2$ ด้วยการปรับกระแสไบอัสที่ BI_B สังเกตว่าขนาดของสัญญาณอลวน นั้นลดลงเมื่อมีการลดค่า B ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับผลจาก MATLAB รูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20

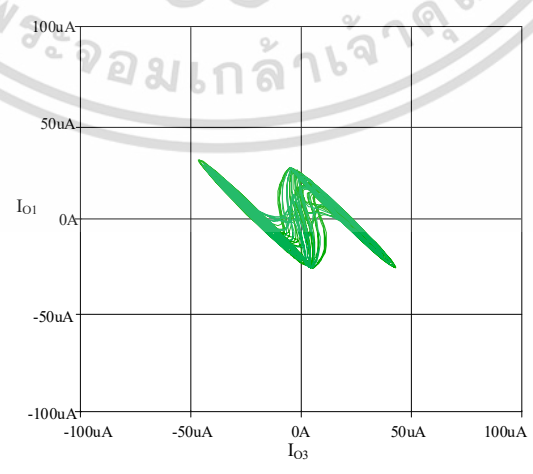


(a)



(b)

(c)

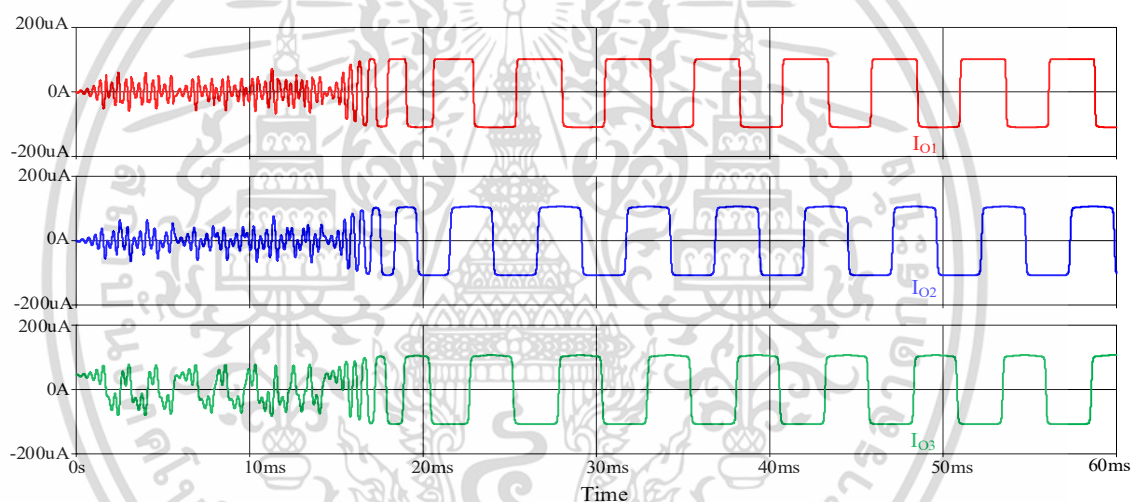


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

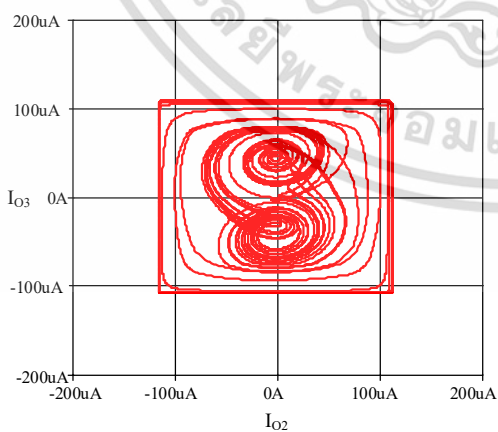
(d)

รูปที่ 4.32 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (a) สัญญาณอลวน
ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k=0.6$, $A=1$ และ $B=0.2$

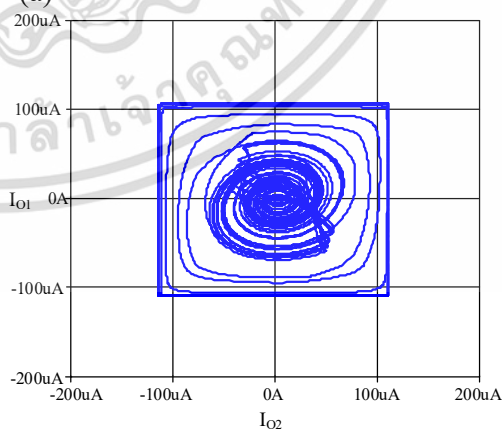
ต่อมาแสดงผลการปรับค่าพารามิเตอร์ A , B และ k ที่เกินช่วงการทำงานของวงจรทำให้เกิดลักษณะของสัญญาณอลวนที่ผิดเพี้ยนหรือเกิดการอิ่มตัว (Saturation) ของเอาต์พุตกระแสโอทีเอ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์ในทางปฏิบัติ โดยปรับค่ากระแสไบอัสลดลงที่ OTA_6 คือ $BI_B \geq 50\mu A$ ($B \geq 0.5$) ปรับค่ากระแสไบอัสลดลงที่ OTA_5 $AI_B \geq 140\mu A$ ($A \geq 1.4$) และปรับค่ากระแสไบอัสที่ OTA_3 $kI_B \leq 50\mu A$ ($k \leq 0.5$) โดยแสดงเป็นลักษณะสัญญาณอลวน ดังรูปที่ 4.33 (a) และเป็นลักษณะตัวดึงดูดอลวน ดังรูปที่ 4.33 (b)-(d)



(a)

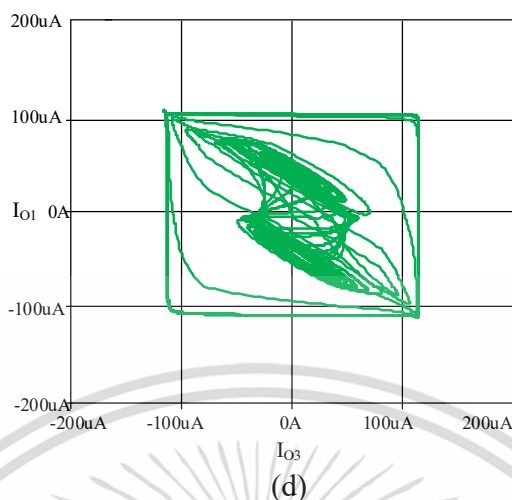


(b)



(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



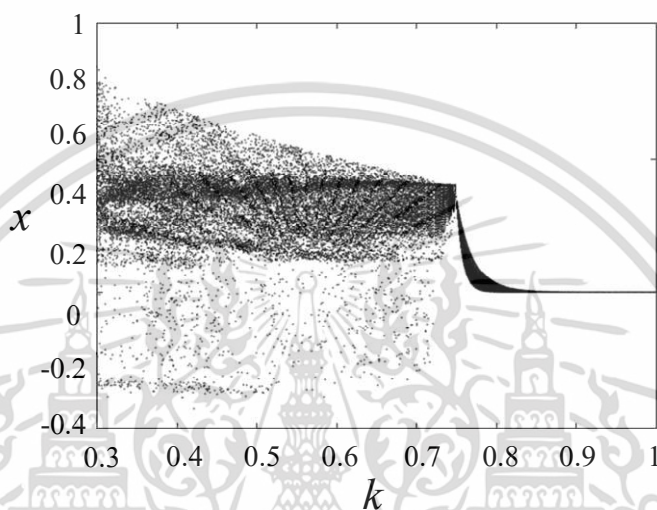
รูปที่ 4.33 แสดงเอาต์พุตกระแสจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์เกินช่วงกำเนิดสัญญาณ (a) สัญญาณอลวน ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3} (b) I_{O2} , I_{O3} (c) I_{O2} , I_{O1} (d) I_{O3} , I_{O1} โดยปรับค่า $k \leq 0.5$, $A \geq 1.4$ และ $B \geq 0.5$

ผลที่ได้จากการปรับค่าคงที่ A และ B สรุปได้ว่า เมื่อมีการปรับค่าคงที่ A ลดลง ส่งผลให้ขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้น และการปรับค่า A เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของสัญญาณลดลง และเมื่อมีการปรับค่าคงที่ B ลดลง ส่งผลให้ขนาดของสัญญาณลดลง และการปรับค่า B เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้น โดยการปรับค่า A และ B สามารถคงความเป็นลักษณะของสัญญาณอลวน ได้ด้วยการปรับพารามิเตอร์ k ช่วย ซึ่งการปรับค่า A, B เพิ่มขึ้น จำเป็นต้องปรับค่า k เพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น พารามิเตอร์ A, B และ k มีผลในการควบคุมการเกิดสัญญาณอลวน โดยหากมีการปรับ $k \leq 0.5$, $A \geq 1.4$ และ $B \geq 0.5$ จะส่งผลให้การกำเนิดสัญญาณผิดเพี้ยนจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ เป็นช่วงค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถปรับเพื่อกำเนิดสัญญาณอลวนได้

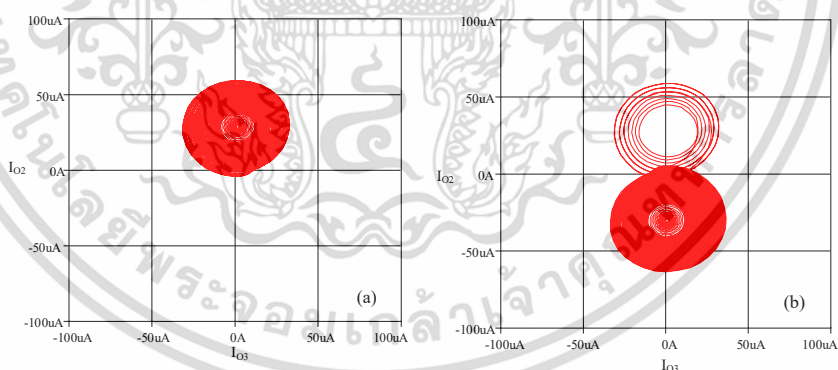
4.7 ผลจำลองการทำงานเปรียบเทียบการแสดงผล ตัวดึงคู่อลวนและแผนภาพการแยกไปสองทาง (The Bifurcation diagram)

รูปที่ 4.34 แสดงแผนภาพการแยกไปสองทางของตำแหน่ง x โดยมีค่าพารามิเตอร์ k เป็นพารามิเตอร์หลักในการควบคุมการเกิดสัญญาณอลวน โดยรูปที่ 4.35(a) แสดงผลเมื่อค่าพารามิเตอร์ $k > 0.9$ ตัวดึงคู่อลวนยังไม่เกิดการบิดเบี้ยวและมีความเสถียรของวงโคจรเพียงเล็กน้อย และได้ลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 4.36(a) รูปที่ 4.35(b) แสดงผลเมื่อค่าพารามิเตอร์ $k = 0.85$ วงโคจรมีความเสถียรและใกล้เข้าสู่ช่วงเกิดการทวีค่า (Period doubling) และจะได้สัญญาณรูป sine ดังรูปที่ 4.36(b) รูปที่ 4.35(c) แสดงผลเมื่อค่าพารามิเตอร์ k อยู่ในช่วง 0.75 ถึง 0.8 เกิดการทวีค่า (Period doubling: period-2 cycle)

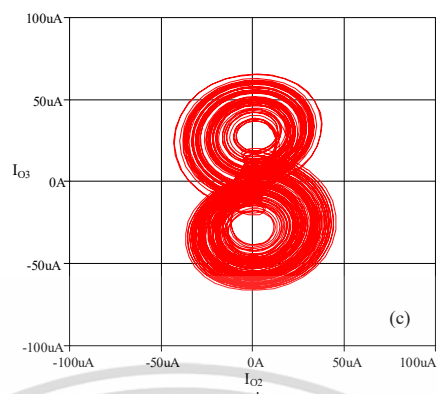
โดยตัวดึงดูดเริ่มเกิดการบิดเบี้ยวและเกิดค่าที่ไม่ซ้ำกัน มีลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 4.36 (c) การลดลงของค่าพารามิเตอร์ k ทำให้เกิดพฤติกรรมการกำเนิดสัญญาณที่บิดเบี้ยวในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งส่งผลให้วงเส้นทางการทวิค่า (Period Doubling Route) เกิดเป็นตัวดึงดูดคดววน รูปที่ 4.35(d) แสดงผลเมื่อค่าพารามิเตอร์ $k = 0.7$ แสดงภาพตัวดึงดูดคดววน และได้สัญญาณคดววน ดังรูปที่ 4.36(d)



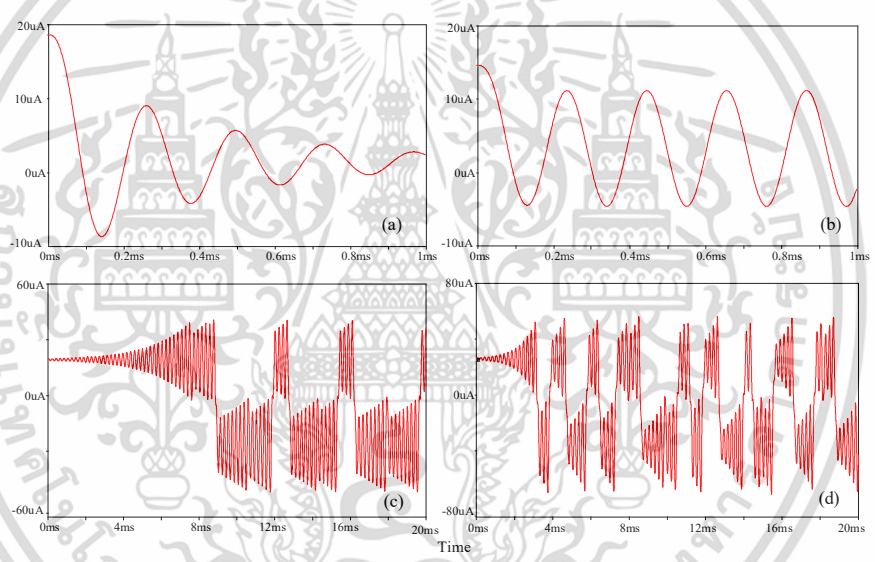
รูปที่ 4.34 แสดงแผนภาพการแยกไปสองทางของตำแหน่ง x โดยมีพารามิเตอร์ k ควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดงภาพลำดับเฟสการเกิดตัวดึงดูดคูลวน ที่ตำแหน่ง I_{O3} และ I_{O2} โดยใช้การปรับพารามิเตอร์ k ที่ $I_{B3}=kI_B$ คือ (a) $kI_B=90\mu A$, (b) $kI_B=80\mu A$, (c) $kI_B=60\mu A$



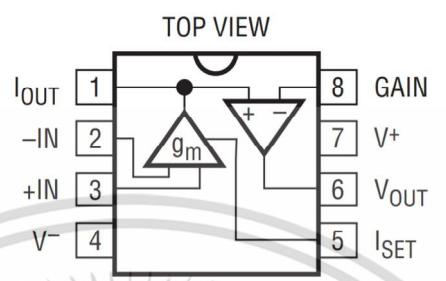
รูปที่ 4.36 แสดงลำดับการเกิดสัญญาณคูลวน ที่ตำแหน่ง I_{O3} โดยปรับกระแสไบอัสที่ (a) $I_{B3}=kI_B=100\mu A$ ($k=1$), (b) $I_{B3}=kI_B=90\mu A$ ($k=0.9$), (c) $I_{B3}=kI_B=80\mu A$ ($k=0.8$) และ (d) $I_{B3}=kI_B=60\mu A$ ($k=0.6$)

4.8 ผลจำลองการทำงานของวงจรจากการต่อวงจรจริง

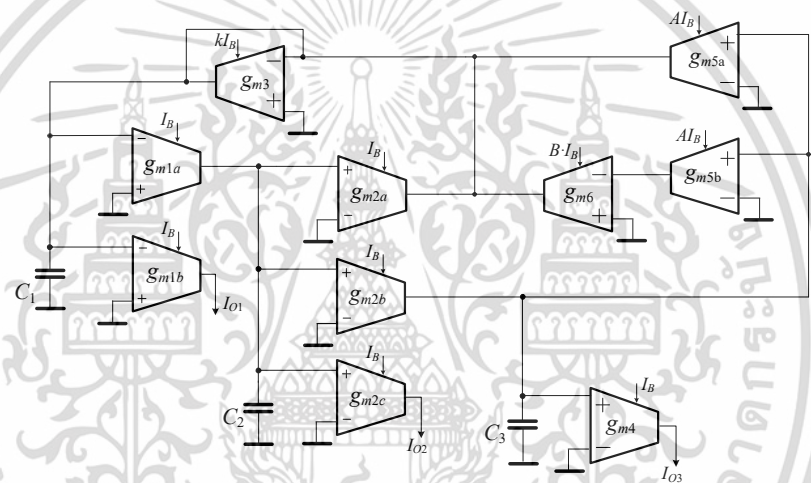
ในหัวข้อนี้นำเสนอการต่อวงจรทดสอบการทำงานของวงจรถูกจำลองสัญญาณคูลวน เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองการทำงานที่ได้นำเสนอ ซึ่งประยุกต์สร้างเป็นวงจรโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟไอทีเอ[62] เบอร์ LT1228 ที่มีขายในเชิงพาณิชย์แสดง Datasheet ดังรูปที่ 4.37 (a) ในการต่ออุปกรณ์จะใช้ขา 1 เป็นเอาต์พุตกระแส ขา 2 และ 3 เป็นอินพุตแรงดันลบและอินพุตแรงดันบวกตามลำดับ ป้อนแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงที่ขา 4 และ 7 โดยป้อนกระแสไบอัสที่ขา 5 ออกแบบบนแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

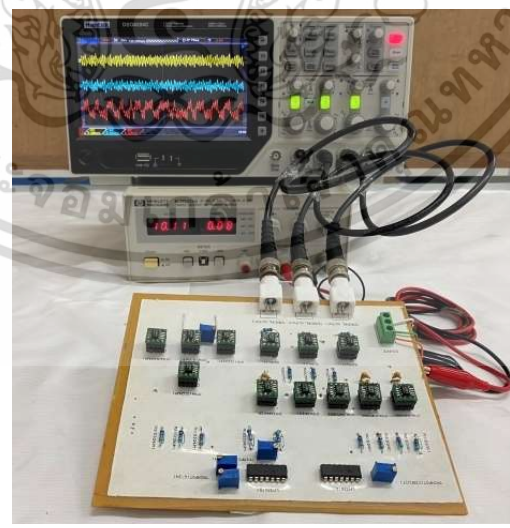
PCB ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.37(b) โดยมีการใช้อุปกรณ์แพสซีฟตัวเก็บประจุ 50nF 3 ตัวต่อลงกราวด์
อุปกรณ์แอกทีฟไอซี 10 ตัว และแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง ±10V แสดงลักษณะวงจรและภาพรวมใน
การทดสอบผลดังรูปที่ 4.37(b) และ 4.37(c) ตามลำดับ



(a)



(b)

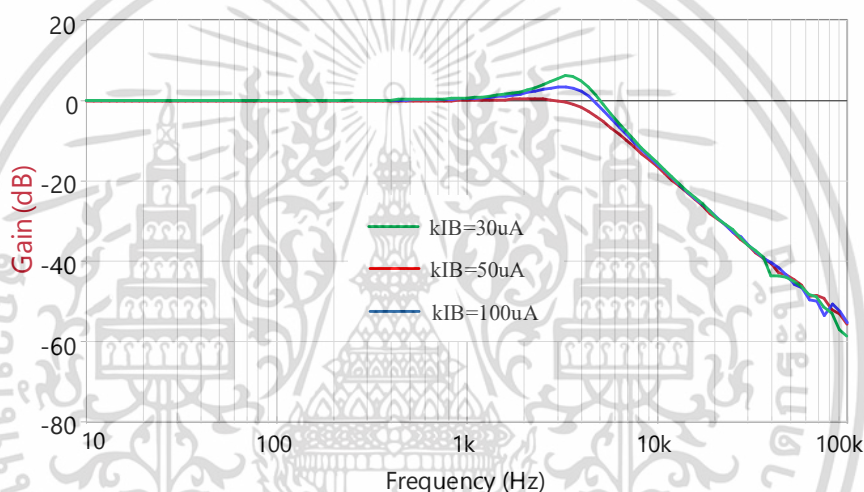


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.37 แสดงรูปวงจร PCB กำหนดสัญญาณอลวน ที่สร้างจากอุปกรณ์แอกทีฟโอทีเอ
LT1228 (a) Datasheet LT1228 (b) วงจรกำหนดสัญญาณอลวน (c) ภาพรวมวงจร

ในวงจรมีการใช้คุณสมบัติตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง (LPF) โดยออกแบบเป็นวงจรที่
ประพจน์ตัวเป็น Biquadratic มีการวัดผลโดยใช้ Vector Network Analyzer (VNA) แสดงผล
Magnitude ดังรูปที่ 4.38 โดยมีการปรับ Quality factor ด้วยการปรับกระแสไบอัสที่ OTA_3 (kI_B) และมี
ช่วงความถี่คัทออฟ (Frequency Cutoff : f_0) ที่ 4 kHz ซึ่งผลมีความสอดคล้องกับผลจำลองการทำงาน
ด้วย PSpice รูปที่ 4.22



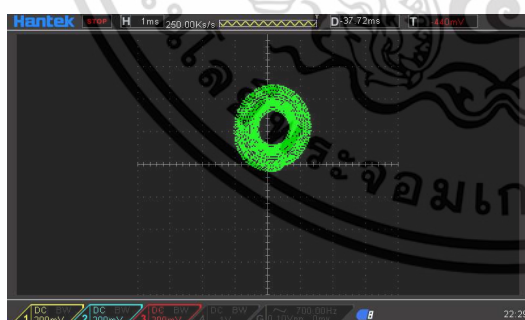
รูปที่ 4.38 แสดงผล Magnitude ของวงจรกรองตัวถี่ต่ำผ่านอันดับสอง (LPF) ใช้ LT1228 โดยปรับ kI_B

ต่อมาเป็นส่วนของวงจรฟังก์ชันสัญญาณแบบตัดแปลง ที่ใช้ในวงจรกำหนดสัญญาณอลวน ที่มี
การสร้างโดยใช้โอทีเอ เบอร์ LT1228 โดยกำหนดแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร $\pm 10V$ และใช้กระแสไบอัสที่
 OTA_5 และ OTA_6 เท่ากับ 100uA และกระแสไบอัสที่ OTA_7 เท่ากับ 30uA เพื่อให้ได้ค่าคงที่ $A=1$, $B=0.3$
ตามลักษณะฟังก์ชันที่ออกแบบในรูปที่ 4.4 โดยจะได้ลักษณะของฟังก์ชันจากวงจรที่สร้างจริงดังรูปที่ 4.39
ซึ่งผลมีความสอดคล้องกับผลจำลองการทำงานด้วย PSpice ดังรูปที่ 4.24

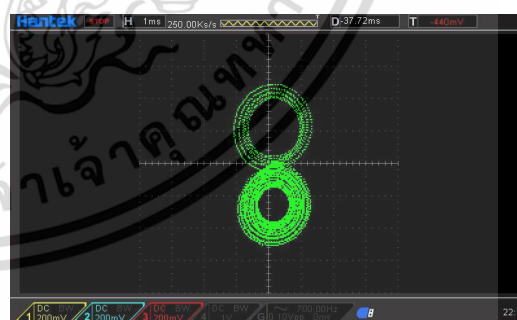


รูปที่ 4.39 แสดงผลฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น **Signum** ที่ใช้ในวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน

รูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นการปรับลักษณะตัวดึงดูด ที่เรียกว่า เส้นทางสู่ความอลวน (Route to Chaos) โดยการใช้การปรับ kI_B ของวงจรด้วยการลดกระแสไบอัสลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะความเป็นอลวน จากการปรับ kI_B มีความสัมพันธ์ทางทฤษฎีแผนภาพการแยกไปสองทาง รูปที่ 4.34 จะเห็นว่าจากผลทางทฤษฎีพฤติกรรมความอลวน จะแสดงอย่างชัดเจนในช่วงที่ k น้อยกว่า 0.75 หรือกระแสไบอัสน้อยกว่า $75\mu\text{A}$ โดยผลที่ได้ รูปที่ 4.35(a) มีการปรับ $kI_B = 90\mu\text{A}$ ได้ลักษณะของตัวดึงดูด เป็นวงกลมที่เกิดจากสัญญาณไซน์คงที่ จากนั้นรูปที่ 4.35(b) เริ่มเกิดเป็นลักษณะตัวดึงดูดอลวน ที่ $kI_B = 80\mu\text{A}$ และมีลักษณะเป็นตัวดึงดูดอลวน ชัดเจนที่ $kI_B = 60\mu\text{A}$ ดังรูปที่ 4.35(c) ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลจำลองการทำงานด้วย PSpice ดังรูปที่ 4.28

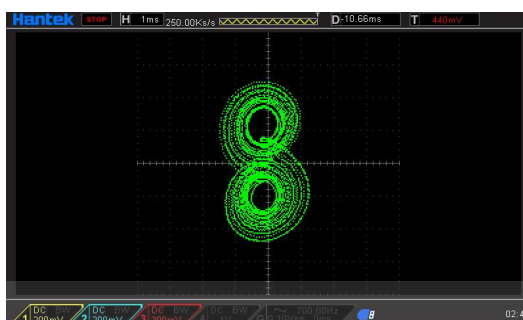


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

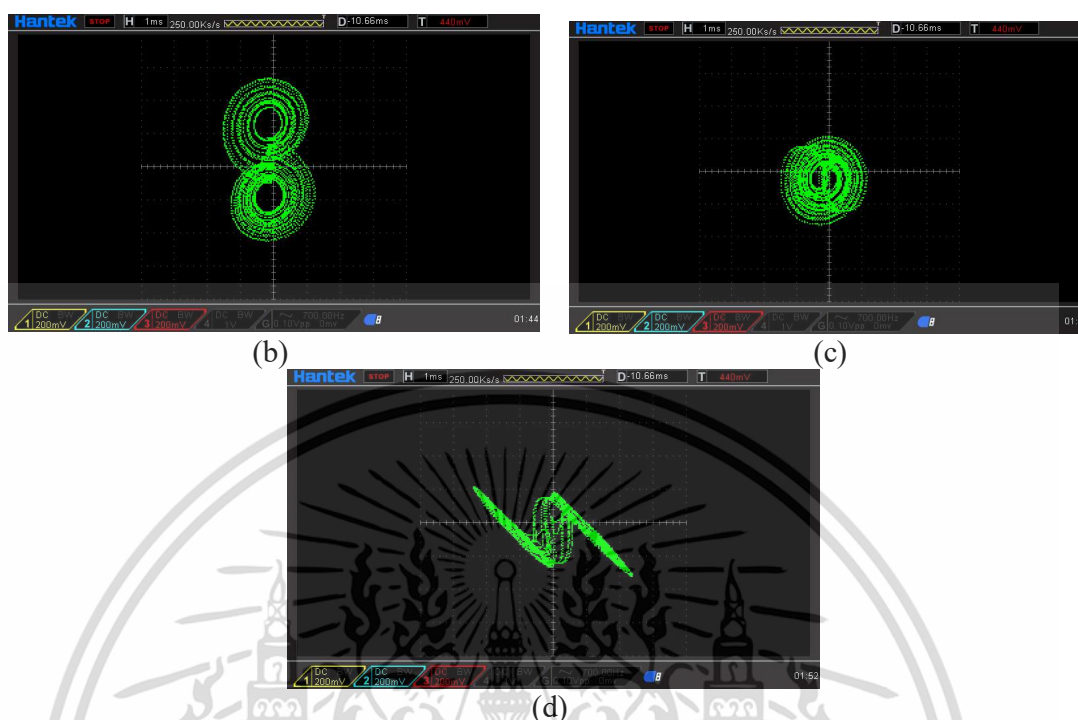
รูปที่ 4.40 แสดงลักษณะตัวดึงดูดอลวน เมื่อปรับกระแสไบอัส (a) $kI_B = 90\mu\text{A}$, (b) $kI_B = 80\mu\text{A}$, (c) $kI_B = 60\mu\text{A}$

ในการทดสอบวงจรรวมของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน มีการไบอัสกระแส (I_B) ให้ OTA ทุกตัว $100\mu\text{A}$ ยกเว้น OTA_3 และ OTA_7 ที่ไบอัสกระแส $I_{B3}=kI_B=60\mu\text{A}$ ($k=0.6$) และ $BI_B=30\mu\text{A}$ ($B=0.3$) ตามลำดับ จากรูปที่ 4.41 แสดงผลของสัญญาณอลวน และลักษณะตัวดึงดูดอลวน ที่ได้จากวงจร โดยมีการปรับลักษณะฟังก์ชันสัญญาณแบบดัดแปลง ที่ค่าคงที่ $A=1$, $B=0.3$ ผลที่ได้จากการต่อวงจรจริงมีความสอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 4.22



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 แสดงผลลักษณะสัญญาณอลวน ทั้ง 3 เาต์พุตกระแส และลักษณะตัวตั้งคูดอลวน ทั้ง 3 ด้านของวงจร โดยกำหนด $A=1, B=0.3$ และ $k=0.6$ (a) สัญญาณอลวน (b) $I_{o2}:I_{o3}$ (c) $I_{o2}:I_{o1}$ (d) $I_{o3}:I_{o1}$

4.9 บทสรุป

ในบทนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ที่ใช้อุปกรณ์โอทีเอ และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ในการสร้าง ออกแบบด้วยแบบจำลองการกระตุกของ Sportt และ ฟังก์ชันสัญลักษณ์แบบดัดแปลง โดยวงจรสามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ จากผลการทดลองทั้ง 3 ส่วน คือ ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice และผลจำลองการทำงานจากการต่อวงจรจริง สรุปได้ดังนี้

- โปรแกรม MATLAB

ในงานวิจัยมีการใช้สมการ state จากแบบจำลองการกระตุกมาจำลองผลด้วย MATLAB เพื่อจำลองผลทางทฤษฎี Bifurcation และผลการกำเนิดสัญญาณอลวน พร้อมด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ ทั้ง 3 คือ A, B และ k พบว่า พารามิเตอร์ทั้ง 3 มีผลต่อการควบคุมการเกิดสัญญาณ และการปรับพารามิเตอร์ k มีความสอดคล้องกับผลทางทฤษฎี Bifurcation

- โปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อออกแบบวงจรด้วยอุปกรณ์ไอทีเอ เบอร์ LT1228 และตัวเก็บประจุ จากแบบจำลองการกระตุ้นของ Sportt ได้นำวงจรมาจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice และจำลองผลของวงจรย่อยทั้ง 3 ส่วน คือ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง และวงจรฟังก์ชันสัญญาณแบบตัดแปลง จากนั้นจำลองผลวงจรรวมกำเนิดสัญญาณอลวน พบว่าวงจรย่อยมีผลถูกต้องตามทฤษฎีทุกประการ และสามารถให้กำเนิดสัญญาณอลวนได้ โดยผลการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ k มีความสอดคล้องกับทฤษฎี Bifurcation ด้วย MATLAB และมีผลการกำเนิดสัญญาณที่ปรับค่าพารามิเตอร์ A , B และ k ที่สอดคล้องกับ MATLAB ทุกประการ

- การต่อวงจรจริง

ในงานวิจัยได้สร้างวงจรจริงบนแผ่น PCB จากวงจรที่ออกแบบในงานวิจัย และวัดผลด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ Oscilloscope สำหรับวัดผลการเกิดสัญญาณพร้อมด้วยปรับค่าจากวงจรจริง และ Vector Network Analyzer (VNA) สำหรับวัดผล Magnitude จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง พร้อมด้วยการปรับค่า Quality factor จากวงจรจริง จากผลที่ได้ พบว่า สามารถสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณโดยออกแบบด้วย อุปกรณ์แอกทีฟไอทีเอที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ไอซี เบอร์ LT1228 และตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ พร้อมด้วยการปรับค่าจากตัวต้านทานปรับค่าได้ Trimpot ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม Pspice ทุกประการ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ออกแบบจากโครงสร้างแบบจำลองการกระตุ้นของ Sportt ร่วมกับฟังก์ชันสัญญาณแบบตัดแปลง ใช้อุปกรณ์โอทีเอ และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่อลงกราวด์ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่เคยมีมาในอดีต ด้วยรูปแบบของโครงสร้างแบบจำลองการกระตุ้น ทำให้งานวิจัยที่นำเสนอสามารถปรับค่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณได้ด้วยพารามิเตอร์เพียงหนึ่งตำแหน่ง โดยปรับค่า Quality factor (Q) ที่ตำแหน่งวงจรรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง และยังสามารถออกแบบลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างอิสระ เมื่อเปรียบเทียบในการสร้างวงจรกับงานวิจัยต่างๆที่กล่าวมา สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน

งานวิจัย	แบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบ	ชนิดอุปกรณ์	จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร	วงจรสามารถสร้างและเปลี่ยนรูปแบบ Double scroll ได้	วงจรสามารถปรับลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้	วงจรสามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์	วงจรสามารถแยกปรับ $(CO)^*$ และ $(FO)^{**}$ ได้อย่างอิสระ
3.2.1 [56]	Lorenz model	OA	19	✗	✗	✗	✗
3.2.2 [57]	Rosler Model	OA	23	✗	✗	✗	✗
3.2.3 [58]	Chua model	OA	18	✗	✗	✗	✗
3.2.4 [59]	Jerk model	CFOA	12,10	✓	✓	✗	✗
งานวิจัยที่นำเสนอ	Jerk model	OTA	9	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ: *1 เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ (Condition of Oscillator: CO) *2 ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ (Frequency of Oscillator: FO)

จากตารางที่ 5.1 รูปแบบของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ที่นำเสนอของงานวิจัย สามารถให้กำเนิดรูปแบบของสัญญาณได้หลากหลายกว่างานวิจัยในอดีต เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ออกแบบได้ มีการใช้อุปกรณ์ภายในวงจรที่น้อยกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองเดียวกัน วงจรของงานวิจัยสามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการใช้อุปกรณ์แอกทีฟโอทีเอ และสามารถปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (Condition of Oscillation :CO) ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานความถี่ของวงจร (Frequency of Oscillator :FO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ด้วยการสร้างวงจรตามโครงสร้างแบบจำลองการกระตุ้น ข้อดีของแบบจำลอง คือ สามารถออกแบบลักษณะของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้หลากหลาย หากมีการใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันสัญลักษณ์อื่นๆ จะทำให้สามารถออกแบบลักษณะสัญญาณอลวน รูปแบบใหม่ได้ โดยเฉพาะความสำคัญในโทรคมนาคม ด้านการสื่อสาร จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเข้ารหัสด้วยสัญญาณรูปแบบใหม่ และมีลักษณะของตัวดึงตุลอลวน ที่ไม่ซ้ำเดิม สามารถเพิ่มรูปแบบการเข้ารหัสเพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการสื่อสาร แต่ต้องมีการกำหนดค่าคงที่จากฟังก์ชันและเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณที่สัมพันธ์กัน โดยปกติจะทดลองผลก่อนด้วยโปรแกรม MATLAB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.C. Esteban, "Engineering Applications of FPGAs Chaotic Systems, Artificial Neural Networks, Random Number Generators, and Secure Communication Systems," *Springer International Publishing Switzerland*, 2016.
- [2] B. Roberto, "Chaos and Weather Prediction," Meteorological Training Course Lecture Series, Jan. 2000.
- [3] P.A. Patsis, "Chaos in Astronomy," Research Center for Astronomy, Academy of Athens, Athens, Greece, 2007.
- [4] E.N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow," *J. Atmos. Sci.*, vol.20, no.2, pp. 130-141, 1963.
- [5] O.E. Rössler, "An equation for continuous chaos," *PHYSICS LETTERS A*, vol.57, pp. 397, 1976.
- [6] J. S. Ramos, "Introduction to Nonlinear Dynamics of Electronic Systems: Tutorial," *Nonlinear Dynamics* Vol.44, pp.3-14, 2006.
- [7] M. P. Kennedy, "Chaos in the Colpitts oscillator," *IEEE Trans. Circuit Syst.-I*, Vol.41, pp.771-774, 1994. -14, 2006.
- [8] A. S. Elwakil, and M. P. Kennedy, "A Semi-Systematic Procedure for Producing Chaos from Sinusoidal Oscillators Using Diode-Inductor and FET-Capacitor Composites," *IEEE Trans. Circuit Syst.-I*, vol.47, pp.582-590, 2000.
- [9] T. Arunas, "Modified Wien-bridge oscillator for chaos," *Electronics Letters*, vol.31, no.5, pp.335-336, 1995.
- [10] A. S. Elwakil, and A. M. Soliman, "Two twin-T based op amp oscillators modified for Chaos", *J. Franklin Inst.*, Vol.335B, pp.771-787, 1998. V. W. Leung and G. W. Roberts Effects of transistor nonidealities on high order log-domain ladder filter frequency responses. *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, vol.47, no.5, pp.373-387, 2000.
- [11] A. S. Elwakil, and A. M. Soliman, "Chaotic oscillators derived from sinusoidal oscillators based on the current feedback opamp," *Analog Integr Circuits Signal Process.*, Vol.24, pp.239-251, 2000. D. R. Frey, "Log-domain filtering: An approach to current-mode filtering," *Proc. IEE*, part-G, vol.140, no.6, pp. 406-416, 1993.
- [12] J. C. Sprott, "Simple chaotic systems and circuits," *American. J. Phys.* vol.68, no.8, pp.758-763, 2000.
- [13] J. C. Sprott, "A New Class of Chaotic Circuit," *Physics Letters A*, vol.266, pp.19-23, 2000.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] T. Siriburanon, B. Srisuchinwong, T. Nontapradit, "Compound Structures of Six New Chaotic Attractors in a Solely-Single-Coefficient Jerk Model with Arctangent Nonlinearity," Proc. of Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2010), Xuzhou, China, pp.985-990, 26-28 May, 2010.
- [15] O. Christian, "A history of chaos theory," *A Dialogues in Clinical neuroscience*, vol.9, no.3 pp.279-289, Sep. 2007.
- [16] Steven H. Strogatz, B.: Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics biology chemistry and engineering, Perseus Books, pp. 171-180, 1994.
- [17] C.C. Alain, "Poincare and the Three-Body Problem," *Poincare, Seminaire Poincare XVI*, pp. 45 – 133, 2012.
- [18] E.N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow," *J. Atmos. Sci.*, vol.20, no.2, pp. 130-141, 1963.
- [19] Steven H. Strogatz, B.: Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics biology chemistry and engineering, Perseus Books, pp.301-310, 1994.
- [20] D. Ruelle, "On the nature of turbulence," *Comm Math Phys.*, vol.20, pp. 167–192, 1971.
- [21] E.N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow," *J. Atmos. Sci.*, vol.20, no.2, pp.130-141, 1963.
- [22] Steven H. Strogatz, B.: Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics biology chemistry and engineering, Perseus Books, pp.311-316, 1994.
- [23] W.H. Morris and S. Stephen, B.: Pure and Applied Mathematics: Differential Equations, Dynamical Systems and Linear Algebra, A series of monographs and textbooks, 1974.
- [24] K.M. Ibrahim, "Chaotic behaviour of the Rossler model and its analysis by using bifurcations of limit cycles and chaotic attractors," *Journal of Phys.*, Conf. Ser. 1003, 2018.
- [25] Ma Li, "Chaos Control of Rossler System," *Electrical Automation*, vol.38, no.04, pp.27-29, 2016.
- [26] Y.W. Chen, "Use Active Control to Realize the Antisynchronization Between Rossler System and Sprott-O System," *Journal of Fujian Radio & TV University.*, vol.01, pp.85-88, 2016.
- [27] Y. Zhou and Y.C. Du, "Use Rossler System to Chaotic Anti-Control Heart Beat System," *Progress in Biomedical Engineering*, vol.35, no.03, pp.129-132, 2014.
- [28] T. Matsumoto, "A Chaotic Attractor from chua's Circuit," *IEEE. Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-31, no.12, pp.1056-1058, DEC. 1984.
- [29] L.O. Chua, "Chua's circuit: an overview ten years late," *J. Circuits Syst. Comput.*, vol.4, no.2, pp.117–159, 1994.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] J. Awrejcewicz and M.L. Calvisi, “Mechanical Models of Chua's Circuit,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol.12, no.4, pp. 671-686, 2002.
- [31] L. Fortuna, M. Frasca, and M. G. Xibilia, “Chua’s Circuit Implementations: Yesterday, Today and Tomorrow,” Singapore: World Scientific, 2009.
- [32] L. Jakob, “The Anatomy of the Chua circuit,” Bachelor Thesis Equivalent to 15 ECTS, Division of Mathematical Physics Department of Physics Faculty of Science, 2014.
- [33] R. Brown, “Generalizations of the Chua Equations,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol.40, no.11, pp.878-884, 1993.
- [34] J.M. Cruz and L.O. Chua, “A CMOS IC nonlinear resistor for Chua’s circuit,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol.CAS-39, pp.985–995, 1992.
- [35] E.C. Tlelo, A.H. Gaona and J.D. Garcia, “Implementation of a chaotic oscillator by designing Chua’s diode with CMOS CFOAs,” *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol.48, no.2, pp.159–162, 2006.
- [36] O.L. Chua, “The Genesis of Chua’s Circuit,” *Archiv. Electron. Ubertragungstech (AEU)*, vol. 46, pp.250-257, 1992.
- [37] J. C. Sprott, “Some simple chaotic flows,” *American. J. Phys.*, vol.50, no.2, pp.647-650, Jan. 1994.
- [38] Steven H. Strogatz, B.: *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics biology chemistry and engineering*, Perseus Books, pp. 203-209, 1994.
- [39] P. Pual, “Mechanical systems of third order and jerk curves,” Conference: 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, Mexico, 19-25 June, 2011.
- [40] S.J. Linz and J.C. Sprott, “Elementary chaotic flow,” *Physics Letters A*, vol. 259, pp.240–245, 1999.
- [41] T. Robert, N. Tekou, H.L.F. Patrick and A.C.G Jason, “Chaos in a Single Op-Amp–Based Jerk Circuit: Experiments and Simulations,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol.63, no.3, pp.239-243, 2016.
- [42] B. Srisuchinwong, and C.–H. Liou, “High-Frequency Implementation of Sprott’s Chaotic Oscillators Using Current-Feedback Op Amps,” *Proceedings of International Symposium on Signals Circuits and Systems – ISSCS 2007*, pp.97-99, 2007.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [43] B. Srisuchinwong, C.-H. Liou, and T. Klongkumnuankan, "Prediction of Dominant Frequencies of CFOA-Based Sprott's Sinusoidal and Chaotic Oscillators," Topics on Chaotic Systems: Selected Papers from CHAOS 2008 International Conference, edited by Christos H. Skiadas, Ioannis Dimotikalis and Charilaos Skiadas, Word Scientific Publishing, pp.331-337, 2009.
- [44] B. Srisuchinwong, T. Siriburanon and T. Nontapradit, "Compound Structures of Five New Chaotic Attractors Based on Sin-1(x) in a Modified Sprott's Jerk Model," Submitted for Publication to Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2010), Chiang Mai, Thailand, 19-21 May, 2010.
- [45] B. Munmuangsaen and B. Srisuchinwong, "A New Five-Term Simple Chaotic Attractor," Physics Letters A, vol.373, pp.4038-4043, 2009.
- [46] B. Munmuangsaen and B. Srisuchinwong, "A New Lorenz-Like Chaotic Attractor and Its Synchronization," Proceedings of Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2009), Guilin, China, pp.1508-1512, 17-19 June, 2009.
- [47] พิพัฒน์ พรหมมี, "หลักการตัวกรองความถี่นอก, " คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
- [48] Steven H. Strogatz, B.: Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics biology chemistry and engineering, Perseus Books, pp.241-260, 1994.
- [49] B. Geoff, "Visual Analysis of Nonlinear Dynamical Systems: Chaos, Fractals, Self-Similarity and the Limits of Prediction," Systems, vol.4, no.37, 2016.
- [50] Steven H. Strogatz, B.: Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics biology chemistry and engineering, Perseus Books, pp.353-366, 1994.
- [51] E. Saising and P. Prommee, "Fully Tunable all-pass filter using OTA and its application," Proc. of 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP2016), Vienna, Austria, 27-29 June,
- [52] W. Tao, H. Jianjun and Z. Yuhui, "Using Operational Transconductance Amplifiers for Chua's circuit," Proceedings of IEEE TENCON, no.2, 2002
- [53] K. Montree and D. Kobchai, "Voltage-Mode Low-pass, High-pass, Band-pass Biquad Filter Using Simple CMOS OTAs," International Instrumentation and Measurement Technology Conference Singapore, 5-7 May, 2009.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [54] K. Khanittha and S. Wanlop, “On the realization of electronically current-tunable CMOS OTA,” *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, vol.61, pp.300 – 306, 2005.
- [55] พิพัฒน์ พรหมมี, “หลักการตัวกรองความถี่นาลอก,” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
- [56] R. Jim, “Build a Lorenz Attractor,” 2010, Available online: <https://www.chaotic-circuits.com/10-creating-lorenz-butterfly/>.
- [57] L. Primo and et al., “A Rössler Attractor Circuit,” Oct. 2013, Available online: <http://www.glensstuff.com/rosslerattractor/rossler.htm>.
- [58] Z. Trent, “The Development and Numerical Modeling of a Chua Circuit as a Pedagogical Tool,” The Physics Department at the College of Wooster, Wooster, OH, USA, Dec. 2014.
- [59] B. Srisuchinwong, and C.-H. Liou, “High-Frequency Implementation of Sprott’s Chaotic Oscillators Using Current-Feedback Op Amps,” *Proceedings of International Symposium on Signals Circuits and Systems – ISSCS 2007*, pp.97-99, 2007.
- [60] A. S. Elwakil, K. N. Salama, and M.P. Kennedy “A system for chaos generation and its implementation in monolithic form,” in *Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and Systems 2000 (ISCAS 2000)*, Geneva, Switzerland, May 2000. doi:10.1109/iscas.2000.857402
- [61] P. Prommee, T. Pattanatadapong, “Realization of Tunable Pole-Q Current-Mode OTA-C Universal Filter,” *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 29, no. 5, pp.913–924, Oct. 2010. doi:10.1007/s00034-010-9189-1
- [62] Data sheet: LT1228–100 MHz Current Feedback Amplifier with DC Gain Control, Linear Technology Corporation, 2012. Available online: <http://www.linear.com/product/LT1228>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมจำลองผล Jerk model สำหรับ MATLAB

```

A=0.9 B=0.3 k=0.6;           % case 1
A=1   B=0.3 k=0.6;           % case 2
A=1.1 B=0.3 k=0.7;           % case 3
A=1.2 B=0.3 k=0.8;           % case 4
A=1   B=0.2 k=0.6;           % case 5

t(1)=0.0;                     % Initial t
x(1)=0.1; y(1)=0.1; z(1)=0.1; w(1)=0.0; % initial condition
dt=0.1;                         % Time step
rr=15000;                       % Number of time steps

for n=1:rr                     % Time loop
w(n)= (A*x(n)-B*sign(x(n)));

% แบบจำลองตัวแปร State Jerk model

dx = y(n);
dy = z(n);
dz = -k*z(n)-y(n)-w(n);

x(n+1)=x(n)+dx*dt;
y(n+1)=y(n)+dy*dt;
z(n+1)=z(n)+dz*dt;
t(n+1)=t(n)+dt;

end

plot(t,x); % สำหรับ plot Attractor 2 มิติ และ Time domain
plot3(x,y,z); % สำหรับ plot Attractor 3 มิติ
xlim([0 700]);
title('Chaos');
xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z');
grid on

```

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมจำลองผลทางทฤษฎี **The Bifurcation** สำหรับ **MATLAB**

```
% โปรแกรมนี้เป็นการจำลองผล Bifurcation ของ Jerk model ที่ใช้ฟังก์ชัน Signum ที่ค่าคงที่ A=1,B=0.3
clc; clear all;
format compact; format long e;
set(0,'defaultaxesfontsize',11.5,'defaultaxeslinewidth',0.8,...
'defaultlinewidth',2.0,'defaultpatchlinewidth',2.7,...
'defaultaxesfontweight','Bold')

A = 1; B = 0.3;

global k;
%range = 0.1:0.001:1;
range = 1.9:0.001:2.5; % Range for parameter b
c = 0; tspan = 0:0.05:400;
xmax = []; % A matrix for storing the sorted value of x1
for k = range
    j = 1; c = c + 1;

    f = @(t,x) [ x(2) ; x(3) ; -k*x(3)-x(2)-(A*x(1)+B*sign(x(1)))]; % jerk model

    x0 = [0.1 0.1 0]; % initial condition for Rossler system
    c = c + 1;
    [t,x] = ode45(f,tspan,x0);
    count = find(t>150); % remove transition
    x = x(count,:);
    j = 1;
    n = length(x(:,1)); % find the length of vector x1(x in our problem)
    for i=2 : n-1

        % คำสั่ง Plot ตำแหน่ง Bifurcation x,y,z
        if (x(i-1,3)+eps) < x(i,3) && x(i,3) > (x(i+1,3)+eps)
            xmax(c,j)=x(i,3); % Sorting the values of x1 in increasing order
            j=j+1;
        end
    end
    end
    if j>1
        plot(k,xmax(c,1:j-1),'k.','MarkerSize',1.5); %%% 'MarkerSize',1.5
    end
    hold on;
    index(b)=j-1;
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

โปรแกรม Pspice สำหรับจำลองผลการทำงาน

วงจรกำเนิดสัญญาณอลวน

Chaotic oscillator OTA

```
*****T14Y MOSIS 0.25um *****
.MODEL NMOS1 NMOS (LEVEL=3 TOX=5.7E-9 NSUB=1E17 GAMMA=0.4317311
+PHI=0.7 VTO=0.4238252 DELTA=0 UO=425.6466519 ETA=0 THETA=0.1754054
+KP=2.501048E-4 VMAX=8.287851E4 KAPPA=0.1686779 RSH=4.062439E-3
+NFS=1E12 TPG=1 XJ=3E-7 LD=3.162278E-11 WD=1.232881E-8
+CGDO=6.2E-10 CGSO=6.2E-10 CGBO=1E-10 CJ= 1.81211E-3 PB=0.5
+MJ=0.3282553 CJSW= 5.341337E-10 MJSW=0.5)
.MODEL PMOS1 PMOS (LEVEL=3 TOX=5.7E-9 NSUB=1E17 GAMMA=0.6348369
+PHI=0.7 VTO=-0.5536085 DELTA=0 UO=250 ETA=0 THETA=0.1573195
+KP=5.194153E-5 VMAX=2.295325E5 KAPPA= 0.7448494 RSH = 30.0776952
+NFS=1E12 TPG=-1 XJ=2E-7 LD=9.968346E-13 WD= 5.475113E-9
+CGDO=6.66E-10 CGSO=6.66E-10 CGBO=1E-10 CJ= 1.893569E-3 PB=0.9906013
+MJ=0.4664287 CJSW= 3.625544E-10 MJSW=0.5)
*****T14Y MOSIS 0.25um *****

***** i+ i- o+ o- o+ o- o+ IB
.subckt OTA 3 4 10 11 13 14 15 50
VDD 1 0 dc 1
VSS 2 0 dc -1
M1 5 3 7 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
M2 6 4 7 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
M3 10 5 1 1 PMOS1 W=80u L=0.5u
M4 8 5 1 1 PMOS1 W=80u L=0.5u
M5 5 5 1 1 PMOS1 W=80u L=0.5u
M6 6 6 1 1 PMOS1 W=80u L=0.5u
M7 9 6 1 1 PMOS1 W=80u L=0.5u
M8 11 6 1 1 PMOS1 W=80u L=0.5u
M9 10 9 2 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
M10 8 8 2 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
M11 9 9 2 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
M12 11 8 2 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
M13 13 5 1 1 PMOS1 W=80u L=0.5u
M14 13 9 2 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
M15 14 6 1 1 PMOS1 W=80u L=0.5u
M16 14 8 2 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
M17 15 5 1 1 PMOS1 W=80u L=0.5u
M18 15 9 2 2 NMOS1 W=50u L=0.5u

MB1 50 50 2 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
MB2 7 50 2 2 NMOS1 W=50u L=0.5u
.ends OTA
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. (ต่อ)

Signam Funct i o+ o-*

```
.subckt signum 1 4 3
x1 1 0 3 2 0 0 0 50 OTA
x2 2 0 3 0 0 0 0 51 OTA
IB1 0 100 dc 100u
VB 100 0 dc 0
F1 0 50 VB 1
F2 0 51 VB .3
.ends signum
```

Ig 0 1 PULSE(10u 0 0 0 .01p)

```
x1 0 1 2 0 0 5 0 50 OTA
x2 2 0 1 0 3 6 0 51 OTA
xQ 0 1 1 0 0 0 0 52 OTA
C1 1 0 10n
C2 2 0 10n
```

```
x4 3 0 7 0 0 0 0 53 OTA
C3 3 0 10n
```

```
F1 0 50 VB1 1
F2 0 51 VB1 1
FQ 0 52 VB1 0.6
F3 0 53 VB1 1
VB1 100 0 dc 0
IB1 0 100 dc 100u
```

xsig 3 0 1 signum


```
RL1 5 0 1
RL2 6 0 1
RL3 7 0 1
```

```
.tran 10u 20m 0m 1u
.probe
.end
```




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 43
The 43rd Electrical Engineering Conference (EECON-43)



28 - 30 ตุลาคม 2563
ณ โรงแรมท็อบแลนด์
อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก



- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ไฟโตนิกส์ (PH)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- พลังงานหมุนเวียน (RE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรก้าเนิดสัญญาณออสซิลเลชันด้วยแบบจำลองการกระตุ้นแบบกระแสโดยใช้อ็ททีเอ

Jerk Model Current-mode Chaotic Oscillator based on OTA

คุณานนท์ กระจวานิช และ พิพัฒน์ ทรหมณี

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 62601093@kmitl.ac.th, pipat.pr@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรก้าเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos) โดยใช้โครงสร้างตามแบบจำลอง Jerk ของ Sport ร่วมกับฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum ในการก้าเนิดสัญญาณจะทำได้โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์เพียงหนึ่งค่า การออกแบบวงจรก้าเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน จะทำงานในรูปแบบกระแสโดยใช้อ็ททีเอ และ ตัวเก็บประจุเท่านั้น ไม่มีการใช้ความต้านทาน สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง และฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวงจรมีการปรับค่าเงื่อนไขการก้าเนิดสัญญาณได้จากตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ของวงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง การจำลองการทัวมวณของวงจรถ้วยโปรแกรม PSpice และ โปรแกรม MATLAB พบว่า วงจรสามารถแสดงการเกิดสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos) ได้และ ยังพบว่าพฤติกรรมของสัญญาณมีช่วงการทำงานที่กว้างที่แน่นอนสอดคล้องกับผลจากวงจรถ โดยยืนยันได้จากกราฟ Bifurcation

คำสำคัญ: สัญญาณออสซิลเลชัน แบบจำลอง Jerk อ็ททีเอ ก้าเนิดสัญญาณ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

Abstract

This paper describes a chaotic oscillator circuit based on Jerk model and nonlinear function. The signum function is deployed to realize the chaotic oscillator which controlled by using a single parameter. The OTA and grounded capacitors are used without the resistors for achieving the chaotic oscillator. The circuit consists of main three parts, lossless integrator, biquadratic low-pass filter, and nonlinear function circuits. The condition of chaos signal can be electronically tuned through the quality factor of biquadratic low-pass filter. The simulation results are incorporated by PSpice and MATLAB which found that the chaos signal can be generated agree well to the theory. The chaos behavior can also be proved by bifurcation diagram. The signal output has doubling periods according to the circuit results.

Keywords: Chaos signal, Jerk model, OTA, Oscillator, nonlinear function

1. บทนำ

วงจรถออิเล็กทรอนิกส์วงจรแรกของ Chua แสดงการเกิดสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos) ถูกค้นพบในห้องวิจัยซึ่งยังไม่มีการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ [1]

โดยมีการใช้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (Ordinary Differential Equations) สามสมการ ค่อมาวงจรก้าเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบโคลพิทส์ (Chaotic Colpitts Oscillator) ได้นำเสนอโดย Kennedy [2] ค้นพบว่าวงจรถเกิดสัญญาณรูปแบบใหม่ซึ่งสามารถเกิดสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos) ได้ จากนั้น Elwakil และ Kennedy ได้ใช้ กระบวนการก้าเนิดสัญญาณแบบปรับค่าสัมประสิทธิ์เป็นวงจรก้าเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos) โดยมีวงจรถก้าเนิดสัญญาณใหม่เป็นวงจรถหลักและมีการใช้อุปกรณ์แบบไม่เชิงเส้นคือจากภายนอก เป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน (ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ) และ ไดโอด [3] นอกจากนี้ยังมีวงจรถก้าเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos) อื่นหลายวงจรถ เช่น วงจรถก้าเนิดสัญญาณแบบ Wein-bridge [3] วงจรถเกิดสัญญาณ Twin-T [4] วงจรถก้าเนิดสัญญาณด้วย CFOA (Current Feedback OPAMP) [5] เป็นต้น จะเห็นได้ว่ามีการคิดค้นวงจรถที่สามารถเกิดสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos) ได้ค่อนข้างหลากหลาย จากวงจรถก้าเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos) ในแบบต่างๆที่กล่าวมา วงจรถของ Elwakil และ Kennedy เป็นที่น่าสนใจเนื่องจากมีการปรับเงื่อนไขการก้าเนิดสัญญาณทั้งง่ายและมีอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นที่แยกเป็นอิสระ ทำให้ลดความซับซ้อนต่อการสร้างวงจรถ ในบทความนี้จะเลือกใช้รูปแบบการกระตุ้น (Jerk) ของ Sport [6-7] มีการสร้างในรูปแบบเดียวกับ มีการนำเสนอวงจรถก้าเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน (Chaos) โดยใช้สมการอนุพันธ์อันดับสามที่ของสมการเดียวในรูปแบบ Jerk กับค่าสัมประสิทธิ์ k ซึ่งมีสมการ ดังนี้

d^3x/dt^3 + k d^2x/dt^2 + dx/dt = G(x) (1)

รูปแบบของ Jerk มาจากกลไกที่มี 3 เป็นค่าการกระตุ้น และ อนุพันธ์อันดับต่างๆ เทียบกับเวลาของ x คือ ความเร่ง (dx/dt), ความเร็ว (d^2x/dt^2) และ การกระตุ้น (d^3x/dt^3) และ ตัวอย่างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น G(x) ที่ใช้ใน

รูปแบบ Jerk ที่สามารถเป็นไปได้เช่น ฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ (Absolute) ฟังก์ชัน (tanh(x)) หรือ ฟังก์ชันเครื่องหมาย (sgn(x)) ดังสมการที่ (2)

G(x) = { |x| - 2 : K = 0.6 [7] ; 2 tanh(x) - x : K = 0.19 [6] ; sgn(x) - 2x : K = 1 [8] } (2)

จากสมการที่ (2) เป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ Sport นำมาใช้ในรูปแบบของ Jerk บางส่วนมีการใช้ CFOA (Current Feedback OPAMP) [8] ต่อร่วมกับความต้านทาน และ ตัวเก็บประจุ เป็นโครงสร้างตัวตั้งออสซิลเลชัน

EL-11

(Chaotic Attractor) และ โครงสร้างตัวดึงดูดอลวนใน 6 รูปแบบ [9] ซึ่ง วงจรดังกล่าวสามารถปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์ได้

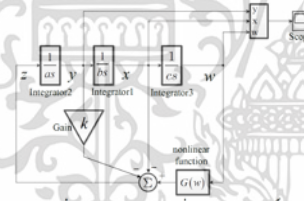
บทความนี้นำเสนอ ก่อเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) โดยใช้วงจรโอทีเอ (OTA: Operational Transconductance Amplifier) และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) โดยใช้โครงสร้างรูปแบบ Jerk และ ออกฟังก์ชัน Signum มา ร่วมกับสมการอนุพันธ์อันดับสาม โดยวงจรสามารถปรับเงื่อนไขของ ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น $G(x)$ และ ตัวดึงดูดอลวน (Attractor) ได้ทาง อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอิสระต่อกัน โดยแสดงผลการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ทั้งการจำลองผลจาก MATLAB และ PSpice เปรียบเทียบกัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลอง Jerk

Sport ได้นำเสนอรูปแบบการทำงานของระบบพลวัตแบบสามมิติ ซึ่งสามารถแสดงการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ได้ สมการ Jerk มี ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่สามารถปรับค่าฟังก์ชันได้ง่ายเนื่องจากเป็นอิสระ และสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์จากค่า k เพียงค่าเดียว ลดความซับซ้อนในการนำไปใช้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งรูปแบบ Jerk ถูกนำเสนอครั้งแรก โดย Sport ในปีค.ศ.2000

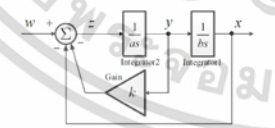
บทความนี้มีการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) ที่มี ต้นแบบจากรูปแบบ Jerk ของ Sport ตามที่อธิบายไว้ในสมการที่ (1) มีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์เพียงหนึ่งค่า และ ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น $G(x)$ ซึ่งเมื่อ ปรับเปลี่ยนค่าฟังก์ชันไม่เชิงเส้นนี้ ก็จะสามารถเปลี่ยนรูปการเกิด สัญญาณอลวนได้โดยง่าย โดยโครงสร้าง Jerk ของ Sport สามารถ แสดงด้วยตัวแปรสถานะ (State) ทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 1 [9]



รูปที่ 1 แบบจำลอง Jerk ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ k

เมื่อพิจารณาแบบจำลอง Jerk รูปที่ 1 เฉพาะสถานะ $x-z$ สามารถ นำมาเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 2 และ พบว่าประพจน์ตัวเป็น โขลวเคลติก ฟังก์ชันในรูปตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF) อันดับสองดังสมการที่ (3)

$$\frac{x}{w} = \frac{1}{abs^2 + kbs + 1} \tag{3}$$



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมแยกส่วนของแบบจำลอง Jerk

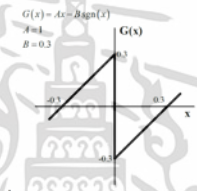
ระบบไม่เชิงเส้นแบบสามมิติรูปแบบ Jerk สามารถอธิบายด้วย สมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equations) ดังต่อไปนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= x, \\ \frac{dx}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= -kz - y + Aw - B \operatorname{sgn}(w), \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

โดยที่ k คือ ตัวประกอบในการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ ค่า A และ B คือ ค่าคงที่เงื่อนไขของฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ซึ่ง ค่า A=1 และ B=0.3 มีการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $(w_0, x_0, y_0) = (0.6, 0.3, 0)$ ตามลำดับ

2.2 ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น

ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ที่สามารถนำมาใช้กับรูปแบบ Jerk มีหลายแบบ ด้วยกันซึ่งที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 1 โดยฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ใช้ในบทความนี้ จะใช้ฟังก์ชัน Signum ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ประกอบจากฟังก์ชันสัญลักษณ์ และ ฟังก์ชันเชิงเส้น โดยในรูปที่ 3 เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นอิสระปรับ เงื่อนไขให้ใช้ได้ ด้วยตัวแปร A และ B สำหรับกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) โครงสร้าง Jerk



รูปที่ 3 ตัวอย่างฟังก์ชันไม่เชิงเส้น Signum

2.3 Bifurcation diagram

ในการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ในระบบพลวัต มีหลากหลายทฤษฎี อธิบายการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) หลายวิธี เช่น Poincare map, LE (Lyapunov Exponent), Bifurcation Diagram เป็นต้น ซึ่งในบทความจะ นำเสนอผลของการแยกไปสองทาง (Doubling) โดยทำให้เกิดเป็นการ แยกไม่ซ้ำรูปแบบ (Bifurcation) เพื่อที่ดูถึงการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) โดยใช้ทฤษฎีจากสมการ Logistic map ดังนี้

$$x_{n+1} = kx_n(1-x_n) \tag{5}$$

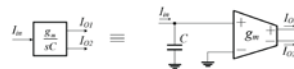
และเมื่อนำมาเขียนอยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะ 3 มิติ (Dimension) ใน โปรแกรม MATLAB สำหรับสมการ Jerk จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\left. \begin{aligned} w_{n+1} &= x_n, \\ x_{n+1} &= y_n, \\ y_{n+1} &= -kz_n - y_n + w_n - 0.3 \operatorname{sgn}(w_n), \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

3. การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน

ในส่วนการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน โดยใช้หลักการดังรูปที่ 1 นั้น วงจรที่สร้างเป็นหลักการคือ อินทิเกรตแบบไม่สูญเสีย ซึ่งสามารถ สร้างได้จากไอทีโอเดิมแสดงในรูปที่ 4 มีฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการที่ (7) และ (8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

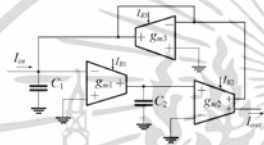


รูปที่ 4 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย

$$\frac{I_{o1}}{I_m} = \frac{g_m}{sC} \quad (7)$$

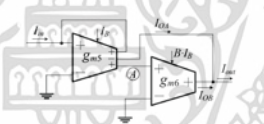
$$\frac{I_{o2}}{I_m} = -\frac{g_m}{sC} \quad (8)$$

จากบล็อกโตะแกรมแอกส่วนของแบบจำลอง Jerk รูปที่ 2 นั้น มีคุณสมบัติเป็นวงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ที่สามารถปรับค่าตัวประกอบคุณภาพได้อย่างเป็นอิสระกับความถี่ตอบสนอง สามารถออกแบบได้โดยใช้อัตราโอและตัวเก็บประจุ ดังแสดงวงจรรูปที่ 5 มีฟังก์ชันถ่ายโอนกระแสแสดงสมการที่ (9)



รูปที่ 5 วงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง

$$\frac{I_{o2}}{I_m} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{s^2 + \left(\frac{g_{m1}}{C_1}\right)s + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (9)$$



รูปที่ 6 วงจรฟังก์ชัน Signum สร้างจากโอทีเอ

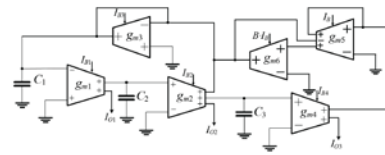
จากบล็อกโตะแกรมของแบบจำลอง Jerk รูปที่ 1 ถ้าเป็นคือมีวงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง $G(s)$ ซึ่งสามารถสร้างได้จากโอทีเอ 2 ตัวดังแสดงในรูปที่ 6 โดย OTA₁ ทำหน้าที่เป็นวงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง (Current Follower) ส่วน OTA₂ ต่อร่วมกับเอาต์พุตของ OTA₁ ทำหน้าที่เป็นวงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง (Current Comparator) เพื่อให้วงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น $G(w) = w - 0.3 \text{sgn}(w)$ ตามรูปที่ 3 ซึ่งสามารถทำได้โดยปรับกระแสไบอัสของ OTA₁ และ OTA₂ เท่ากับ I_b และ $0.3I_b$ ตามลำดับ สมการกระแสของวงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองรูปที่ 6 สามารถสรุปได้เป็น

$$I_{O1} = I_m \quad (10)$$

$$V_A = -V_{sat} \text{sgn}(I_m) \quad (11)$$

$$I_{O2} = -0.3I_b \text{sgn}(I_m) \quad (12)$$

$$I_{out} = I_m - 0.3I_b \text{sgn}(I_m) \quad (13)$$



รูปที่ 7 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบกระแสโดย OTA

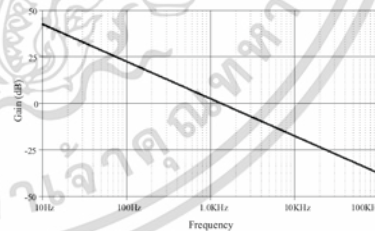
เมื่อนำวงจรถองรูปที่ 4-6 มาต่อร่วมกันตามบล็อกโตะแกรมของแบบจำลอง Jerk รูปที่ 1 จะได้เป็นวงจรถองกำเนิดสัญญาณที่สามารถปรับค่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ และ ค่าคงที่ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ และ เป็นอิสระต่อกัน โดยสัญญาณออสซิลเลชันที่เกิดขึ้นต่างๆ สามารถนำออกจากรหัสของ OTA₁, OTA₂ และ OTA₃

4. ผลการทดลอง

ในการอินทิเกรตการทำงานของวงจรถองที่มีสมการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการจำลองการดำเนินงานด้วย PSpice และ ผลการจำลองการเกิดปรากฏการณ์ Bifurcation ด้วย MATLAB

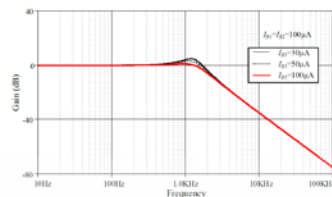
4.1 ผลการจำลองทางงาน PSpice

ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice มีผลการทดลอง 4 ส่วน วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง วงจรฟังก์ชันไม่เชิงเส้น และ วงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองโดย OTA ที่ใช้จะเป็นวงจรถอง CMOS-OTA หลายเอาต์พุตอย่างง่าย [10] โดยใช้แบบจำลอง TSMC 0.25μm และ แรงดันไฟเลี้ยง ±1.2V ส่วนกระแสไบอัส $I_b = 100\mu A$ ทุกตัว ยกเว้น OTA₁ กำหนดให้กระแสไบอัส $I_{b1} = 30\mu A$ ตัวเก็บประจุทุกตัวเท่ากับ 50nF รูปที่ 8 และ 9 แสดงผลการลอบส่องทางขนาดของ วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย และ วงจรถองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการตอบสนองทางความถี่จะมีค่าประมาณ 1kHz เท่ากันเนื่องจากใช้ ค่า C และ กระแสไบอัสเท่ากัน และ เมื่อสามารถปรับค่า $I_{b1} = I_b$ ดังจะพบว่าค่า Q (Quality factor) ของวงจรถองความถี่ต่ำผ่านจะมีค่าสูงขึ้นแต่ไม่กระทบต่อความถี่ตอบสนอง สอดคล้องกับทฤษฎีทุกประการ ส่วนรูปที่ 10 เป็นวงจรถองฟังก์ชัน Signum พบว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎีเป็นอย่างดี

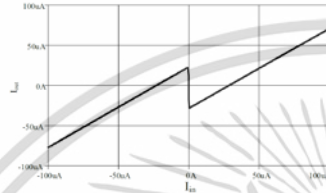


รูปที่ 8 ผลการตอบสนองของวงจรถองอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย

EL-11

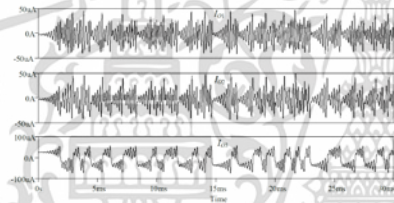


รูปที่ 9 ผลการตอบสนองของวงจรความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง

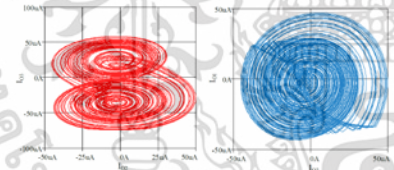


รูปที่ 10 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Signum

รูปที่ 11 และ 12 เป็นการจำลองการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ด้วยโปรแกรม PSpice รูปที่ 12 เป็นนิพจน์แสดงผล I_{o1} , I_{o2} , I_{o3} กับแกนเวลา และ ระนาบ x, y ของ I_{o2} , I_{o3} และ I_{o1} ตามลำดับ โดยปรับ $k=0.5$



รูปที่ 11 สัญญาณอลวน (Chaos) ที่ตำแหน่ง I_{o1} , I_{o2} และ I_{o3}

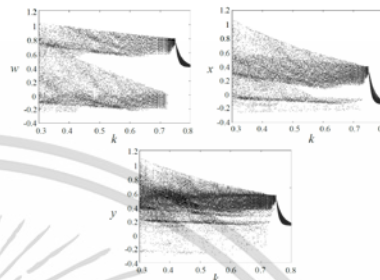


รูปที่ 12 ตัวดึงดูดอลวน (Chaos Attractor) ระนาบ I_{o2} , I_{o3} และ I_{o1}

4.2 ผลการทดลองทางาน Bifurcation

ในส่วนผลการทดลองเพื่อที่ดูการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ใช้สมการที่ (6) เป็นสมการ state ในรูปแบบ 3 มิติ (Dimension) นำมาเขียนกราฟช่วงทวีค่า (Doubling period) ได้ใน Bifurcation Diagram ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรสถานะทั้งสาม $(w_0, x_0, y_0) = (0.6, 0.3, 0)$ ตามลำดับ จากรูปที่ 13 เป็นการพล็อตตำแหน่ง w, x และ y เทียบกับแกนพารามิเตอร์ k โดยกำหนดค่าคงที่ $A=1$ และ $B=0.3$ จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่า ช่วง 0.8 ถึง 0.75 เป็นช่วงเริ่มต้น

ของเวลาที่เอาต์พุตเกิดการทวีค่า (Period doubling: period-2 cycle) และ เมื่อเกิดค่าที่ไม่ซ้ำกันในช่วงเวลา จากช่วง k มีค่าระหว่าง 0.7 ถึง 0.3 ซึ่งในช่วงนั้นเอง ระบบจะแสดงพฤติกรรมความอลวน (Chaos) ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 13 แผนภาพการแตกไปสองทาง (The Bifurcation diagram)

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) ใช้อุปกรณ์ไอทีเอช และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) โดยออกแบบด้วยแบบจำลอง Jerk ของ Sprott และ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum จากผลการทดลองด้วยโปรแกรม PSpice และ MATLAB แสดงให้เห็นว่า วงจรสามารถกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) ได้ และยืนยันผลด้วยแผนภาพการแตกไปสองทาง (Bifurcation diagram)

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. S. Ramos, "Introduction to Nonlinear Dynamics of Electronic Systems; Tutorial", *Nonlinear Dynamics* Vol.44, pp.3-14, 2006.
- [2] M. P. Kennedy, "Chaos in the Colpitts oscillator", *IEEE Trans. Circuit Syst.-I*, Vol.41, pp.771-774, 1994.
- [3] A. S. Elwakil, and M. P. Kennedy, "A Semi-Systematic Procedure for Producing Chaos from Sinusoidal Oscillators Using Diode-Inductor and FET-Capacitor Composites," *IEEE Trans. Circuit Syst.-I*, Vol.47, pp.582-590, 2000.
- [4] A. S. Elwakil, and A. M. Soliman, "Two twin-T based op amp oscillators modified for Chaos", *J. Franklin Inst.* Vol.335B, pp.771-787, 1998.
- [5] A. S. Elwakil, and A. M. Soliman, "Chaotic oscillators derived from sinusoidal oscillators based on the current feedback opamp," *Analog Integr Circuits Signal Process.*, Vol.24, pp.239-251, 2000.
- [6] J. C. Sprott, "Simple chaotic systems and circuits," *American J. Phys.* Vol.68, No.8, pp.758-763, 2000.
- [7] J. C. Sprott, "A New Class of Chaotic Circuit," *Physics Letters A*, vol. 266, pp.19-23, 2000.
- [8] B. Srisuchinwong, C.-H. Liou, and T. Klongkumnuankan, Prediction of Dominant Frequencies of CFOA-Based Sprott's Sinusoidal and Chaotic Oscillators, *World Scientific Publishing*, pp.331-337, 2009.
- [9] T. Siriburanon, B. Srisuchinwong, T. Nontapradit, Compound Structures of Six New Chaotic Attractors in a Solely-Single-Coefficient Jerk Model with Arctangent Nonlinearity, *Proc. of Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2010)*, Xuzhou, China, pp.985-990, 26-28 May, 2010.
- [10] E. Saising and P. Prommee, "Fully Tunable all-pass filter using OTA and its application," *Proc. of 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP2016)*, Vienna, Austria, 27-29 June 2016.

EL-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายคุณานนต์ กระจะวานิช

วัน เดือน ปีเกิด 5 เมษายน พ.ศ.2539 ที่จังหวัดนครสวรรค์

ที่อยู่ 401/11 หมู่บ้านกรุงไทย ซอย 5 ถนนสุขุมวิท ตำบลวังกระแจะ อำเภอเมืองตราด จังหวัดตราด 23000

Email khunanon.au@gmail.com

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมบัณฑิต

สาขาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2561

ผลงานวิจัย

- คุณานนต์ กระจะวานิช และ รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี “วงจรถ่ายทอดสัญญาณด้วยแบบจำลองการกระตุ้นรูปแบบกระแสโดยใช้ไอทีเอ” งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 43 ,โรงแรมท็อปแลนด์ จังหวัดพิษณุโลก, หน้า 486-489, 28-30 ตุลาคม, ปี 2563. (บทความตีพิมพ์)
- P. Pipat, K. Khunanon, K. Fabian and K. Tomasz, “Voltage-Mode Elliptic Band-Pass Filter Based on Multiple-Input Transconductor,” *IEEE Access*, vol.9, pp.32582-32590, Feb. 2021, doi:10.1109/ACCESS.2021.3060939