

วงจรถ้าเนตสัญญาณอลวนด้วยแบบจำลองการกระตุ้นทุนต่ำโดยใช้
ออปแอมป์และไมโครคอนโทรลเลอร์

**JERK-BASED LOW-COST CHAOTIC OSCILLATOR USING OPAMP AND
MICROCONTROLLER**



จิรัฏฐ์ ฉิมน้อย

JIRAT CHIMNOY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2568

KMITL-2025-EN-M-027-005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**JERK-BASED LOW-COST CHAOTIC OSCILLATOR USING OPAMP AND
MICROCONTROLLER**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2025
KMITL-2025-EN-M-027-005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2025
SCHOOL OF ENGINEERING
KINGMONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	JERK-BASED LOW-COST CHAOTIC OSCILLATOR USING OPAMP AND MICROCONTROLLER
Student	Mr.Jirat Chimnoy
Student ID	65016018
Degree	Master of Engineering
Program	ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
Year	2025
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pipat Prommee

ABSTRACT

This thesis presents a chaotic system based on a jerk chaotic system and low-cost. It uses a new type of non-linear function, the modified rectangular function. The proposed chaotic system is divided into two types, differing in non-linear function and signal generator circuit design. In the first chaotic system, a new non-linear function is used along with the basic non-linear function Signum has designed a signal generator circuit with an OPAMP and an RC device. The circuit design is based on a Tow-Thomas frequency filter. The form of the multi-scroll attractor can be adjusting the quality factor or the k parameter alone. 2, 4, and 6 scroll characteristic attractors can be created, and the maximum system complexity is $D_{KY}=2.52$. The second jerk chaotic system uses only one new non-linear function. Ready to design a circuit by applying the Arduino Mega 2560 together with a digital to analog converter circuit, which can quickly change the format of the output signal from the switch By showing results of 2, 3 and 4 scroll attractors with the highest system complexity value of $D_{KY} = 2.57$ along with analyzing and simulating mathematical results on MATLAB program as well as simulating circuit results on Proteus program to design a real circuit. For application in engineering, It was found that the actual test results and the math results were consistent in all respects.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำแนะนำ ซึ่งให้ทราบถึงจุดบกพร่องข้อผิดพลาดและแนวทางในการแก้ปัญหา ฝึกให้มีความคิดอย่างเป็นระบบเป็นแบบแผนที่ชัดเจนรวมไปจนถึงการแก้ปัญหาในชีวิต ค่อยติดตามการทำงานและให้คำปรึกษาไม่ขาดตกบกพร่อง ทั้งนี้ผู้เขียนจะขอนำสิ่งที่อาจารย์ที่ปรึกษาได้สั่งสอนไปปรับใช้กับการทำงาน การดำเนินชีวิตเพื่อให้เกิดประโยชน์กับส่วนรวมและตนเองให้มากที่สุด

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์สละเวลาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำเพื่อนำมาปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนคณาจารย์ในหลักสูตรวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่สั่งสอนวิชาความรู้ และประสบการณ์ต่างๆตั้งแต่ผู้เขียนศึกษาอยู่ในระดับชั้นปริญญาตรี

ขอกราบขอบพระคุณ นายโสภณวิชญ์ ฉิมน้อย (บิดา) นางณิชากร ฉิมน้อย (มารดา) ที่คอยอบรม เลี้ยงดูและสั่งสอนให้เป็นคนดี พร้อมทั้งสนับสนุนในด้านการศึกษาและค่าใช้จ่ายต่างๆ อย่างไม่มีข้อแม้ และขาดตกบกพร่อง และเป็นคอยเป็นกำลังใจยินดีกับความสำเร็จของผู้เขียนอยู่เบื้องหลัง

ขอขอบคุณสมาชิกห้องโปรเจค T-112 (T-108) ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่คอยให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ แลกเปลี่ยนความคิดเห็น รวมทั้งคอยเป็นกำลังใจและแรงผลักดันในการศึกษา โดยเฉพาะ นายคุณานนต์ คระระวานิช นักศึกษาปริญญาเอก ที่คอยดูแลให้คำแนะนำทั้งการเรียนและการใช้ชีวิตตลอดมา แม้ว่าจะมีภาระงานของตัวเองด้วยก็ตาม

สุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้อ่านหรือผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย หากมีความผิดพลาดแต่ประการใดกราบขออภัยมา ณ ที่นี้

จิรัฏฐ์ ฉิมน้อย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 หลักการใหม่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีอูลวน.....	5
2.2 การวิเคราะห์ผลทางเชิงตัวเลข.....	9
2.2.1 การแยกออกไปสองทิศทาง (bifurcation).....	10
2.2.2 เลขชี้กำลังLyapunov (Lyapunov Exponents : LE).....	16
2.2.3 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke (Kaplan-Yorke Dimension : D_{ky}).....	21
2.3 อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	22
2.3.1 ข้อมูลทางเทคนิค.....	23
2.3.2 หลักการสร้างสัญญาณอูลวน.....	26
2.4 การออกแบบวงจรรีเล็กทรอนิกส์.....	30
2.4.1 ออปเปอร์เรชั่น แอมพลิไฟร์ (Operation Amplifier : OPAMP).....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.4.2 วงจรที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
2.5 บทสรุป	40
บทที่ 3_งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
3.1 บทนำ	41
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันของ Rossler ด้วยอุปกรณ์ OPAMP	42
3.2.1 แบบจำลองออสซิลเลชันต้นแบบของระบบออสซิลเลชัน Rossler	42
3.2.2 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke ของระบบออสซิลเลชัน Rossler.....	44
3.2.3 การสร้างวงจรมีสัญญาณออสซิลเลชันของระบบออสซิลเลชัน Rossler	44
3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันการกระตุกด้วยฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Hyperbolic Sine ด้วย อุปกรณ์ OPAMP	47
3.3.1 แบบจำลองออสซิลเลชันต้นแบบของระบบการกระตุก	47
3.3.2 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke ของระบบการกระตุก	50
3.3.3 การสร้างวงจรมีสัญญาณออสซิลเลชันของระบบการกระตุก.....	51
3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน Sprott N ด้วย FPAA	53
3.4.1 แบบจำลองออสซิลเลชันต้นแบบของระบบ Sprott N.....	53
3.4.2 การปรับขนาดสัญญาณให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ FPAA ของระบบ Sprott N ..	54
3.4.3 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke ของระบบ Sprott N	56
3.4.4 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันของระบบ Sprott N	57
3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน Chua ด้วย FPGA	59
3.5.1 แบบจำลองออสซิลเลชันต้นแบบของระบบ Chua.....	59
3.5.2 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke ของระบบ Chua	65

สารบัญ(ต่อ)

3.5.3 วงจรกำเนิดสัญญาณของระบบ Chua	65
3.6 บทสรุป	67
บทที่ 4 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยระบบอลวนการกระตุกรูปแบบใหม่ โดยออปแอมป์และอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	68
4.1 บทนำ	68
4.2 ระบบอลวนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	68
4.3 ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	70
4.4 การสร้างวงจรมกำเนิดสัญญาณอลวนการกระตุกรูปแบบใหม่	72
4.4.1 การสร้างวงจรมกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยออปแอมป์	72
4.4.2 การสร้างวงจรมกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์	75
4.5 ผลการทดสอบระบบอลวนที่นำเสนอ	76
4.5.1 ระบบอลวนที่นำเสนอรูปแบบที่ 1	77
4.5.2 ระบบอลวนที่นำเสนอรูปแบบที่ 2	88
4.6 บทสรุป.....	104
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	105
5.1 บทสรุป.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	107
เอกสารอ้างอิง	107
ภาคผนวก	112
ภาคผนวก ก. โปรแกรมจำลองผลตัวดึงดูด (Attractor) สำหรับโปรแกรม MATLAB	113
ภาคผนวก ข. โปรแกรมจำลองการแยกออกไปสองทิศทาง (Bifurcation) สำหรับโปรแกรม MATLAB.....	114

สารบัญ(ต่อ)

ภาคผนวก ค. โปรแกรมจำลองเลขชี้กำลัง Lyapunov (Lyapunov Exponent) สำหรับโปรแกรม MATLAB.....	115
ภาคผนวก ง. โปรแกรมสำหรับบอร์ด Arduino เพื่อกำเนิดสัญญาณอลวน.....	117
ภาคผนวก จ. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ระหว่างศึกษา.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	133



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 พารามิเตอร์ของระบบที่นำเสนอ.....	4
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบระบบสมการแบบ Exponential และ Logistic.....	11
ตารางที่ 2.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ x ของสมการ Logistic.....	11
ตารางที่ 2.3 รูปแบบของสัญญาณเทียบกับพารามิเตอร์ r ที่เปลี่ยนแปลงไป.....	16
ตารางที่ 2.4 ผลกระทบจากพารามิเตอร์ ต่อค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov	20
ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์รูปแบบตัวดึงดูดจาก ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบลอว์นอันดับสาม.....	20
ตารางที่ 2.6 ค่า D_{KY} ของระบบลอว์นปีกผีเสื้อจากการปรับค่าพารามิเตอร์แบบต่างๆ.....	22
ตารางที่ 2.7 ข้อมูลทางเทคนิค ของ บอร์ด Arduino Mega 2560.....	23
ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบค่าจากการประมาณด้วยวิธีการออยเลอร์เมื่อปรับค่า h	26
ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างการคำนวณค่า ทั้ง 3 ส่วน.....	30
ตารางที่ 3.1 ตารางค่า RC ของวงจรกำเนิดสัญญาณลอว์นในรูปแบบที่ 3.4.....	46
ตารางที่ 3.2 สรุปจำนวนอุปกรณ์จากวงจรกำเนิดสัญญาณลอว์น.....	46
ตารางที่ 3.3 ตารางค่า RC ของวงจรกำเนิดสัญญาณลอว์น ในรูปที่ 3.5.....	52
ตารางที่ 3.4 สรุปจำนวนอุปกรณ์จากวงจรกำเนิดสัญญาณลอว์น.....	53
ตารางที่ 3.5 การตั้งค่าเฉพาะของแต่ละบล็อกของระบบ Sprott N.....	57
ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละรูปแบบของ ระบบลอว์นของ Chua.....	62

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ 4.1 ค่าส่วนประกอบ RC ของวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันหลัก.....	74
ตารางที่ 4.2 ค่าส่วนประกอบ RC ของวงจรถูกซิงโครไนซ์ไม่เป็นเชิงเส้นตัดแปลงสี่เหลี่ยม($G(x)$).....	74
ตารางที่ 4.3 ค่าส่วนประกอบ RC ของวงจรถูกซิงโครไนซ์ไม่เป็นเชิงเส้น $\text{Signum}(G(y))$	74
ตารางที่ 4.4 อุปกรณ์ส่วนประกอบของวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันรูปแบบใหม่ที่น่าสนใจ	75
ตารางที่ 4.5 ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบที่ 1.....	82
ตารางที่ 4.6 ค่าการคาดเดาของ Kaplan และ Yorke (D_{KY}) ของระบบรูปแบบที่ 1.....	83
ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ของตัวดึงดูดแต่ละลักษณะของระบบที่ 2	88
ตารางที่ 4.8 ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบรูปแบบที่ 2	96
ตารางที่ 4.9 ค่าการคาดเดาของ Kaplan และ Yorke (D_{KY}) ของระบบรูปแบบที่ 2.....	96
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันรูปแบบที่ 1 ด้วยอุปกรณ์ออปแอมป์.....	106
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะของวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันรูปแบบที่ 2 ด้วยอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้.....	106

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	ปรากฏการณ์ Butterfly Effect.....	6
รูปที่ 2.2	การเปรียบเทียบเอาต์พุตบนแกนเวลาของสมการ Logistic จากการปรับค่าพารามิเตอร์ r	7
รูปที่ 2.3	เปรียบเทียบลักษณะของคลื่นทั้ง 3 รูปแบบ	8
รูปที่ 2.4	ตัวดึงดูรูปแบบต่างๆ	9
รูปที่ 2.5	การแยกไปสองทิศทางของสมการ Logistic.....	10
รูปที่ 2.6	เอาต์พุตของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ $r=2$	13
รูปที่ 2.7	เอาต์พุตของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ $r=3.2$	13
รูปที่ 2.8	เอาต์พุตของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ $r=3.52$	14
รูปที่ 2.9	เอาต์พุตของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ $r=3.55$	14
รูปที่ 2.10	เอาต์พุตของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ (ก) $r=3.58$, (ข) $r=4$	15
รูปที่ 2.11	แผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางของระบบปิกดีสี่อ โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ β	19
รูปที่ 2.12	เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบ ปิกดีสี่อ.....	19
รูปที่ 2.13	Arduino Mega2650 Pinout	24
รูปที่ 2.14	การเปรียบเทียบค่าก่อนและหลังการปรับช่วงการทำงาน.....	27
รูปที่ 2.15	ลำดับการทำงานของการสร้างสัญญาณอลวนจากอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	28
รูปที่ 2.16	การสื่อสารแบบขนาน	29
รูปที่ 2.17	การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก แบบ 8 บิต.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์ออปแอมป์	31
รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลออปแอมป์.....	31
รูปที่ 2.20 ขอบเขตช่วงการทำงานของออปแอมป์	32
รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์วงจรกิจจรอินทิเกรเตอร์	33
รูปที่ 2.22 การตอบสนองความถี่ของวงจรกิจจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย	33
รูปที่ 2.23 วงจรกิจจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย	34
รูปที่ 2.24 การตอบสนองความถี่ของวงจรกิจจรอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย	35
รูปที่ 2.25 วงจรกิจจรอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย.....	35
รูปที่ 2.26 สัญลักษณ์วงจรกิจจรขยายแบบกลับเฟส	36
รูปที่ 2.27 วงจรกิจจรขยายแบบกลับเฟส	37
รูปที่ 2.28 สัญลักษณ์วงจรกิจจรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	37
รูปที่ 2.29 วงจรกิจจรขยายแบบไม่กลับเฟส	38
รูปที่ 2.30 สัญลักษณ์วงจรกิจจรบวก.....	38
รูปที่ 2.31 วงจรกิจจรบวก	39
รูปที่ 3.1 สัญลักษณ์เอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบ Rossler.....	43
รูปที่ 3.2 เอาต์พุตตัวตั้งจุดของระบบ Rossler.....	43
รูปที่ 3.3 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบ Rossler	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 3.4	วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันของระบบ Rossler	45
รูปที่ 3.5	บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองการกระตุก (Jerk Model)	48
รูปที่ 3.6	สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบการกระตุกแบบใหม่	49
รูปที่ 3.7	เอาต์พุตตัวตั้งคูดของระบบออสซิลเลชันการกระตุกรูปแบบใหม่ที่มี 3 พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น.....	50
รูปที่ 3.8	เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบออสซิลเลชันการกระตุกแบบใหม่.....	50
รูปที่ 3.9	วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันการกระตุกรูปแบบใหม่ด้วยฟังก์ชันไม่เปิดเชิงเส้น sinh(x).....	51
รูปที่ 3.10	สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบ Sportt N	54
รูปที่ 3.11	สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาหลังการปรับขนาดของระบบ Sportt N	55
รูปที่ 3.12	เอาต์พุตตัวตั้งคูดของระบบออสซิลเลชัน Sportt N.....	56
รูปที่ 3.13	เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบออสซิลเลชัน Sportt N.....	57
รูปที่ 3.14	แผนภาพการออกแบวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน Sportt N บน FPA	58
รูปที่ 3.15	ลักษณะกราฟจากสมการไม่เป็นเชิงเส้นของ Chua	60
รูปที่ 3.16	วงจรถอง Leon Ong Chua.....	61
รูปที่ 3.17	การออกแบวงจรถอง Leon Ong Chua ด้วยออปแอมป์และตัวต้านทาน.....	61
รูปที่ 3.18	สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบ Chua's	64
รูปที่ 3.19	เอาต์พุตตัวตั้งคูดของระบบออสซิลเลชันการกระตุกรูปแบบใหม่ที่มี 3 พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น.....	64
รูปที่ 3.20	เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบออสซิลเลชัน Chua	65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 3.21 แผนภาพการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนของ Chua บน FPGA.....	66
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบอลวนการการตุกรูปแบบที่นำเสนอ.....	69
รูปที่ 4.2 ลักษณะของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่นำเสนอ.....	70
รูปที่ 4.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชัน Signum	71
รูปที่ 4.4 การปรับค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันตัดแปลงสี่เหลี่ยม.....	71
รูปที่ 4.5 วงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์	73
รูปที่ 4.6 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนหลักที่สามารถปรับค่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณได้	73
รูปที่ 4.7 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบเลือกรูปแบบได้จากอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	75
รูปที่ 4.8 แผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางของระบบที่นำเสนอรูปแบบที่	78
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกออกไปสองทิศทางและตั้งตึงดูดของระบบอลวนรูปแบบที่ ...	79
รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาต์พุตจากการปรับค่าพารามิเตอร์.....	80
รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบอลวนรูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วน.....	80
รูปที่ 4.12 เอาต์พุตตัวตึงดูด 6 วงม้วน ของระบบอลวนรูปแบบที่ 1	81
รูปที่ 4.13 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบอลวนรูปแบบที่ 1.....	82
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบใหม่ด้วยออปแอมป์ จากโปรแกรม Proteus	84
รูปที่ 4.15 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วนจากโปรแกรม.....	84

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.16 เอาดต์พุดตัวตั้งคูดของระบบรูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus	85
รูปที่ 4.17 วงจร PCB กำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบจากออปแอมป์	86
รูปที่ 4.18 สัญญาณเอาต์พุดของวงจรถริงจากการปรับค่าพารามิเตอร์ k	87
รูปที่ 4.19 สัญญาณเอาต์พุด x , y และ z บนแกนเวลาของระบบรูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วน จากวงจร	87
รูปที่ 4.20 เอาดต์พุดตัวตั้งคูดของระบบรูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วน จากวงจรถริง	88
รูปที่ 4.22 สัญญาณเอาต์พุดบนแกนเวลาของระบบอลวนรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน.....	90
รูปที่ 4.23 เอาดต์พุดตัวตั้งคูด 2 วงม้วน ของระบบอลวนรูปแบบที่ 2	91
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกออกไปสองทิศทางและตั้งตั้งคูดแบบ 3 วงม้วน ของระบบอลวนรูปแบบที่ 2	91
รูปที่ 4.25 สัญญาณเอาต์พุดบนแกนเวลาของระบบอลวนรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน.....	92
รูปที่ 4.26 เอาดต์พุดตัวตั้งคูด 3 วงม้วน ของระบบอลวนรูปแบบที่ 2.....	93
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกออกไปสองทิศทางและตั้งตั้งคูดแบบ 2 วงม้วน ของระบบอลวนรูปแบบที่ 2.....	93
รูปที่ 4.28 สัญญาณเอาต์พุดบนแกนเวลาของระบบอลวนรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 4 วงม้วน.....	94
รูปที่ 4.29 เอาดต์พุดตัวตั้งคูด 4 วงม้วน ของระบบอลวนรูปแบบที่ 2.....	95
รูปที่ 4.30 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบอลวนรูปแบบที่ 2	95
รูปที่ 4.31 สัญญาณเอาต์พุด x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus	97
รูปที่ 4.32 เอาดต์พุดตัวตั้งคูดของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus	97

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.33 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus	98
รูปที่ 4.34 เอาต์พุตตัวตั้งคูดของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus.....	98
รูปที่ 4.35 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 4 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus	99
รูปที่ 4.36 เอาต์พุตตัวตั้งคูดของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus.....	99
รูปที่ 4.37 วงจรกำเนิดสัญญาณอลานด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์	100
รูปที่ 4.38 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน จากวงจรจริง.....	101
รูปที่ 4.39 เอาต์พุตตัวตั้งคูดของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน จากวงจรจริง.....	101
รูปที่ 4.40 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากวงจรจริง.....	102
รูปที่ 4.41 เอาต์พุตตัวตั้งคูดของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากวงจรจริง.....	102
รูปที่ 4.42 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 4 วงม้วน จากวงจรจริง.....	103
รูปที่ 4.43 เอาต์พุตตัวตั้งคูดของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากวงจรจริง.....	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทฤษฎีความโกลาหล (Chaotic theory)[1] เป็นแนวคิดสำคัญในการวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของระบบอลวน (Chaotic system) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการศึกษาระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลารูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear dynamic)[2-3] มีความยืดหยุ่น ไม่สามารถคาดเดาได้ยุคของระบบอลวนได้เริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ. 1963 Edward Norton Lorenz [4] ได้คิดค้นระบบอลวน คือ Lorenz model หรือที่รู้จักกันในชื่อโมเดลปีกผีเสื้อ (Butterfly model) เป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสาม ซึ่งเป็นระบบอลวนระบบแรกของโลกซึ่งสามารถอธิบายทฤษฎีปีกผีเสื้อ (Butterfly effect) ซึ่งเป็นพฤติกรรมสำคัญของระบบอลวนที่อ่อนไหวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น (Sensitive to initial condition)[5] กับคำที่กล่าวว่าเด็ดดอกไม้สะเทือนดวงดาว หรือ การกระทำสิ่งเล็กๆแต่เมื่อเวลาผ่านไปก็ส่งผลกระทบอย่างทวีคูณ[6]

การค้นระบบอลวนของ Edward Norton Lorenz เกิดขึ้นโดยความบังเอิญ ในวันหนึ่งเขาได้ทำการพยากรอากาศเหมือนกับที่ทำในทุกๆวัน แต่ในรอบนี้เขาได้ทำการปัดทศนิยมของชุดตัวเลขที่ใช้ในการพยากรอากาศ จาก 0.506127 เป็น 0.506 ซึ่งแตกต่างกันเพียง 0.000127 เมื่อเวลาผ่านไปผลที่ได้จากการคำนวณก็แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง[2] เป็นการค้นพบระบบอลวนระบบแรกและพฤติกรรมสำคัญของระบบอลวนโดยบังเอิญแต่ก็ทำให้วงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมต้องสั่นสะเทือน หลังจากการนั้นก็มีการออกแบบระบบอลวนรูปแบบต่างๆ อีกมากมาย อาทิ เช่น ระบบ Rossler[7] ที่พัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการลดจำนวนพารามิเตอร์ และพจน์ตัวแปรของสมการ ระบบ jerk[8] ที่เป็นที่นิยมใช้การทำมาพัฒนาโดยการเปลี่ยนรูปแบบของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น เป็นระบบที่ง่ายต่อการทำมาพัฒนาต่อ ระบบของ Leon Ong Chua[9] เป็นระบบแรกที่มีการสร้างวงจรรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อยืนยันผลในทางปฏิบัติ หลังจาก Leon Ong Chua เป็นผู้ริเริ่มการนำวงจรรอิเล็กทรอนิกส์มาใช้สร้างสัญญาณอลวนก็มีนักวิจัยจำนวนมากทำการออกแบบสร้างวงจรรกำเนิดสัญญาณอลวนในรูปแบบต่างๆอีกมากมาย

ในช่วงเวลาที่ผ่านมามีพฤติกรรมอลวนได้รับความสนใจอย่างมากในหมู่นักวิจัยทั้งในด้านการออกแบบระบบในรูปแบบต่างๆ และการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อาทิเช่น การนำประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์เศรษฐกิจ[10] การควบคุมทิศทางการเดินของหุ่นยนต์สำรวจ[11] ไปจนถึงการทำไปประยุกต์ใช้ในการสื่อสารแบบเข้ารหัส[12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม ระบบอลวนที่นำเสนอในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดหลายประการ โดยเฉพาะในด้าน ความซับซ้อนของระบบที่ไม่สูงมากนัก ทำให้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำและความซับซ้อนสูง เช่น การสื่อสารแบบเข้ารหัสหรือการควบคุมระบบอัตโนมัติ อาจไม่สามารถให้ประสิทธิภาพที่เพียงพอได้ นอกจากนี้ การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างสัญญาณอลวนยังพบปัญหาสำคัญ ได้แก่ ความยากในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ เนื่องจากความคาดเคลื่อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และความผิดพลาดของมนุษย์ ทำให้การตั้งค่าให้ตรงตามทฤษฎีเป็นไปได้ยาก และ ข้อจำกัดของอุปกรณ์พื้นฐานอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ได้มีการนำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้ (Programmable Devices) ซึ่งช่วยลดความผิดพลาดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และความผิดพลาดของมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์เหล่านี้มีราคาสูงและมีความซับซ้อนในการออกแบบ ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการต้นทุนต่ำ

จากปัญหาข้างต้น จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาระบบอลวนรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนสูงขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการในการประยุกต์ใช้ที่หลากหลายและซับซ้อนมากขึ้น โดยยังคงรักษาต้นทุนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงมุ่งนำเสนอระบบอลวนรูปแบบใหม่ที่พัฒนาบนพื้นฐานของแบบจำลองการกระตุก (Jerk Model) ซึ่งเป็นระบบอลวนที่มีอยู่เดิม โดยเพิ่มความซับซ้อนของระบบให้สูงขึ้นผ่านการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นจากเดิมที่มี 1 พจน์ เป็น 2 พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอระบบอลวนที่แตกต่างการ 2 รูปแบบที่แตกต่างกันจากการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น พร้อมทั้งออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ 2 รูปแบบ โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สามารถตั้งค่าได้ ออปแอมป์ (Op-Amp) และรูปแบบที่ 2 นำอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้ที่มีราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาดมาประยุกต์ใช้ เพื่อแก้ปัญหาก็กล่าวมาข้างต้น เพื่อเป็นตัวเลือกในการทำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมต่างๆที่เหมาะสมต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ในการออกแบบและสร้างระบบอลวนรูปแบบใหม่ พร้อมทั้งออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน โดยมีพื้นฐานจากระบบอลวนการกระตุกของ Julien Clinton Sprott กับฟังก์ชันสัญญาณแบบดัดแปลง (Modified Signum) และฟังก์ชันรูปแบบใหม่ที่ดัดแปลงจากฟังก์ชันสี่เหลี่ยม มีการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน 2 รูปแบบ ในรูปแบบแรกมีการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ออปแอมป์ LF347 ร่วมกับสวิตช์ 54HC4066 ในรูปแบบแรกระบบที่ออกแบบสามารถกำเนิดสัญญาณได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ (k) เพียงหนึ่งค่า และสามารถกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบทวงม้วนได้ รูปแบบต่อมาเป็นการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนโดยใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino mega 2560 ร่วมกับวงจร Digital to analog

converter(DAC) ในการแสดงผลเอาต์พุตตัวตึงดูต ในการออกแบบทั้งสองรูปแบบมีการทดสอบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Proteus ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ร่วมกับวงจรที่นำเสนอ พร้อมทั้งยืนยันผลการกำเนิดสัญญาณจากโปรแกรม MATLAB เพื่อให้ผลทั้งทางทฤษฎีและผลทางวงจรเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

1.3 หลักการใหม่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

1.3.1 ออกแบบระบบอลวนจากโครงสร้างแบบจำลองการกระตุ้น รูปแบบใหม่ 2 ระบบที่แตกต่างกัน

1.3.2 ออกแบบลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นรูปแบบใหม่ที่ดัดแปลงจากฟังก์ชันสี่เหลี่ยม

1.3.3 สร้างสัญญาณอลวนรูปแบบใหม่หลายวงม้วนที่ไม่เคยมีการนำเสนอมาก่อนในอดีต

1.3.4 สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนจากโครงสร้างแบบจำลองการกระตุ้น ด้วยอุปกรณ์ออปแอมป์และอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการศึกษาการสร้างระบบอลวนรูปแบบใหม่บนพื้นฐานของระบบอลวนการกระตุ้นที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ ในด้านฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น และอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยระบบอลวนที่นำเสนอรูปแบบที่ 1 คือวงจรที่ออกแบบด้วยออปแอมป์และ อุปกรณ์ RC ประกอบไปด้วยออปแอมป์ 13 ตัว อนุภาคสวิตช์ 1 ตัว ตัวต้านทาน 21 ตัว และตัวเก็บประจุ 3 ตัว โดยวงจรสร้างปรับรูปแบบของตัวตึงดูตได้จาก โดยวงจรกำเนิดสัญญาณหลักออกแบบบนพื้นฐานของวงจรรองความถี่ Tow-Thomas ซึ่งสามารถปรับลักษณะของตัวตึงดูตแบบหลายวงม้วนได้จาก เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (Quality Factor) หรือพารามิเตอร์ k ของระบบ และรูปแบบที่ 2 เป็นการนำอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้ คือ อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ มาประยุกต์ใช้ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนต่อเข้ากับวงจร DAC (R2R Ladder) ขนาด 8 บิต และสวิตช์เพื่อปรับรูปแบบลักษณะตัวตึงดูตของระบบได้ โดยแสดงค่าการปรับพารามิเตอร์ของระบบทั้ง 2 รูปแบบเพื่อให้เกิดตัวตึงดูตแบบหลายวงม้วน ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1.1 พารามิเตอร์ของระบบที่นำเสนอ

ระบบ	ลักษณะตัวดึงดูด	พารามิเตอร์				
		A	B	C	D	k
รูปแบบที่ 1	2 วงม้วน	0.6	0.3	1	2	0.53
	4 วงม้วน					0.4
	6 วงม้วน					0.15
รูปแบบที่ 2	2 วงม้วน	0.5	1.5	0.5	1.5	0.35
	3 วงม้วน	2	1	2	1	0.35
	4 วงม้วน	3	2	1	2	0.16

1.5 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของงานวิจัย หลักการใหม่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ขอบเขตวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ ทฤษฎีพื้นฐานของระบบอลวน ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบอลวน คือทฤษฎีในการวิเคราะห์ช่วงพารามิเตอร์ของระบบ ทฤษฎีในการวิเคราะห์ความเป็นอลวนของระบบ ทฤษฎีวิเคราะห์ความซับซ้อนของระบบ ออกมาเป็นค่าเชิงตัวเลข คุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ และวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการออกแบบ

บทที่ 3 กล่าวถึง งานวิจัยในอดีตที่นำเสนอระบบอลวนและวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนจากอุปกรณ์ที่ไม่สามารถตั้งค่าได้ และอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการทดลองของระบบและวงจรถูกกำเนิดสัญญาณทั้ง 2 รูปแบบ โดยมีการทดลองโดยโปรแกรม MATLAB เป็นการทดสอบระบบอลวนวิเคราะห์ช่วงพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดสภาวะอลวนของระบบทั้ง 2 รูปแบบ และ Proteus ทดสอบผลการออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณทั้งรูปแบบออปแอมป์ และอุปกรณ์ไมโครคอนโทรล เพื่อเป็นแนวทางและเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณจริง และทำการสรุปผลการทดสอบที่พบ

บทที่ 5 กล่าวถึง บทสรุปและข้อเสนอแนะ ซึ่งประกอบไปด้วยบทสรุปของการศึกษาจวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะในการปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีความอลวน (Chaotic Theory) การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยทฤษฎีต่าง ๆ ส่วนต่อไปเป็นการแนะนำอุปกรณ์ ไมโครคอนโทรลเลอร์และหลักการที่นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างวงจรถ่ายสัญญาณ และส่วนสุดท้าย เป็นทฤษฎี หลักการ และคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างวงจรถ่ายสัญญาณความอลวน โดยทุกหัวข้อที่กล่าวมามีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยชิ้นนี้

2.1 ทฤษฎีอลวน

ทฤษฎีความอลวน (Chaotic Theory) เป็นสาขาหนึ่งของคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับ ระบบไดนามิกแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Systems) ทฤษฎีนี้ระบุว่าในระบบอลวน แม้สัญญาณจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณสุ่ม แต่ในความเป็นจริงแล้วระบบอลวนมีรูปแบบที่ชัดเจน และมีขอบเขตที่กำหนดได้ เมื่อเวลาผ่านไปถึงจุดหนึ่ง สัญญาณจะกลับมาที่ตำแหน่งเดิมเสมอ [1][2] ความอลวนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในหลายระดับ ตั้งแต่ระดับมหภาค เช่น จักรวาล ไปจนถึงระดับจุลภาค ยกตัวอย่างของระบบที่แสดงพฤติกรรมความอลวน ได้แก่ วงโคจรของอิเล็กตรอน การลุกไหม้ของไฟฟ้า การแบ่งตัวของเซลล์ และความผันผวนของราคาหุ้นในตลาด ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ความอลวนได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิจัย เนื่องจากเป็นสาขาวิชาการที่ค่อนข้างใหม่ในทางคณิตศาสตร์ และมีความเชื่อมโยงกับระบบไดนามิกแบบไม่เชิงเส้น โดยระบบอลวนจำเป็นต้องมีคุณสมบัติหลัก ๆ ดังนี้ [3][4]

ลักษณะและคุณสมบัติที่สำคัญ

- **ความไวต่อสถานะเริ่มต้น (Sensitive to initial condition)**

ในทฤษฎีความอลวน (Chaotic Theory) ความไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น[5] เป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นและสำคัญที่สุดของระบบอลวน การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ เมื่อเวลาผ่านไปจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของระบบในระยะยาว ปรากฏการณ์นี้รู้จักกันในชื่อ เอฟเฟกต์ผีเสื้อ (Butterfly Effect) [6][14]

เอฟเฟกต์ผีเสื้อ เป็นคำอธิบายที่ช่วยให้เข้าใจธรรมชาติอันซับซ้อนของระบบอลวน โดยคำนี้มีที่มาจากแนวคิดที่ว่า การกระพือปีกของผีเสื้อในที่หนึ่ง (เช่น ในบราซิล ทวีปอเมริกาใต้) อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในสภาพอากาศ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่จนอาจนำไปสู่การเกิดพายุทอร์นาโด ในอีกที่หนึ่ง (เช่น ในสหรัฐอเมริกา ทวีปอเมริกาเหนือ) แม้ว่าในทางปฏิบัติอาจดูเหมือนเป็นเรื่องที่ไม่น่า

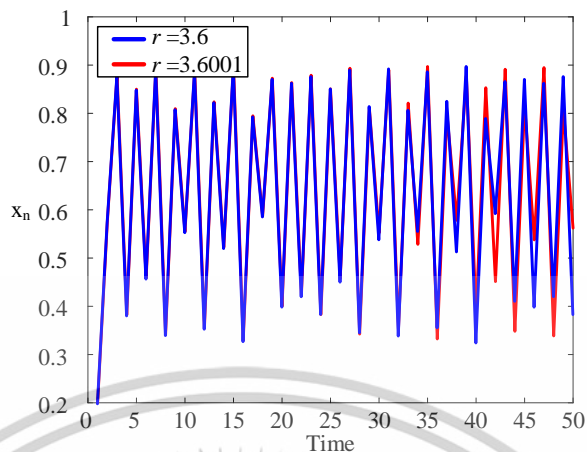
เป็นไปได้ที่การกระพือปีกของผีเสื้อจะส่งผลกระทบใหญ่หลวงเช่นนี้ แต่ปรากฏการณ์นี้ช่วยอธิบายถึงความอ่อนไหวและความไม่แน่นอนของระบบอลวนได้เป็นอย่างดี

ในทางทฤษฎีความอลวน เชื่อว่าในระบบไดนามิก การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในสภาวะเริ่มต้น จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ที่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบ โดยการพัฒนาของระบบจะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) และคาดเดาได้ยาก ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจึงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นอย่างมาก



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ Butterfly Effect

ในการศึกษาระบบอลวนจากทฤษฎีเอนโทรปีของผีเสื้อนั้น เรานิยามเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นค่าตัวแปรสถานะ (State Variable) เริ่มต้น ยกตัวอย่างระบบอลวนแบบอันดับ 2 จะมีตัวแปรสถานะ 2 ตัว คือ x และ y ในระบบอันดับ 3 จะมีตัวแปรสถานะ 3 ตัว คือ x , y , และ z ส่วนต่อมาก็คือพารามิเตอร์ควบคุมของระบบอลวน ซึ่งแต่ละระบบจะมีจำนวนพารามิเตอร์ควบคุมที่แตกต่างกันออกไป เพียงแค่ปรับค่าตัวแปรสถานะหรือพารามิเตอร์ควบคุมระบบตัวใดตัวหนึ่งเพียงเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไปถึงจุดหนึ่งเอาต์พุตของระบบจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างสิ้นเชิง ยกตัวอย่างสัญญาณเอาต์พุตจากสมการ Logistic Map [15-16] ซึ่งแสดงความแตกต่างของสัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาจากการปรับค่าพารามิเตอร์ r ดังแสดงในรูปที่ 2.2

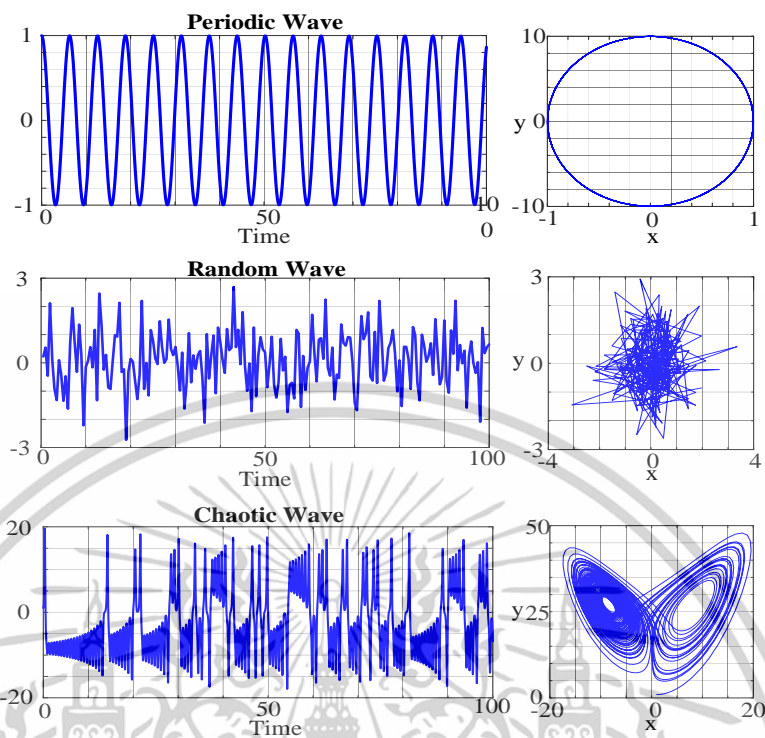


รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบเอาต์พุตบนแกนเวลาของสมการ Logistic จากการปรับค่าพารามิเตอร์ r

- **ไม่มีคาบการซ้ำ (non-periodic)**

การไม่มีคาบซ้ำเป็นคุณสมบัติหนึ่งของระบบอลวน [17] ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสัญญาณเอาต์พุตของระบบบนแกนเวลาที่จะแตกต่างจากสัญญาณที่มีคาบทั่วไป เช่น สัญญาณไซน์ (Sine), สัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle), และสัญญาณพัลส์ (Pulse) ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มสัญญาณที่มีคาบซ้ำ (Periodic)

จากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้ระบบอลวนเป็นระบบที่ไม่สามารถคาดเดาได้ หรือยากต่อการคาดเดา เนื่องจากระบบอลวนมีรูปแบบสัญญาณที่คล้ายกับสัญญาณแบบสุ่ม (Random) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่มีคาบซ้ำเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อสังเกตสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบการพล็อตสองมิติ หรือที่เรียกว่า ตัวดึงดูด (Attractor)[19] จะสังเกตเห็นถึงรูปแบบและขอบเขตของสัญญาณเอาต์พุตที่ชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากสัญญาณสุ่มที่มักมีความยุ่งเหยิงและไม่มีขอบเขตที่ชัดเจน ตัวอย่างสัญญาณเอาต์พุตของระบบอลวนแสดงดังรูปต่อไปนี้ [18]

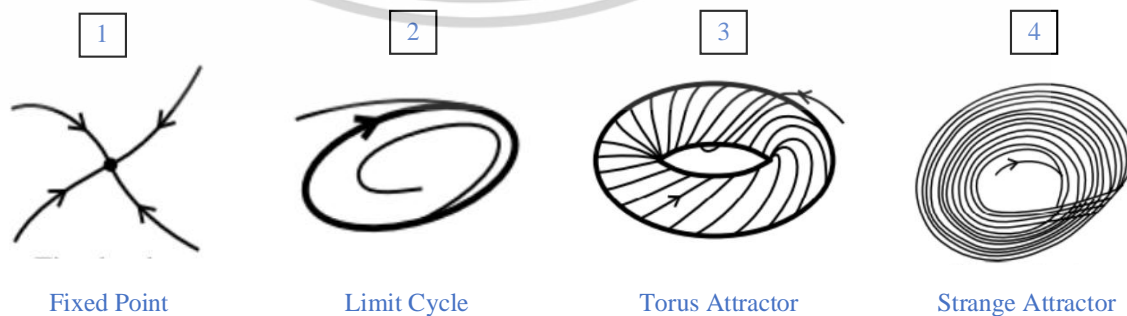


รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบลักษณะของคลื่นทั้ง 3 รูปแบบ

ประเภทของสัญญาณอลวน

ในการสร้างและออกแบบระบบอลวนรูปแบบใหม่ของงานวิจัยนี้ เป็นระบบที่มีสมการอนุพันธ์อันดับ 1 จำนวน 3 สมการ จึงทำให้มีสัญญาณเอาต์พุตทั้งหมด 3 สัญญาณ คือ x , y , และ z บนแกนเวลา ซึ่งในการศึกษาระบบอลวนนั้น สามารถตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ เอาต์พุตแบบตัวดึงดูด (Attractor)

ตัวดึงดูด คือ การนำค่าของสัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลามาพล็อตบนพื้นที่เฟส (Phase Space) [19] โดยต้องมีอย่างน้อย 2 มิติขึ้นไป หากระบบที่ศึกษามีสมการเป็นแบบ 2 หรือ 3 มิติ ตัวดึงดูดก็จะสามารถแสดงได้ในเชิงเรขาคณิตเป็นสองหรือสามมิติเช่นกัน ซึ่งตัวดึงดูดจะไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ระบบไดนามิก และสามารถแบ่งออกเป็นรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้ [20]



รูปที่ 2.4 ตัวดึงดูดรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัวดึงดูดแบบจุด (Point attractor) คือ สถานะที่ระบบเคลื่อนที่มาสู่จุดคงที่เสถียรจุดหนึ่งบนพื้นที่เฟส ตัวดึงดูดแบบจุดแสดงถึงสถานะคงที่และสมดุลของระบบ
2. ตัวดึงดูดแบบวงจำกัด (Limit cycle) คือ สถานะของระบบที่เคลื่อนที่ซ้ำโดยสมบูรณ์กลับมาสถานะจุดเดิมเสมอ มีคาบของสัญญาณบนแกนเวลาที่แน่นอน
3. ตัวดึงดูดแบบม้วน (Torus attractor) คือ สถานะที่พัฒนาจากตัวดึงดูดแบบวงจำกัด มีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าตัวดึงดูดแบบวงจำกัด มีรูปร่างคล้ายกับห่วงยาง
4. ตัวดึงดูดอลวน (Strange Attractor) คือ สถานะที่สนใจในการสร้างระบบอลวนรูปแบบใหม่ มีลักษณะของตัวดึงดูดที่มีรูปร่างผิดปกติแต่มีความเป็นระเบียบ ไม่เกิดขึ้นซ้ำเมื่อเวลาเปลี่ยนไปเป็นแต่มีขอบเขตและรูปร่างที่ชัดเจนบนพื้นที่เฟส

2.2 การวิเคราะห์ผลทางเชิงตัวเลข

ในการวิเคราะห์ผลระบบอลวนนั้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน หากอาศัยเพียงการวิเคราะห์จากสัญญาณเอาต์พุตเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่ออำนวยความสะดวกและเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ที่เป็นรูปธรรมมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยการสังเกตด้วยสายตาเพียงอย่างเดียว โดยทฤษฎีหลักที่นำมาใช้ประกอบด้วย 3 ทฤษฎี ได้แก่

1. ทฤษฎีการแยกสาขา (Bifurcation Theory)

ทฤษฎีนี้ใช้เพื่อวิเคราะห์ช่วงการเกิดความอลวนของระบบ โดยพิจารณาจากชุดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งแต่ละชุดพารามิเตอร์จะให้ช่วงการเกิดความอลวนที่แตกต่างกัน

2. เลขชี้กำลังลียาปูนอฟ (Lyapunov Exponents)

ทฤษฎีนี้ใช้ในการวิเคราะห์และวัดระดับความอลวนของระบบ โดยค่าของเลขชี้กำลังลียาปูนอฟสามารถบ่งชี้ถึงลักษณะของตัวดึงดูด (Attractor) ได้

3. การคาดการณ์ของคาปแลน-ยอร์ก (Kaplan-Yorke Dimension)

ทฤษฎีนี้ใช้ในการประเมินความซับซ้อนของระบบอลวนผ่านการคำนวณเชิงตัวเลข โดยอาศัยค่าของเลขชี้กำลังลียาปูนอฟ

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ดังกล่าวเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลขของระบบอลวนอย่างละเอียดต่อไป

2.2.1 การแยกออกไปสองทิศทาง (bifurcation)

ทฤษฎีการแยกออกไปสองทาง(Bifurcation Theory) [21] เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ช่วงพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดความอลวนในระบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear system) นั้นมีความแตกต่างจากระบบเชิงเส้น (Linear system) ของความสมมาตรในช่วงของค่าพารามิเตอร์บางค่าที่มีการแยกออกไปสองทิศทาง หรือการแตกแขนงเกิดขึ้นในส่วนของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของการแยกไปสองทางมีต้นกำเนิดจากงานของ Henri Poincaré เกี่ยวกับระบบสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น คำว่า Bifurcation ได้รับคำจำกัดความจาก Henri Poincaré เพื่อหาวิธีการแก้ปัญหาต่างๆจากปัญหาที่พบ เมื่อใดก็ตามที่การแก้มสมการ หรือระบบสมการมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ จนเกิดค่าวิกฤติ ค่าที่ปรากฏนี้เรียกว่าการแยกไปสองทาง จุดในพื้นที่พารามิเตอร์ที่มีเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นถูกกำหนดให้เป็นจุดแยกเป็นสองทาง ที่จุดที่เกิดสถานะแยกเป็นสองทางจะนำไปสู่ช่วงที่เกิดความผิดปกติและคาดเดาไม่ได้ของระบบไม่เป็นเชิงเส้นที่กำหนดได้ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าสภาวะอลวน ลักษณะเฉพาะของระบบไดนามิกแบบไม่เชิงเส้นคือความไวต่อสภาวะเริ่มต้นที่อธิบายไว้โดย Poincaré เพื่อความเข้าใจมากขึ้นจะขอยกตัวอย่างการแยกออกเป็นสองทิศทางในรูปแบบของ ระบบสมการ Logistic map [22] [24]ดังต่อไปนี้

$$x_{n+1} = rx_n(1-x_n) \quad (2.1)$$

ในการศึกษาแบบจำลองต่าง ๆ นั้นเพื่อที่ทราบแนวทางของผลในความเป็นจริงนั้นเป็นอย่างไรแบบจำลองทุกแบบจำลองนั้น เป็นค่าทางอุดมคติซึ่ง ไม่ได้นำข้อจำกัดต่างๆในความเป็นจริงมาคำนวณร่วมด้วย ยกตัวอย่าง แบบจำลองการเพิ่มจำนวนประชากรของแบคทีเรียในห้องทดลอง โดยใช้ฟังก์ชัน $f(x)=2x$ โดยที่ x หมายถึงจำนวนประชากรของแบคทีเรียในการเพาะเลี้ยงไรห้องปฏิบัติการ และ $f(x)$ หมายถึงประชากรในหนึ่งชั่วโมงต่อมา จะมีแบคทีเรียจำนวน $f(10000)=20000$ ตัว แต่ในความเป็นจริงนั้น ต้องคำนวณถึงสภาพแวดล้อมโดยรวม เมื่อถึงจุดหนึ่งทรัพยากรจะไม่เพียงพอต่อจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะมีผลต่ออัตราการเติบโตที่ช้าลงไม่เป็นไปตามฟังก์ชันในการคำนวณ แบบจำลองที่ได้รับการปรับปรุงเพื่อใช้สำหรับประชากรที่มีทรัพยากรอย่างจำกัด โดยจะได้ฟังก์ชัน คือ $g(x)=2x(1-x)$ เป็นฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้นและเป็นโมเดลหรือเรียกว่า แบบจำลองลอจิสติกส์

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบระบบสมการแบบ Exponential และ Logistic

n	$f(x)=2x$	$g(x)=2x(1-x)$
0	0.01	0.01
1	0.02	0.0198
2	0.04	0.038816
3	0.08	0.074618
4	0.16	0.138101
5	0.32	0.238058
6	0.64	0.362773
7	1.28	0.462338
8	2.56	0.497163
9	5.12	0.499984
10	10.24	0.5
11	20.48	0.5
12	40.96	0.5

จากตาราง 2.1 เห็นได้ชัดว่าสำหรับฟังก์ชัน $g(x)=2x(1-x)$ จะได้ประชากรเข้าใกล้ขนาดที่จำกัด ในที่สุดซึ่งเราจะเรียกว่าสภาวะคงตัวประชากร ประชากรคงที่ที่ $x=0.5$ และจากนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงอีก ที่แบบจำลองเอ็กซีโพเนนเชียลจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างทวีคูณขณะที่แบบจำลองลอจิสติกเข้าใกล้สถานะคงที่ จากฟังก์ชัน $g(x)=2x(1-x)$ เมื่อปรับค่า x จาก 0.1 ถึง 0.9 ตามตารางที่ 2.2

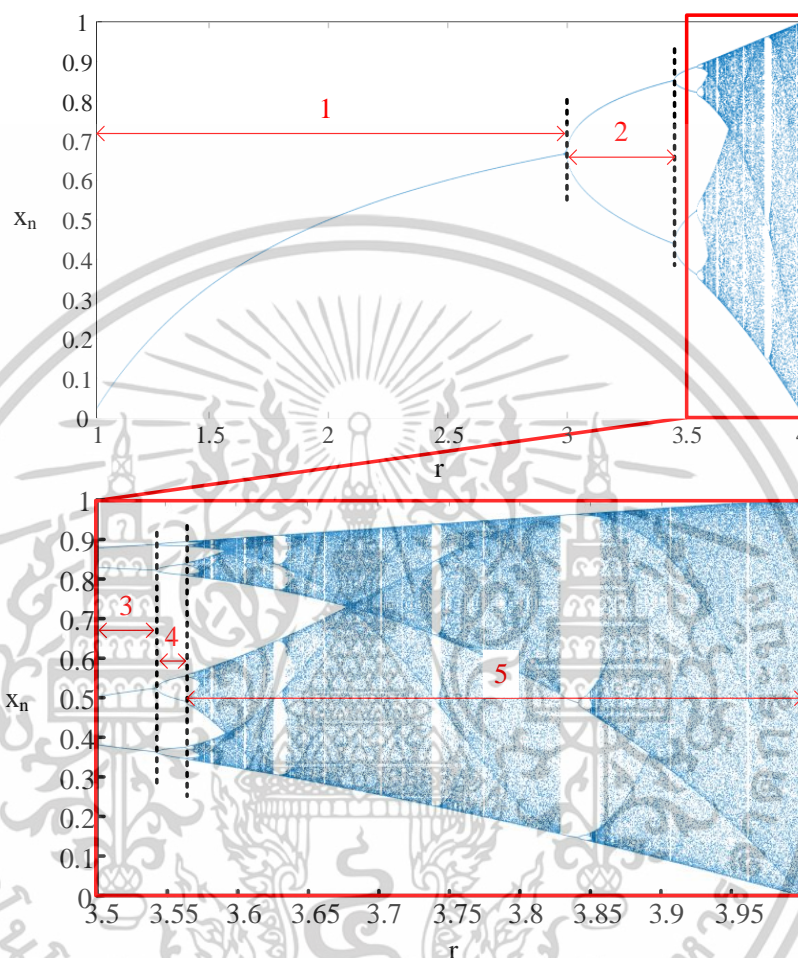
ตารางที่ 2.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ x ของสมการ Logistic

n	x								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.18	0.32	0.42	0.48	0.5	0.48	0.42	0.32	0.18
2	0.2952	0.4352	0.4872	0.4992	0.5	0.4992	0.4872	0.4352	0.2952
3	0.4161	0.4916	0.4996	0.4999	0.5	0.4999	0.4996	0.4916	0.4161
4	0.4859	0.4998	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4998	0.4859
5	0.4996	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4996
6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

จากตารางที่ 2.2 จะพบว่า จุดที่ ค่าเอาต์พุตและอินพุตมีค่าเท่ากันนั้นคือ จุดที่ $x=0.5$ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งมา จุด fixed point จากสมการ Logistic ที่กล่าวมาข้างต้น จากคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหมาะสมในการยกตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการแยกออกไปสองทิศทางโดยหาความเป็นไปได้ของ x_n จากการปรับค่าพารามิเตอร์ r จากสมการที่ แสดงดังรูปที่ 2.5

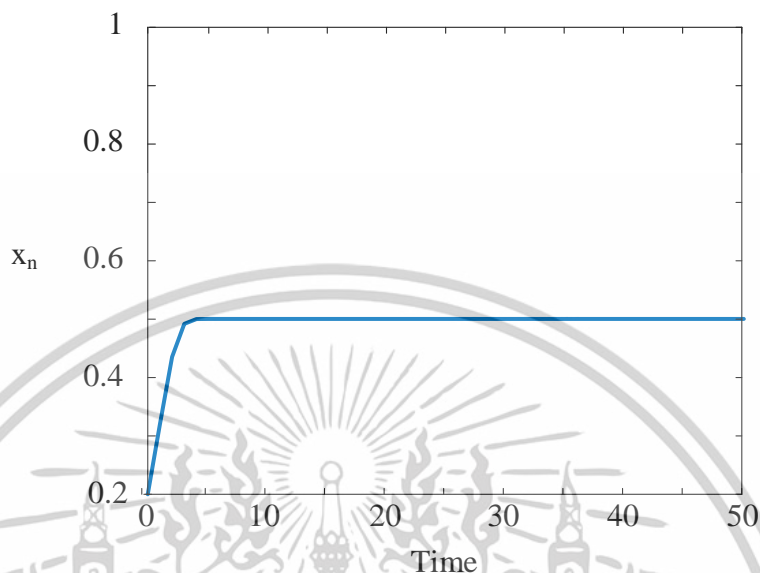


รูปที่ 2.5 การแยกไปสองทิศทางของสมการ Logistic

จากรูปการแยกไปสองทิศทางของสมการ Logistic ในรูปที่ 2.5 เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ r เริ่มต้นจากส่วนที่ 1 ไปจนถึงส่วนที่ 3 ในส่วนแรก เป็นช่วงที่มีความเสถียรของระบบ หรือที่เรียกว่า จุดคงที่ (Fixed Point) ส่วนที่สอง มีค่าพารามิเตอร์ r ประมาณ 3 จนถึง 3.45 เป็นช่วงที่เริ่มเกิดสภาวะวิกฤตของค่า x_n ที่เกิดการแยกออกเป็นสองทิศทางของ x_n ส่วนที่สามเป็นส่วนที่ต่อเนื่องจากส่วนที่สอง จากในส่วนที่สองที่เกิดการแยกออกไปสองค่าในส่วนนี้มีการแยกตัวเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากส่วนที่ 2 เป็น 4 ค่า ส่วนที่สี่ นั้นก็ยังมีลักษณะเช่นเดียวกันกับในส่วนที่ สองและสาม โดยมีการแยกตัวเพิ่มขึ้นอีก 2 เท่า เป็น 8 ค่า และในส่วนที่ห้า เป็นส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่ช่วงพารามิเตอร์ r ทำให้เกิดความไม่เสถียรของ

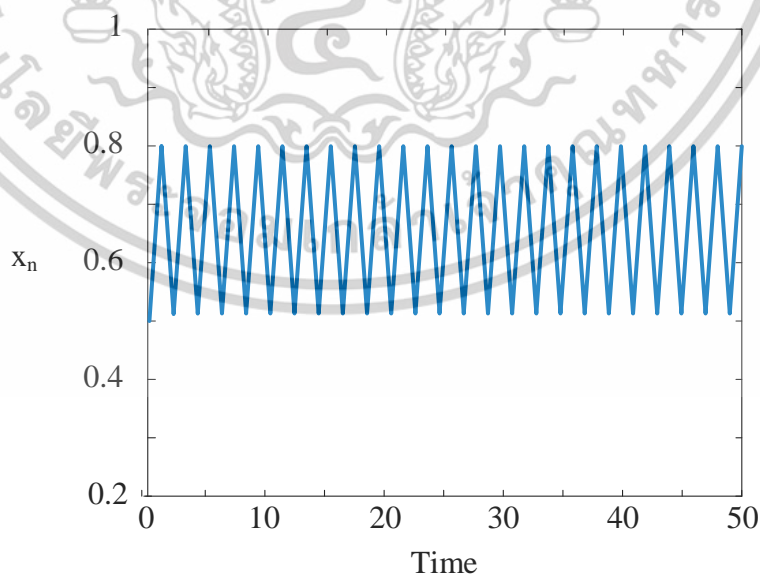
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบเป็นส่วนที่เกิดสภาวะอลวน ซึ่งเป็นส่วนที่ให้ความสนใจในงานวิจัยด้านระบบไดนามิกที่ไม่เป็นเชิงเส้น แสดงรูปเอาต์พุตของสัญญาณบนแกนเวลาเมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 เอาต์พุตของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ $r=2$

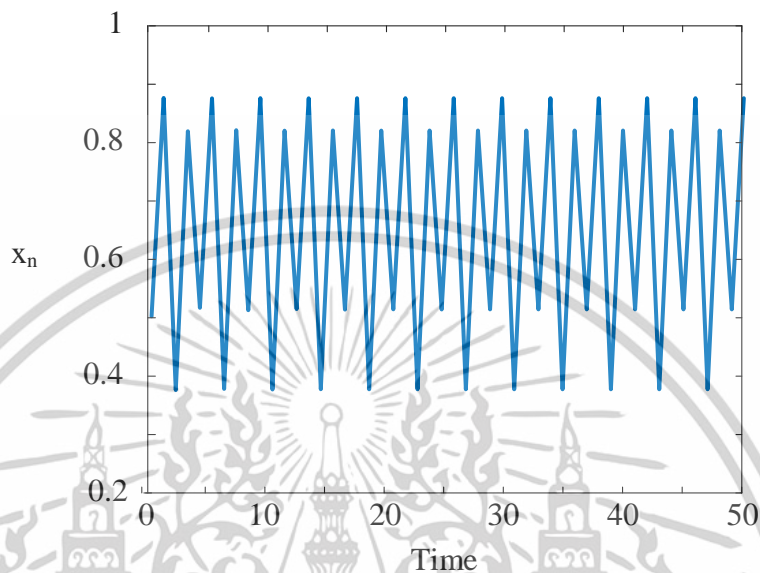
ในรูปนี้แสดงรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตในส่วนที่หนึ่งจากแผนภาพการแยกออกไปทิศทาง ในรูปที่ 2.6 เมื่อสังเกตแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางในส่วนที่หนึ่ง ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเสถียรไม่มีช่วงที่เกิดความวิกฤตหรือช่วงที่เกิดการแยกเป็นสองทิศทาง จึงเรียกว่าช่วง Fixed Point ซึ่งมีค่า x_n เพียง 1 ระดับ คือ 0.5



รูปที่ 2.7 เอาต์พุตของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ $r=3.2$

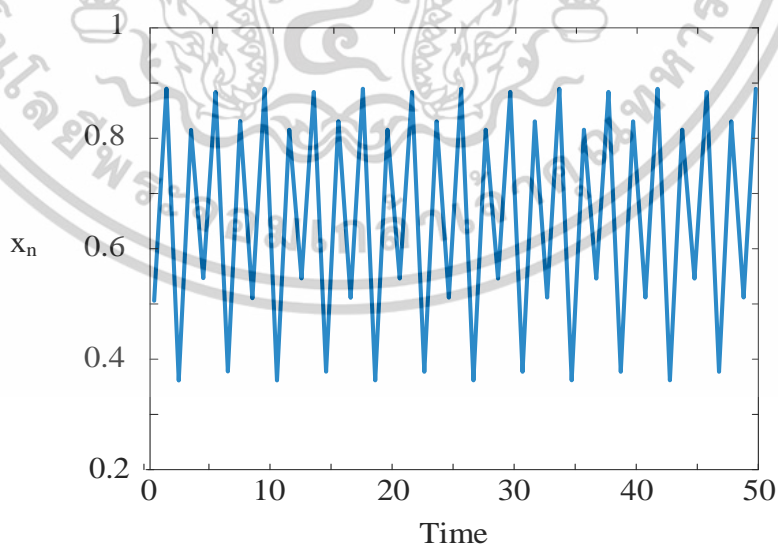
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนที่สองจากแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางเป็นส่วนที่มีจุดวิกฤตของพารามิเตอร์มีส่วนที่เกิดการแยกออกไปสองทิศทาง เรียกช่วงนี้ว่า วงโคจรจำกัด (Limit cycle) ในส่วนที่สองนี้ มีค่า x_n 2 ระดับ ประมาณ 0.8 และ 0.5



รูปที่ 2.8 เอต์พุตของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ $r=3.52$

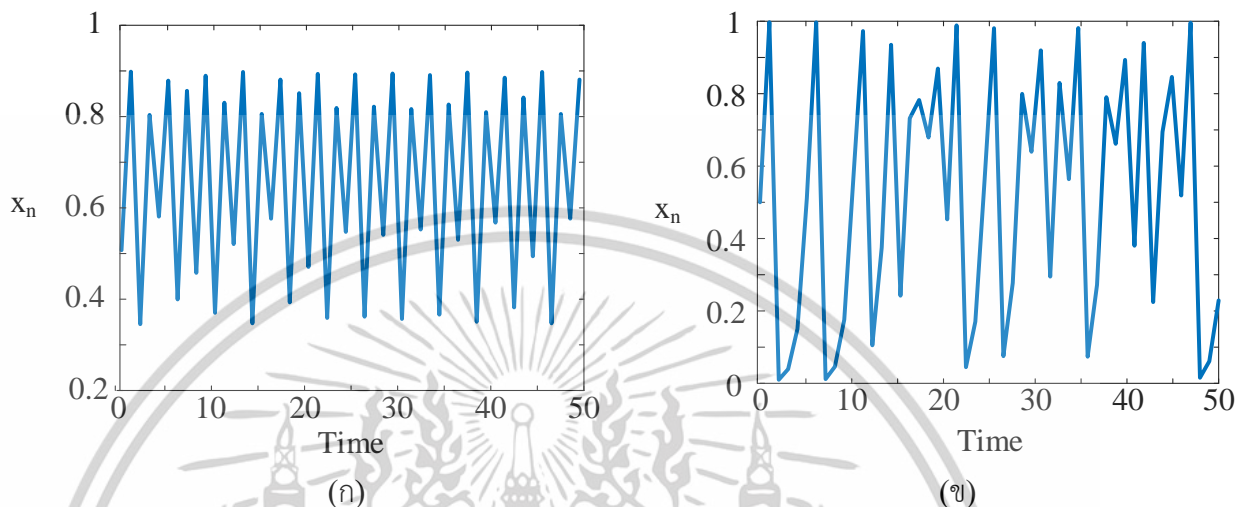
ส่วนที่สามจากแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางที่ต่อเนื่องจากส่วนที่สองที่มีการแยกออกของค่า x_n 2 ระดับ ในส่วนที่สาม จะมีการแตกแขนงเป็นสองทิศทางจากค่าเดิมของส่วนที่สอง ทำให้ ค่า x_n ในส่วนที่สาม มี 4 ระดับ คือ 0.88, 0.82, 0.51, 0.37



รูปที่ 2.9 เอต์พุตของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ $r=3.55$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนที่สี่จากแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางเป็นที่มีการแตกแขนงของค่าต่อจากส่วนที่ 3 ที่ค่าของ x_n มี 4 ระดับในส่วนนี้มีการแยกออกไปสองทิศทางเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า x_n ในส่วนนี้มีค่าทั้งหมดเป็น 8 ระดับ คือ 0.887, 0.881, 0.827, 0.812, 0.541, 0.505, 0.354 และ 0.370



รูปที่ 2.10 เอาดี้พุดของสมการ Logistic บนแกนเวลา ที่ (ก) $r=3.58$,(ข) $r=4$

ส่วนที่ห้า จากแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางที่แสดงในรูปที่ 2.5 เป็นส่วนที่ให้ความสนใจมากที่สุดในการศึกษาระบบ ไดนามิกที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นช่วงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้เกิดจุดวิกฤตที่ให้เอาต์พุตอยู่ในลักษณะอลวน ต่างจากส่วนอื่นก่อนหน้า โดยมีระดับสัญญาณเอาต์พุตหลายระดับและมีคุณสมบัติของระบบไดนามิกที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ไม่มีคาบซ้ำที่ชัดเจน ไม่สามารถคาดเดาลักษณะรูปแบบสัญญาณได้ล่วงหน้า ในรูปที่ 2.10 (ก) เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ค่าพารามิเตอร์ $r=3.58$ มีลักษณะแบบอลวนแบบเริ่มต้น ที่ยังมีความใกล้เคียงกับรูปแบบส่วนที่มีเอาต์พุตแบบวงโคจรจำกัด เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นของสภาวะอลวน ในรูปที่ 2.10 (ข) จะมีความแตกต่างของระดับเอาต์พุตสัญญาณอย่างชัดเจน ณ ค่าพารามิเตอร์ $r=4$ ในแผนภาพการแยกเป็นสองทิศทาง เป็นช่วงที่มีการแตกตัวของค่า x_n มากที่สุดนั้น บอกถึงช่วงที่มีความเป็นอลวนมากที่สุด จากแผนภาพการแยกไปสองทิศทางในส่วนที่ห้า นั้นจะสังเกตเห็นบริเวณที่มีช่องว่างหรือเรียกว่าจุด ควอไซน์ เป็นช่วงที่ไม่เกิดสภาวะอลวน ซึ่งถ้าไม่มีทฤษฎีการแยกไปสองทิศทางจะไม่สามารถทราบได้เลยว่าในระบบที่เราได้ทำการศึกษา มีช่วงของค่าพารามิเตอร์ช่วงไหนบ้างที่จะทำให้ระบบเกิดสภาวะอลวน นั้นจึงเป็นตัวช่วยที่สำคัญในการวิเคราะห์ระบบ จากรูปที่ 2.6 ถึงรูปที่ 2.10 สามารถสรุป ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป กับรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 รูปแบบของสัญญาณเทียบกับพารามิเตอร์ r ที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ r	รูปแบบ
2	Fixed point
3.2	Limit cycle (p=2)
3.52	Limit cycle (p=4)
3.55	Limit cycle (p=8)
3.58	Chaos (ขอบเขตแคบ)
4	Chaos (ขอบเขตกว้าง)

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงทฤษฎีการแยกออกไปสองทิศทาง และวิธีการวิเคราะห์ผลจากแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทาง ซึ่งเป็นหนึ่งในทฤษฎีที่สำคัญในการศึกษาและวิจัยระบบไดนามิกแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทฤษฎีที่เป็นตัวช่วยในการหาช่วงของพารามิเตอร์ ที่ก่อให้เกิดความอลวนของระบบ

2.2.2 เลขชี้กำลัง Lyapunov (Lyapunov Exponents : LE)

เลขชี้กำลัง Lyapunov ถูกคิดค้นโดย Aleksandr Lyapunov นักคณิตศาสตร์ชาวรัสเซีย ในปี ค.ศ. 1892 [23] เพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ระบบไดนามิกที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Dynamical Systems) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ระบบที่มีความซับซ้อนและความไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีความแตกต่างจากระบบเชิงเส้นทั่วไป เนื่องจากมีความละเอียดอ่อนและซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีเฉพาะทาง เช่น เลขชี้กำลัง Lyapunov ในการวิเคราะห์ การคำนวณเลขชี้กำลัง Lyapunov อาศัยการหาผลต่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสถานะเฉลี่ยของระบบในเวลาที่แตกต่างกัน ทฤษฎีการวัดนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบได้อย่างละเอียดและแม่นยำ โดยเลขชี้กำลัง Lyapunov มักถูกนำมาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ระบบที่มีความซับซ้อน ในหลายสาขาวิชา เช่น วิทยาศาสตร์ทางเคมี วิทยาศาสตร์ทางชีววิทยา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และ วิทยาศาสตร์ทางวัฒนธรรม [24], [25]

$$\lambda_j = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \ln |\Lambda_j^N| \quad (2.2)$$

โดย $|\Lambda_j^N|$ คือค่า Eigenvalues ของ เมทริกซ์ M ดังสมการต่อไปนี้

$$M = \prod_{n=1}^N J^n \quad (2.3)$$

โดย J^n คือ เมทริกซ์จาโคเบียน $n \times n$

เลขชี้กำลัง Lyapunov มีบทบาทสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของระบบไดนามิก โดยหากค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov มีค่าเป็นลบ ระบบจะมีความเสถียร และมีเอาต์พุตที่เป็นคาบ (Periodic) แต่หากค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov มีค่าเป็นบวก และผลรวมของเลขชี้กำลังมีค่าเป็นลบ ระบบจะแสดงพฤติกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Behavior) ยกตัวอย่างที่โดดเด่นของการคำนวณเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบลอเรนซ์ของ Edward Lorenz หรือที่รู้จักในชื่อ โมเดลปีกผีเสื้อ (Butterfly Model) [26] ซึ่งเป็นระบบสมการอนุพันธ์อันดับ 1 จำนวน 3 สมการ เช่นเดียวกับระบบลอเรนซ์รูปแบบใหม่ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sigma(y - x) \\ \dot{y} &= x(\rho - z) - y \\ \dot{z} &= xy - \beta z \end{aligned} \quad (2.4)$$

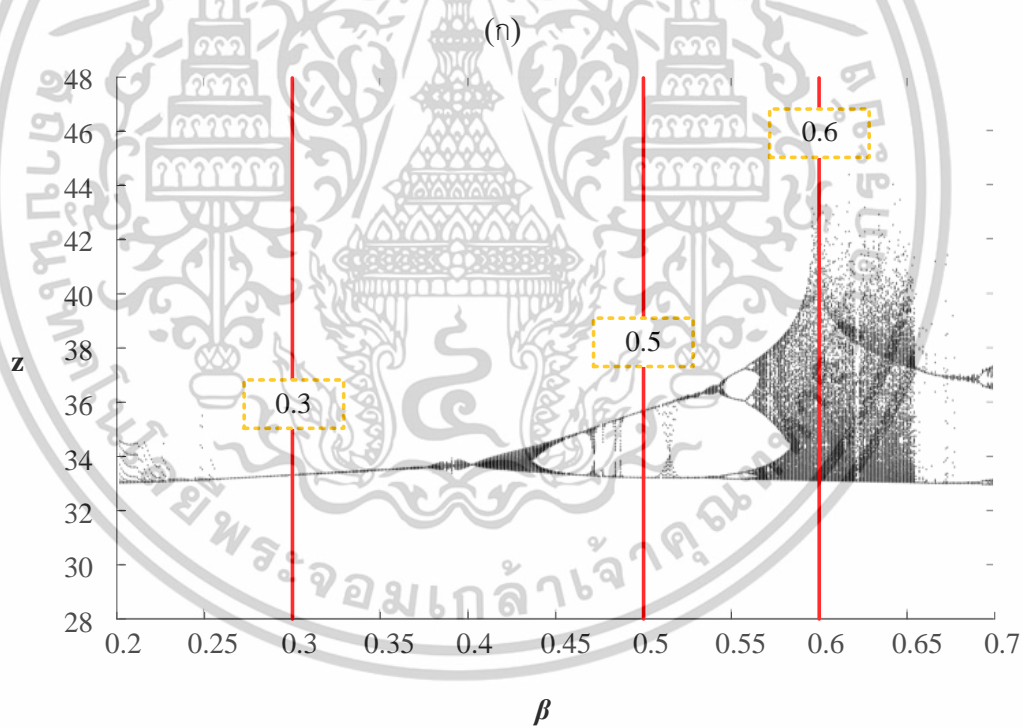
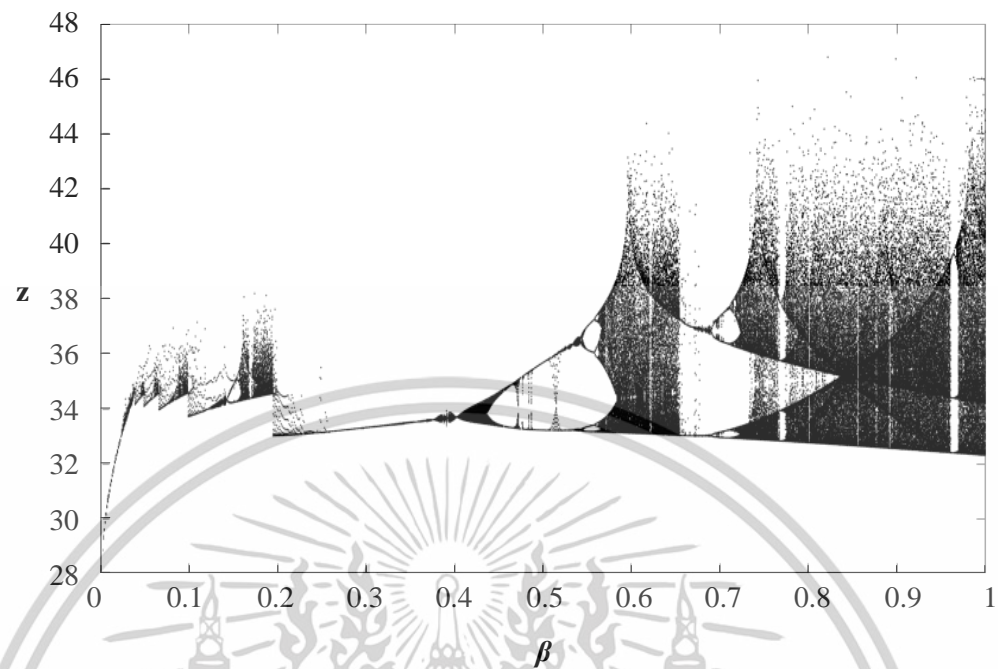
จากสมการที่ (2.4) กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $x_0=1, y_0=1, z_0=1$ และค่าพารามิเตอร์ $\sigma=10, \rho=28$ คงที่ จากนั้นทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ β ด้วยทฤษฎีการแยกออกไปสองทิศทาง ที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้า เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงลักษณะการแตกตัวของตัวแปรสแตต (State Variables) บนแนวแกนตั้ง เทียบกับค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ที่นำเสนอภายในหัวข้อนี้

จากแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทาง (Bifurcation Diagram) ของระบบปีกผีเสื้อ (Butterfly Model) ที่แสดงในรูปที่ 2.11 พบว่าในช่วงที่ตัวแปรสแตต (State Variables) มีการกระจายตัวมาก บ่งบอกถึงความไม่เสถียรของระบบ ซึ่งส่งผลให้ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov มีค่าเป็นบวกและเพิ่มขึ้นตามอัตราความแตกตัวของระบบ ในทางตรงกันข้าม ช่วงที่ระบบมีความเสถียร ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov จะมีค่าเป็นลบและลดลงตามอัตราความเสถียรของระบบ

การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ β ต่อระบบด้วยทฤษฎีการแยกออกไปสองทิศทาง ในหัวข้อที่ 2.2.2 แสดงให้เห็นความเชื่อมโยงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ β กับพฤติกรรมของระบบ โดยเฉพาะการกระจายตัวของตัวแปรสแตต (State Variables) และค่าของเลขชี้กำลัง Lyapunov ซึ่งช่วยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความไม่เสถียรและความเสถียรของระบบได้อย่างชัดเจน

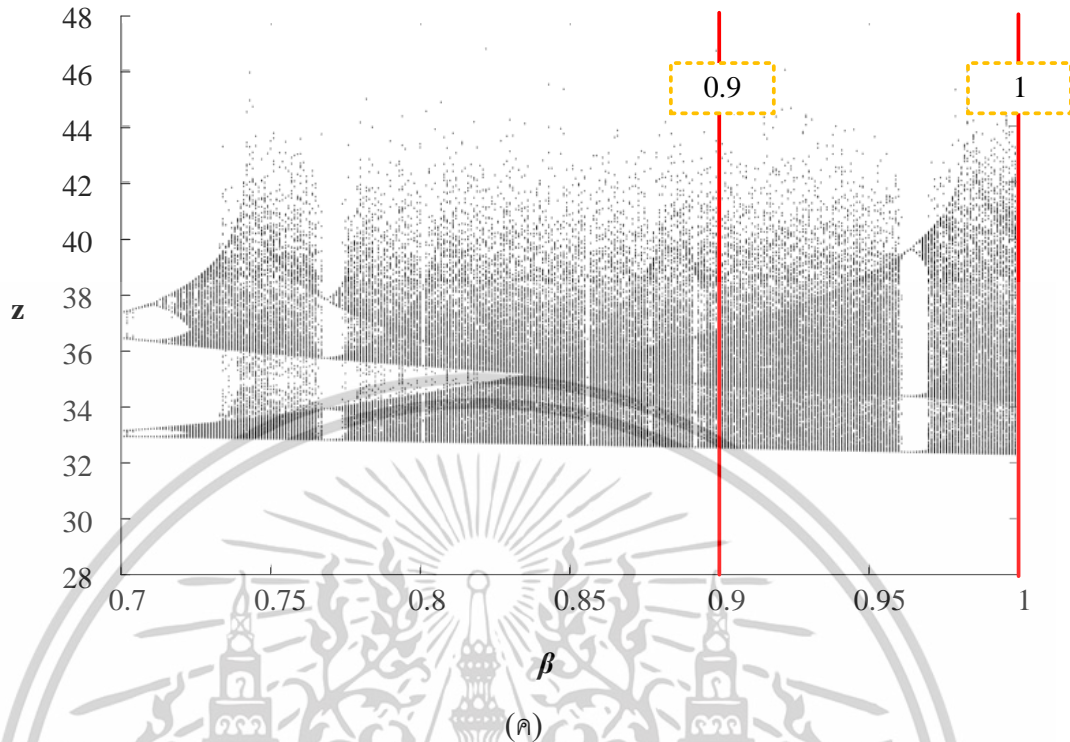
จากสมการหาค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ดังแสดงในสมการที่ (2.2)-(2.3) ที่นำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1892 ได้มีนักฟิสิกส์และนักเขียนชาวอเมริกันชื่อว่า Fred Alan Wolf [23] ได้นำสมการดังกล่าวมาสร้างเป็นอัลกอริทึม บนโปรแกรม Matlab และเปิดให้นักวิจัยหน้าใหม่ได้นำไปใช้กันอย่างไม่เสียค่าใช้จ่าย ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่สำคัญในการศึกษาระบบลอเรนซ์ โดยแสดงการใช้อัลกอริทึมหาค่าเลขชี้กำลัง

Lyapunov ของระบบที่ยกตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.12

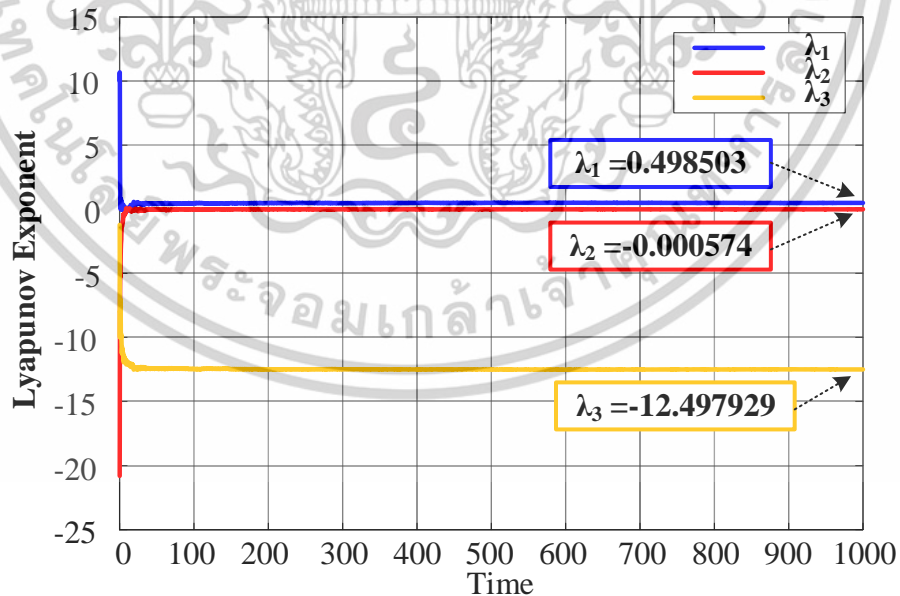


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางของระบบปีกผีเสื้อ โดยวิเคราะห์ พารามิเตอร์ β
 (ก) ช่วง β จาก 0 ถึง 1 (ข) รูปขยายแผนภาพการการแยกออกไปสองทิศทาง 0 ถึง 7
 (ค) รูปขยายแผนภาพการการแยกออกไปสองทิศทาง 0.7 ถึง 1



รูปที่ 2.12 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบ ปีกผีเสื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างแผนภาพของเลขชี้กำลัง Lyapunov Exponent ของระบบอันดับ 3 ในช่วงแรกจะเห็นถึงความไม่เสถียร ของค่ามีการแกว่งของค่า จึงยังไม่สามารถ นำค่าที่จุดนั้น มาใช้ในการวิเคราะห์ระบบได้ จึงต้องทำการวิเคราะห์ค่าซ้ำไปจนถึงจุดที่ค่าเกิดความเสถียร ในรูปที่ 2.12 มีการคำนวณค่า ทั้งหมด 1000 ครั้ง และนำค่า ณ จุดที่ 1000 มาใช้ในการวิเคราะห์ระบบต่อไป

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบจากพารามิเตอร์ ต่อค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov

n	ค่าพารามิเตอร์ β	รูปแบบ	Lyapunov exponent
1	0.3	Limit cycle (p=2) (0,-,-)	$\lambda_1 = 0.000879$ (0) $\lambda_2 = -0.345727$ (-) $\lambda_3 = -10.955152$ (-)
2	0.5	Limit cycle (p=4) (0,-,-)	$\lambda_1 = 0.000094$ (0) $\lambda_2 = -1.245221$ (-) $\lambda_3 = -10.254873$ (-)
3	0.6	Chaotic (+,0,-)	$\lambda_1 = 0.371531$ (+) $\lambda_2 = -0.002955$ (0) $\lambda_3 = -11.968576$ (-)
4	0.9	Chaotic (+,0,-)	$\lambda_1 = 0.400615$ (+) $\lambda_2 = -0.000302$ (0) $\lambda_3 = -12.300313$ (-)
5	1	Chaotic (+,0,-)	$\lambda_1 = 0.498503$ (+) $\lambda_2 = -0.000574$ (0) $\lambda_3 = -12.497929$ (-)

ในตัวดึงดูดของระบบอลวนนั้นมีหลายลักษณะ โดยสามารถบ่งบอกลักษณะของตัวดึงดูดได้จากค่าของเลขชี้กำลัง Lyapunov สามารถบอกถึงลักษณะของรูปแบบตัวดึงดูด ซึ่งสามารถสรุปรูปแบบของตัวดึงดูด ของระบบอลวนอันดับสาม จากค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov [25] ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์รูปแบบตัวดึงดูดจาก ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบอลวนอันดับสาม

λ_1	λ_2	λ_3	รูปแบบ
-	-	-	Fixed point
0	-	-	Limit cycle
0	0	-	Torus attractor
+	0	-	Chaotic attractor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke (Kaplan-Yorke Dimension : D_{ky})

ในการศึกษาและการวิจัยเกี่ยวกับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น หรือระบบอลวนนั้นรูปแบบใหม่ สิ่งที่ทำให้ความสนใจนอกจากรูปแบบเอตต์พุตของสัญญาณหรือตัวดึงดูดที่มีรูปแบบใหม่แล้ว ยังให้ความสำคัญกับความซับซ้อนของระบบเป็นอย่างมาก จึงมีนักวิจัยจำนวนมากนำเสนอระบบอลวนรูปแบบใหม่ที่ตัวดึงดูดที่แปลกใหม่และมีประสิทธิภาพเรื่องของความซับซ้อนสูงขึ้นเรื่อยๆ ในการวิเคราะห์ระบบที่มีความซับซ้อนไม่เป็นเชิงเส้นนั้น หากวิเคราะห์ด้วยสายตาเป็นเรื่องที่ทำได้ยากและไม่มีมาตรฐานที่ชัดเจนในการวิเคราะห์

ในปีคริสต์ศักราช 1979 Edward Kaplan และ James Yorke ได้นำเสนอเสนอทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ระบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความซับซ้อนออกมาเป็นค่าเชิงตัวเลข [27] ซึ่งเป็นประโยชน์และเป็นที่ยอมรับในหมู่นักวิจัยที่ศึกษาระบบไม่เป็นเชิงเส้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนอทฤษฎี การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke [28][29]

ในการคำนวณค่าการคาดเดาของ Kaplan และ Yorke นั้นมีความเกี่ยวเนื่องกับทฤษฎีที่กล่าวมาก่อนหน้าคือ เลขชี้กำลัง Lyapunov ในหัวข้อที่ (2.2.2) เลขชี้กำลัง Lyapunov ให้คำอธิบายที่เป็นลักษณะเฉพาะมากที่สุดเกี่ยวกับการมีอยู่ของปัจจัยกำหนดการเคลื่อนที่แบบไม่มีคาบ ดังนั้น เลขชี้กำลังของ Lyapunov จึงเป็นหน่วยวัดเชิงเส้นที่แสดงลักษณะของค่าเฉลี่ยอัตราการเติบโต (หรือการหดตัว) ของการเปลี่ยนแปลงเล็กๆ ของระบบไดนามิก เลขชี้กำลัง Lyapunov สามารถวัดการตอบสนองของระบบไดนามิกจากการเปลี่ยนแปลงเล็กๆ ของเงื่อนไขเริ่มต้น จำนวนเลขชี้กำลังของ Lyapunov เท่ากับจำนวนนั้นของตัวแปรสถานะ และหากอย่างน้อยหนึ่งค่าเป็นบวก นี่ถือเป็นข้อบ่งชี้ถึงความสับสนวุ่นวาย [24] ระบบอลวนอันดับ 3 นั้นจะมีเลขชี้กำลัง Lyapunov 3 ตัว: ตัวหนึ่งคือค่าบวก $LE+$, ค่าหนึ่งเป็นศูนย์ (หรือใกล้เคียงศูนย์มาก) และค่าหนึ่งเป็นค่าลบ เลขชี้กำลัง Lyapunov ทั้งสามตัวถูกนำมาใช้ประเมินมิติ Kaplan–Yorke ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$D_{ky} = k + \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{|\lambda_{k+1}|} \quad (2.5)$$

โดยที่ k คือจำนวนอันดับระบบสมการ ลบด้วย 1 $\sum_{i=1}^k \lambda_i$ คือผลรวมของเลขชี้กำลัง Lyapunov ตั้งแต่ตัวที่ 1 ถึง ตัวที่ k และ λ_{k+1} เป็นเลขชี้กำลัง Lyapunov ตัวสุดท้ายของระบบสมการ หากระบบอลวนอันดับ 2 จะมีค่า D_{ky} อยู่ในช่วง $1 < D_{ky} < 2$ ระบบที่เป็นอันดับ 3 ค่าของ D_{ky} อยู่ในช่วง $2 < D_{ky} < 3$ [30] ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีระบบอลวนรูปแบบใหม่ถูกพัฒนาขึ้นมามากมาย ทั้งระบบที่มุ่งเน้นรูปแบบตัวดึงดูดที่มีความสวยงามและแปลกตาและระบบที่มุ่งเน้นความซับซ้อนของระบบโดยแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณค่าความซับซ้อนของตัวดึงดูด (D_{ky}) ของระบบปีกผีเสื้อจากการกำหนดพารามิเตอร์ของระบบที่แตกต่างกัน กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น $x_0=1, y_0=1$ และ $z_0=1$

ตารางที่ 2.6 ค่า D_{ky} ของระบบลอว์นปีกผีเสื้อจากการปรับค่าพารามิเตอร์แบบต่างๆ

n	พารามิเตอร์	Lyapunov Exponent	ผลรวมของ Lyapunov Exponent	Kaplan-Yorke Dimension
1	$\sigma = 18.0$ $\rho = 28.0$ $\beta = 8/3$	$\lambda_1 = 0.898629$ $\lambda_2 = -0.001055$ $\lambda_3 = -22.564233$	-21.67	2.0397
2	$\sigma = 10.0$ $\rho = 28.0$ $\beta = 8/3$	$\lambda_1 = 0.893229$ $\lambda_2 = -0.000239$ $\lambda_3 = -14.559657$	-13.67	2.0613
3	$\sigma = 16.0$ $\rho = 45.92$ $\beta = 4.0$	$\lambda_1 = 1.495582$ $\lambda_2 = 0.000322$ $\lambda_3 = -22.495900$	-20.99	2.0664
4	$\sigma = 10.0$ $\rho = 45.92$ $\beta = 4.0$	$\lambda_1 = 1.353628$ $\lambda_2 = 0.000428$ $\lambda_3 = -16.354058$	-14.99	2.0827

จากตารางที่ 2.6 แสดงค่า D_{ky} ของระบบลอว์น ปีกผีเสื้อ โดยปรับค่าพารามิเตอร์ในกรณีที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าจะเป็นระบบลอว์นระบบเดียวกัน แต่ในกรณีที่เงื่อนไขเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันจะมีค่าความซับซ้อนของระบบที่แตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ จุดที่จะทำให้เกิดความซับซ้อนของสัญญาณเอาต์พุตสูงที่สุด ได้จาก แผนภาพการแยกออกไปสองทิศทาง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงช่วงที่เกิดความอลวนของระบบมากที่สุด

2.3 อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในปัจจุบันนี้ อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) [32] เป็นส่วนสำคัญที่สำคัญอย่างยิ่งในโลกปัจจุบันของเทคโนโลยีดิจิทัล ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการควบคุมและประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในงานอุตสาหกรรม ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบการขนส่ง หรือแม้กระทั่งในอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น อุปกรณ์ไฮเทคในบ้าน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลและควบคุมการทำงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีคุณสมบัติที่มากมาย เช่น การใช้พลังงานน้อย ขนาดเล็ก เสถียรภาพสูง ราคาไม่แพง และสามารถทำงานได้ในระบบที่ต้องการความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยืดหยุ่นของการควบคุมอย่างสูง เช่น การตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อเหตุการณ์ที่เปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ในปัจจุบันนี้มีผู้ผลิตจำนวนมากที่แข่งขันกันพัฒนาอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์รูปแบบต่างออกมา วางขายในท้องตลาด อาทิเช่น Arduino[32], Esp32[34], Raspberry Pi[35], STM32[36] และอื่นๆ อีกมากมาย

งานงานวิจัยนี้มีการเลือกใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino Mega2560[37] นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน เนื่องจาก Arduino นั้นเป็นแพลตฟอร์มโอเพ่นซอซ Arduino IDE (Integrated Development Environment) ที่ได้รับความนิยมในหมู่นักวิจัยอย่างแพร่หลาย สามารถใช้งานได้ง่ายและมีราคาของอุปกรณ์ที่ถูก พร้อมทั้งมีฟังก์ชันกันทำงานที่เพียงพอต่อการนำมาประยุกต์ใช้

2.3.1 ข้อมูลทางเทคนิค

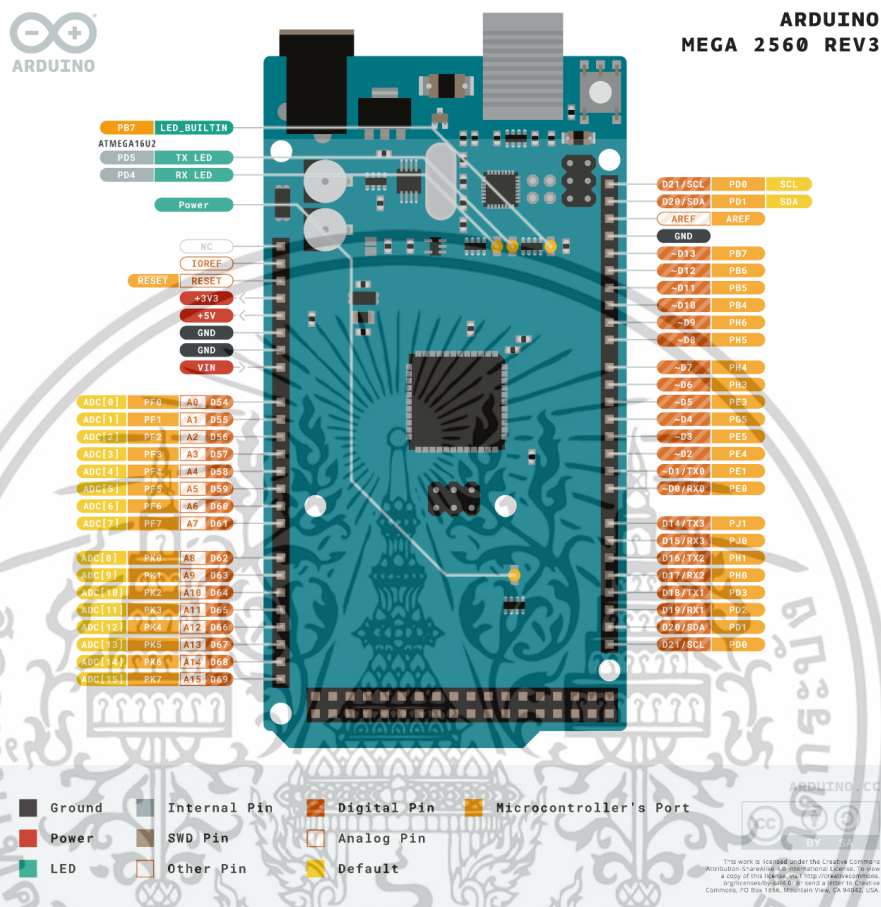
Arduino mega 2560 [37]เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ ชิพ ATmega2560 มีขา อินพุต/เอาต์พุตดิจิทัล 54 ขา (ในจำนวนนั้นสามารถใช้เป็นเอาต์พุต PWM ได้ 15 ขา), อินพุตอะนาล็อก 16 ขา, UART 4 ตัว (พอร์ตอนุกรมฮาร์ดแวร์), ออสซิลเลเตอร์คริสตัล 16 MHz, การเชื่อมต่อ USB, แจ็คจ่ายไฟ, ส่วนหัว ICSP, และปุ่มรีเซ็ต ประกอบด้วยทุกสิ่งจำเป็นเพื่อรองรับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพียงเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB หรือจ่ายไฟด้วยอะแดปเตอร์ AC-to-DC หรือแบตเตอรี่เพื่อเริ่มต้นใช้งาน

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลทางเทคนิค ของ บอร์ด Arduino Mega 2560

หัวข้อ	สเปค
Microcontroller	ATmega2560
ระดับแรงดันที่ทำงาน	5V
ช่วงระดับแรงดันไฟเลี้ยงที่แนะนำ	7-12V
ช่วงระดับแรงดันไฟเลี้ยงที่สามารถรับได้	6-20V
ขาดิจิทัล	54 (PWM 15 ขา)
ขานาล็อก	16
กระแสที่ขา I/O	20 mA
กระแสที่ขา 3.3V	50 mA
หน่วยความจำแบบแฟลช	256 KB (8 KB bootloader)
หน่วยความจำชั่วคราว	8 KB
EEPROM	4 KB
ความเร็วสัญญาณ นาฬิกา	16 MHz
LED บนบอร์ด	13
ยาว	101.52 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้าง	53.3 mm
น้ำหนัก	37 g



รูปที่ 2.13 Arduino Mega2650 Pinout

โปรแกรม

บอร์ด Arduino Mega2560 สามารถโปรแกรมได้ผ่านทาง ซอฟต์แวร์ Arduino (IDE)[38] หรือซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สอื่นๆ ในการเขียนโปรแกรมลงในบอร์ด Arduino นั้นภาษาที่ใช้ในการโปรแกรมเป็นพื้นฐานมาจาก C++ โดยจะมีโครงสร้างของโปรแกรม ทั้งหมด 3 ส่วนคือ

- **Header** คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นของโปรแกรม หรือเรียกว่า **Compiler Directive** ต่างๆรวมไปถึงส่วนของการประกาศตัวแปร และค่าคงที่ต่างๆที่จะใช้ในโปรแกรม
- **Setup()** คือ ส่วนของฟังก์ชันบังคับของการเขียนโปรแกรม Arduino ที่ขาดไม่ได้ ถึงแม้ว่าจะไม่มีการใช้งานในส่วนนี้ก็จำเป็นต้องประกาศไว้ด้วยเสมอ ในส่วนนี้เป็นการกำหนดขอบเขตของฟังก์ชัน โดยฟังก์ชันนี้จะใช้สำหรับบรรจุคำสั่งในส่วนที่ต้องทำให้โปรแกรมทำงานเพียงรอบเดียวตอนเริ่มต้นทำงานของโปรแกรมครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งได้แก่คำสั่งเกี่ยวกับการ **Setup** ค่าการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ เช่น การกำหนดหน้าที่การใช้งานของ PinMode และการกำหนดค่า Baudrate สำหรับใช้งานพอร์ตสื่อสารอนุกรม เป็นต้น

- Loop() คือ ส่วนของฟังก์ชันบังคับของการเขียนโปรแกรม Arduino อีก ส่วนหนึ่งเป็นอีกส่วนหนึ่งที่จำเป็นต้องมีเสมอ โดยคำสั่งที่อยู่ในส่วนนี้จะทำการทำงานแบบวนซ้ำไปไม่รู้จบ หรือเรียกว่าส่วน Main() ในภาษา C++ นั่นเอง

อินพุตและเอาต์พุต

ขาดิจิทัลทั้ง 54 ขาบน บอร์ด Mega2560 สามารถใช้เป็นอินพุตหรือเอาต์พุตได้ โดยใช้ ฟังก์ชัน pinMode() , digitalWrite() และ digitalRead() มีช่วงการทำงาน 5 โวลต์ แต่ละขาสามารถจ่ายและรับกระแสไฟ 20 mA ตามช่วงการทำงานที่แนะนำ และมีตัวต้านทานภายใน ที่ 20-50 k โอห์ม ที่สามารถรับกระแสสูงสุดได้ 40mA หากเกินกว่านี้อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ บางขายังมีฟังก์ชันพิเศษ ดังต่อไปนี้

- อนุกรม (Serial): 0 (RX) และ 1 (TX); อนุกรม 1: 19 (RX) และ 18 (TX); อนุกรม 2: 17 (RX) และ 16 (TX); อนุกรม 3: 15 (RX) และ 14 (TX) ใช้เพื่อรับ (RX) และส่ง (TX) ข้อมูลอนุกรม TTL พิน 0 และ 1 ยังเชื่อมต่อกับขา ATmega16U2 USB-to-TTL
- การขัดจังหวะภายนอก (External Interrupts): 2 (Interrupt 0), 3 (Interrupt 1), 18 (Interrupt 5), 19 (Interrupt 4), 20 (Interrupt 3) และ 21 (Interrupt 2) ขาเหล่านี้สามารถกำหนดค่าให้ทริกเกอร์การขัดจังหวะที่ระดับต่ำ ขอบขาขึ้นหรือขาลง หรือการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดัน
- PWM: 2 ถึง 13 และ 44 ถึง 46 ให้เอาต์พุต PWM 8 บิตพร้อม ฟังก์ชัน analogWrite()
- SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS) ขาเหล่านี้รองรับการสื่อสาร SPI โดยใช้ไลบรารี SPI
- LED: 13. มี LED ในตัวต่อเข้ากับขาดิจิตอล 13. เมื่อขามีค่า HIGH ไฟ LED จะติด, เมื่อขาลOW ไฟดับ
- TWI (Two Wire Interface): 20 (SDA) และ 21 (SCL) รองรับการสื่อสาร TWI โดยใช้ ไลบรารี Wire

การสื่อสาร

บอร์ด Mega 2560 มีฟังก์ชันอำนวยความสะดวกมากมายสำหรับการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ บอร์ดอื่น หรือไมโครคอนโทรลเลอร์อื่นๆ ATmega2560 มี UART ฮาร์ดแวร์สี่ตัวสำหรับการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบอนุกรม TTL (5V) ATmega16U2 บนบอร์ดจะแขนเนลหนึ่งในนั่นผ่าน USB และจัดเตรียมพอร์ต com เสมือนให้กับซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์

2.3.2 หลักการสร้างสัญญาณอลวน

- การประมาณค่าสมการอนุพันธ์

หลักการนำอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน โดยใช้ประโยชน์จากฟังก์ชัน `loop()` ที่มีวนซ้ำของโปรแกรมแบบไม่รู้จบ และวิธีการออยเลอร์ (Euler's Method) มาใช้เพื่อสร้างสัญญาณอลวน

วิธีการออยเลอร์[39] เป็นวิธีการในการแก้ปัญหสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) โดยใช้การประมาณค่าของฟังก์ชันและอนุพันธ์ของฟังก์ชันในขั้นตอนก่อนหน้าเพื่อประมาณค่าในช่วงเวลาถัดไป วิธีการนี้เป็นวิธีในการแก้ปัญหาระบบสมการอนุพันธ์ที่มีความซับซ้อน ซึ่งเหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้ในสมการของระบบอลวนซึ่งเป็นระบบสมการที่มีความซับซ้อน ในการแก้สมการอนุพันธ์จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบสมการและกำหนดรอบในการการประมาณค่าสมการค่าจากการประมาณค่าของอนุพันธ์ของฟังก์ชันในช่วงเวลาปัจจุบัน และใช้ค่านี้ในการประมาณค่าของฟังก์ชันในช่วงเวลาถัดไป ซึ่งสมการการประมาณค่าด้วยวิธีการของ Euler's แสดงดังต่อไปนี้

$$x_{n+1} = x_n + h \frac{dx}{dt} \quad (2.6)$$

โดยค่า x_n คือ ค่าการประมาณค่าของฟังก์ชันในช่วงเวลาปัจจุบัน และ x_{n+1} คือ ค่าการประมาณค่าของฟังก์ชันในช่วงเวลาถัดไป h คือ ขนาดของช่วงเวลาย่อย หรือความละเอียดในการประมาณค่า หากค่า h ลดลงครึ่งหนึ่ง ค่าความคลาดเคลื่อนก็จะลดลงครึ่งหนึ่งเช่นเดียวกัน จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า h และความคลาดเคลื่อนนั้นแปรผกผันตรงกัน[40] แสดงตัวอย่างการประมาณค่าของวิธีการออยเลอร์ ดังตารางที่ 2.8

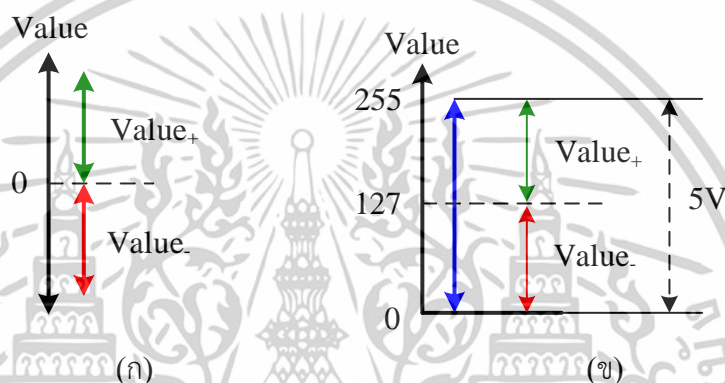
ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบค่าจากการประมาณด้วยวิธีการออยเลอร์เมื่อปรับค่า h

n	x_n	$y_n (h=0.1)$	$y_n (h=0.05)$	$y_n (h=0.025)$	Exact
0	0.0	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
1	0.1	0.800000000	0.810005655	0.814518349	0.818751221
2	0.2	0.640081873	0.656266437	0.663635953	0.670588174
3	0.3	0.512601754	0.532290981	0.541339495	0.549922980
4	0.4	0.411563195	0.432887056	0.442774766	0.452204669
5	0.5	0.332126261	0.353785015	0.363915597	0.373627557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การควบคุมขนาดสัญญาณ (Amplitude Control :AMC)

ในการนำอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการสร้างสัญญาณอลวน ในแต่ละระบบนั้นจะมีระดับเอาต์พุตสัญญาณที่มีความแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องทำการปรับค่าให้อยู่ในช่วงการทำงานของบอร์ด [41][42] Arduino Mega 2560 ขนาด 8 บิต และมีระดับแรงดันตั้งแต่ 0-5 โวลต์ [37] เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของระบบอลวนนั้นทั้งด้านบวก (+) และด้านลบ (-) แตกต่างจากช่วงการทำงานของบอร์ด Arduino Mega 2560 ที่มีเพียงช่วงบวก (+) เท่านั้น จึงจำเป็นต้องแบ่งช่วงการทำงานเป็น 2 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบค่าก่อนและหลังการปรับช่วงการทำงาน

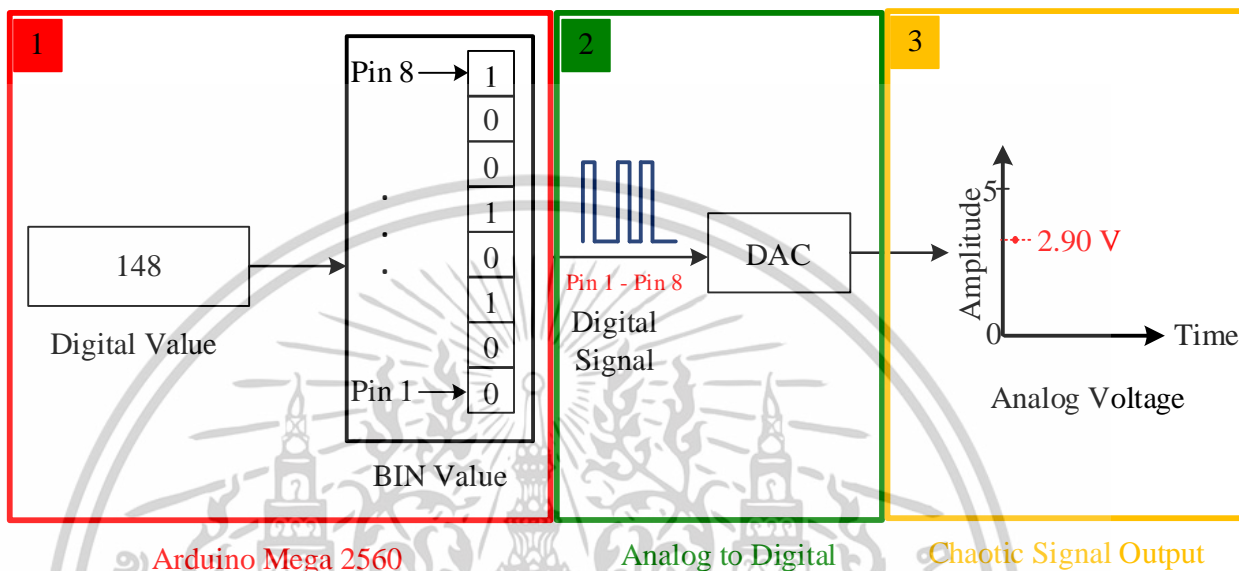
(ก) ค่าเอาต์พุตจากการประมาณค่า (ข) ค่าเอาต์พุตจากการประมาณค่าหลังทำการปรับช่วงการทำงาน จากรูปที่ 2.14 ทำการปรับขนาดของค่าเอาต์พุตที่ทำการประมาณค่าโดยใช้สมการที่ 2.7 ทั้งฝั่งบวก (+) และ ลบ (-) ให้อยู่ในช่วงบวกทั้งหมด โดย ค่าจากการประมาณฝั่งบวก (+) ให้อยู่ในช่วง 127 ถึง 255 และในช่วงลบ (-) ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 126 ซึ่ง ค่า 0 ถึง 255 หรือ 0-5 โวลต์ นั้นเป็นช่วงที่บอร์ด Arduino Mega2560 สามารถสร้างสัญญาณออกมาได้ โดยใช้สมการ ดังนี้

$$V_{out} = \alpha \cdot \frac{(V_{in} - (V_{min}))}{(V_{max} - (-V_{min}))} \cdot 255 \quad (2.7)$$

ที่ V_{in} และ V_{out} คือค่าแอมพลิจูดก่อนและหลังทำกระบวนการ AMC ซึ่ง V_{max} และ V_{min} คือ ค่าแอมพลิจูดที่มากและน้อยที่สุดของสัญญาณที่สร้างได้ โดยที่ α คือพารามิเตอร์สำหรับควบคุมขนาดสัญญาณ หรือ AMC โดยขนาดของสัญญาณขึ้นอยู่กับระบบอลวนที่นำมาใช้และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ ด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ประมวลผล Arduino Mega 2560 ที่ทำงานในช่วง 0 - 5 V ค่า α ที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ จึงอยู่ในช่วง $0 \leq \alpha \leq 1$

- ภาพรวมการทำงานของการสร้างสัญญาณอลวนจากไมโครคอนโทรลเลอร์

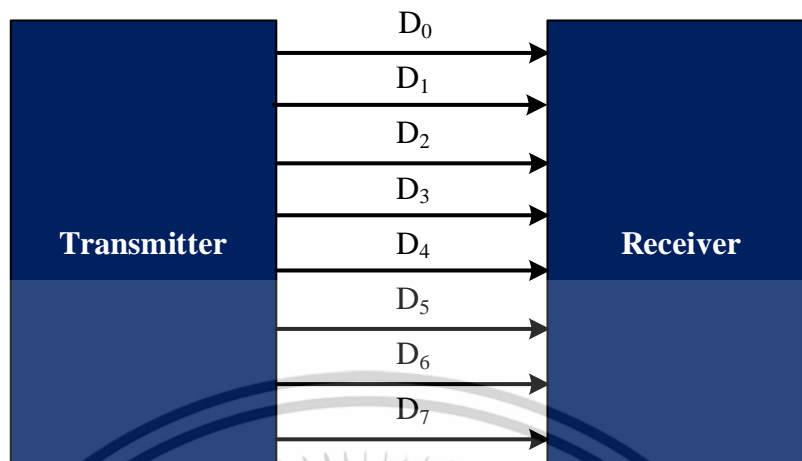
โดยสามารถแสดงลำดับการทำงานของการสร้างสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ใน 1 รอบการทำงานได้ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.15 ลำดับการทำงานของการสร้างสัญญาณอลวนจากอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

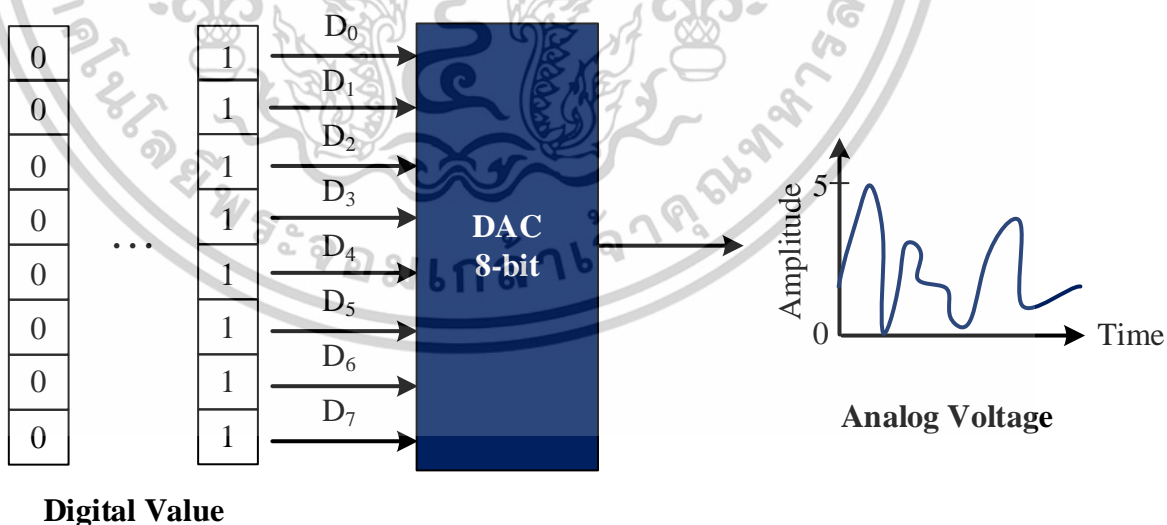
จากรูปที่ 2.15 สามารถสรุปขั้นตอนการทำงานของการสร้างสัญญาณอลวนจากอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบบออกเป็น 3 ส่วน คือ

- ส่วนที่ 1 เป็นการทำงานของ Arduino Mega 2560 ทำหน้าที่ในการประมาณค่าสมการอนุพันธ์ของโดยใช้วิธีการออยเลอร์และทำการปรับขนาดสัญญาณด้วยวิธีการ AMC ที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้า จากนั้นแปลงสัญญาณจากการประมาณค่าที่ถูกปรับขนาดเรียบร้อยแล้ว เป็น ค่าในรูปแบบฐานสอง ขนาด 8 บิต ก่อนที่จะส่งค่านั้น ออกไปทางขาเอาต์พุตดิจิทัลของบอร์ด Arduino Mega 2560 แบบขนาน (Parallel data Transmission)[43][44] ดังรูปที่



รูปที่ 2.16 การสื่อสารแบบขนาน

- ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของ การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (DAC) ขนาด 8 บิต [45] ในส่วนนี้เป็นการนำสัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับจากส่วนที่หนึ่ง มาทำการแปลงสัญญาณดิจิทัล 2 ระดับ 0 และ 1 ขนาด 8 บิต เป็นสัญญาณ อนาล็อก 0 ถึง 255 ระดับ จากรูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างการสื่อสารแบบ ขนานระหว่าง Arduino Mega2560 (Transmitter) กับ ส่วนของ DAC (Receiver) ในรูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการทำงานของ การแปลงสัญญาณ ดิจิทัล เป็นอนาล็อก ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.17 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก แบบ 8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนที่ 3 เป็นส่วนของการแสดงค่าเอาต์พุตของระบบอลวนที่มีขนาด 0 ถึง 5 โวลต์ หากต้องการเพิ่มหรือลดขนาดของสัญญาณอาจเพิ่มส่วนของวงจรมอดูเลชันเพื่อปรับขนาดของสัญญาณให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ การสร้างสัญญาณเอาต์พุต 1 เซตท ต้องใช้ขาสัญญาณเอาต์พุตจากบอร์ด Arduino Mega 2560 จำนวน 8 ขา ในระบบอลวนที่เป็น ระบบอันดับสาม คือ เอาต์พุต x, y และ z จึงต้องใช้ จำนวนขาเอาต์พุตทั้งหมด 24 ขา

ในรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างการทำงานของการทำงานของการสร้างสัญญาณอลวนใน 1 รอบการทำงาน ของเอาต์พุต 1 สเตจ ทำให้ได้เอาต์พุต 1 จุด ซึ่งในการทำงานของโปรแกรม จะทำงานวนซ้ำในทั้ง 3 ส่วนไปเรื่อย ๆ จนรวมเป็นสัญญาณอลวนในที่สุด จากตารางที่ 2.8 ได้นำค่าจากการประมาณ y_n ที่ $h=0.1$ มาเป็นตัวอย่างการทำงานทั้ง 3 ส่วน ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงดังตารางที่ 2.9

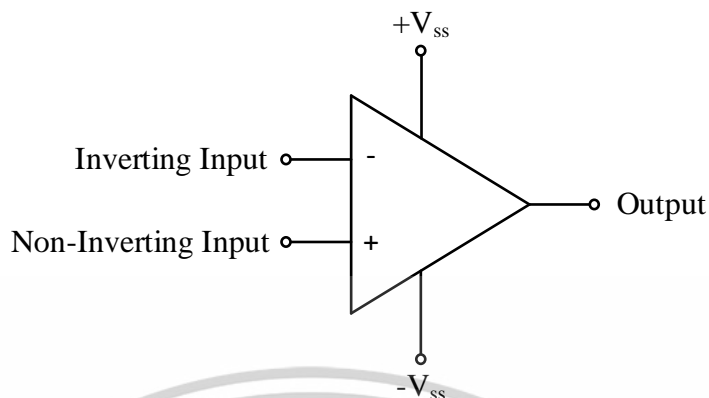
ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างการคำนวณค่า ทั้ง 3 ส่วน

n	y_n (DEC)	AMC	y_n (BIN)	Analog Voltage (V)
0	1.000000000	121.72156	01111001	2.37
1	0.810005655	85.93408	01010101	1.67
2	0.656266437	56.97564	00111000	1.10
3	0.532290981	33.62352	00100001	0.65
4	0.432887056	14.89972	00001110	0.27
5	0.353785015	0	00000000	0

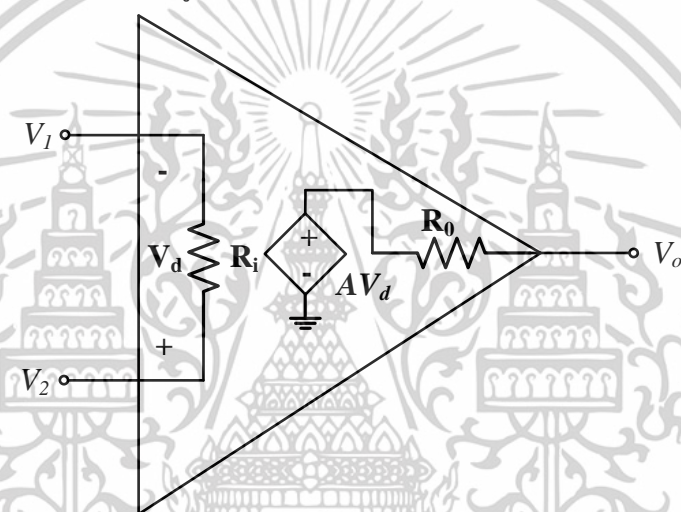
2.4 การออกแบบวงจร อิเล็กทรอนิกส์

2.4.1 ออปเปอร์เรชัน แอมพลิไฟร์ (Operation Amplifier : OPAMP)

ออปเปอร์เรชัน แอมพลิไฟร์ (Operation amplifier)[46] หรือที่นิยมเรียกกันว่า “ออปแอมป์” เป็นวงจรรวมในกลุ่มวงจรรวมแอนะล็อก เริ่มพัฒนาในปี ค.ศ 1948 ออปแอมป์ เป็นกลุ่มวงจรรวมที่นิยมใช้งานมากที่สุดในกลุ่มวงจรรวม มีการทำงานแบบ Voltage-controlled voltage source โดยมีหน้าที่ในการขยายสัญญาณและปรับแต่งแรงดันไฟฟ้า โดยภายในมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน ทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ และไดโอด จำนวนมาก แสดงสัญลักษณ์และวงจรมูล[47] ดังรูปที่ 2.18 และ 2.20 ตามลำดับ



รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์ออปแอมป์



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลออปแอมป์

สัญลักษณ์ ของ ออปแอมป์ ที่แสดงในรูปที่ 2.18 เป็นรูปสามเหลี่ยม มี 2 อินพุต คือ อินพุตลบ (Inverting input:-) และ อินพุตบวก (non-inverting input:+) มี 1 เอาต์พุต $+V_{ss}$ คือแรงดันไบแอสบวก $-V_{ss}$ คือแรงดันไบแอสลบ และวงจรสมมูลในรูปที่ 2.19 ประกอบไปด้วย ความต้านทานอินพุต (R_i) ผลต่างของแรงดันอินพุต (V_d) ความต้านทานเอาต์พุต (R_o) อัตราขยายแรงดัน (A) แรงดันเอาต์พุต (V_o) แรงดันอินพุตที่ขาลบ (V_1) แรงดันอินพุตที่ขาบวก (V_2) โดยในออปแอมป์แบบอุดมคติ [48] จะมีคุณสมบัติตามเงื่อนไขดังนี้

คุณสมบัติออปแอมป์ในอุดมคติ

1. อัตราการขยายแรงดัน สูงมากจนเป็นอนันต์
2. ความต้านทานอินพุต สูงมากจนเป็นอนันต์
3. ความต้านทานทางเอาต์พุต ต่ำมากจนเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แรงดันออฟเซตทางเอาต์พุตเป็นศูนย์
5. กระแสออฟเซตอินพุตเป็นศูนย์
6. ลักษณะสมบัติเชิงความถี่ ขยายได้ดีตั้งแต่ไฟตรง จนความถี่สูงมากเป็นอนันต์

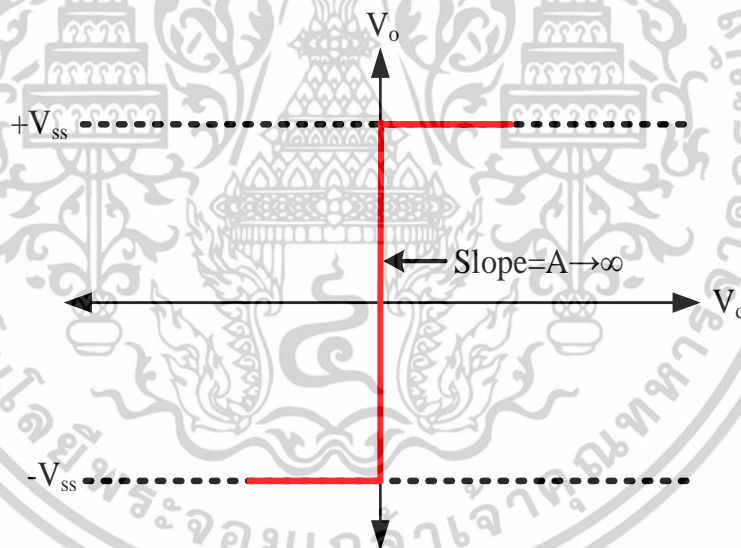
จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นเหตุผลที่ออปแอมป์นั้นเป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ใช้ เป็น วงจรขยายเสียง วงจรเรกูเลเตอร์ วงจรเครื่องมือวัด และวงจรกำเนิดสัญญาณ สมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรออปแอมป์ แสดงดังสมการที่

$$V_o = AV_d = A(V_2 - V_1) \quad (2.8)$$

โดยอัตราขยาย (A) หาได้จาก ดังสมการต่อไปนี้

$$A = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{(v_2 - v_1)} \quad (2.9)$$

คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งอัตราขยาย แสดงดังสมการที่ () แรงดันเอาต์พุตจะมีขนาดไปเกินค่าของแรงดันแรงจ่ายที่ป้อนให้กับออปแอมป์ ($+V_{ss}$ และ $-V_{ss}$)



รูปที่ 2.20 ขอบเขตช่วงการทำงานของออปแอมป์

2.4.2 วงจรที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อยืนยันเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี จากหัวข้อ ที่ 2.4.1 ที่กล่าวถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของอุปกรณ์ ออปแอมป์ ในหัวข้อนี้จะพูดถึงวงจรพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบวงจรสำหรับกำเนิดสัญญาณลอว์นในงานนี้ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator Circuit) วงจรบวก (Summing Circuit) วงจรขยาย (Amplifier Circuit) โดยพื้นฐานของอุปกรณ์ ออปแอมป์

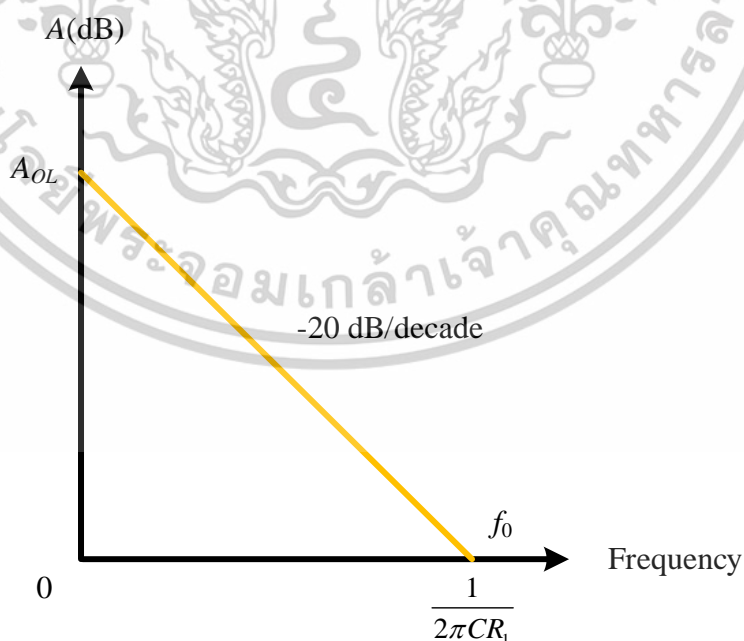
วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรอินทิเกรเตอร์[49][50] คือ วงจรตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์หรือการอินทิเกรต โดยมี R อยู่ที่ขาอินพุต และ C การป้อนกลับ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ วงจรอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย (Lossy Integrator) และแบบไม่สูญเสีย (Lossless Integrator) โดยแสดงสัญลักษณ์ของวงจรอินทิเกรเตอร์ ได้ดังนี้



รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์ของวงจรอินทิเกรเตอร์

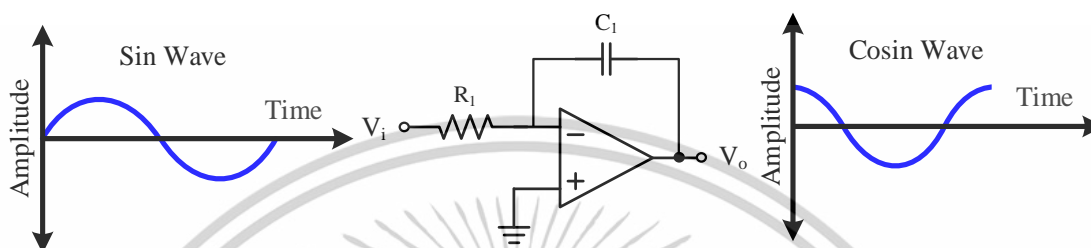
อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย จะไม่มีการสูญเสียความเป็นอินทิเกรเตอร์ในทุกช่วงความถี่ แสดงผลการตอบสนองแม้กนิจจุด ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.22 การตอบสนองความถี่ของวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.22 แสดงการตอบสนองความถี่ของ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย ที่ความถี่ต่ำ จะทำให้อัตราขยายสูงมาก จนเป็นอนันต์ตามคุณสมบัติ **Open loop Gain** ของออปแอมป์ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของ อัตราขยายลดลงเรื่อย ๆ แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย ดังรูปต่อไปนี้



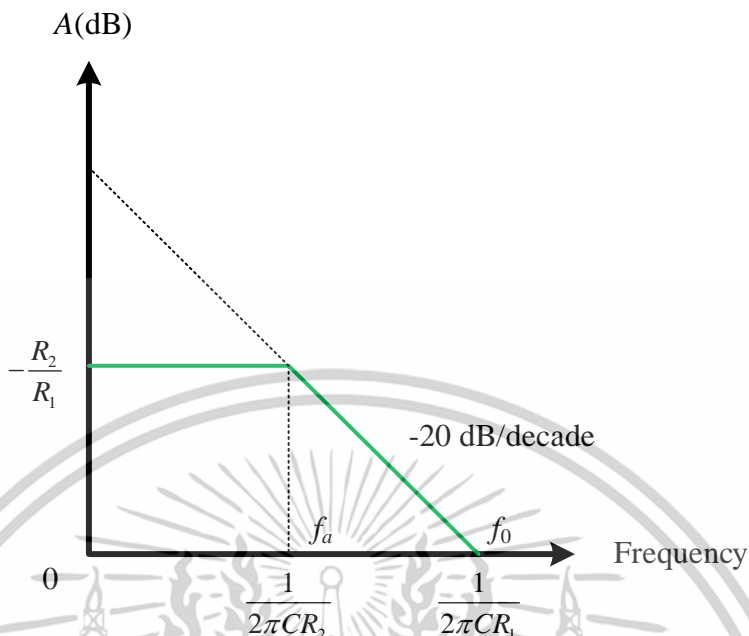
รูปที่ 2.23 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย

จากวงจรในรูปที่ 2.23 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{sR_1C_1} \quad (2.10)$$

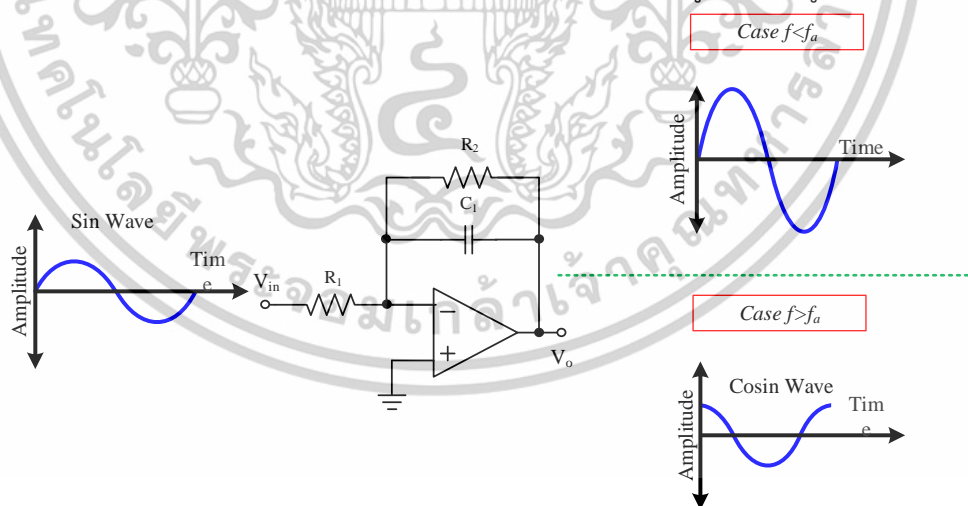
$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int V_i(t) dt \quad (2.11)$$

อินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย จะเกิดการสูญเสียสภาวะความเป็นอินทิเกรเตอร์ ตามช่วงความถี่ ที่ถูกออกแบบไว้ ที่ความถี่ต่ำกว่า ความถี่ตอบสนอง วงจรจะอยู่ในสถานะวงจรขยายแทน เนื่องจากเกิดการ **Open circuit** ของตัวเก็บประจุทำให้ตัวเก็บประจุไม่มีผลกับวงจร ที่ความถี่ต่ำ และที่ความถี่ตอบสนองจะทำให้วงจรทำหน้าที่เป็นอินทิเกรเตอร์ปกติ แสดงผลการตอบสนองแม็กนิจูด ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.24 การตอบสนองความถี่ของวงจรอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย

จากรูปที่ 2.24 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ = 0 หรือช่วงความถี่ต่ำ จะมีอัตราขยายเท่ากับ $-R_2/R_1$ ซึ่งแตกต่างกับ รูปที่ 2.22 ที่มีอัตราขยายเท่ากับอนันต์ ซึ่งเป็นแบ่งช่วงการทำงานตามความถี่สัญญาณอินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย แตกต่างจากอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสียที่มีช่วงการทำงานเพียงช่วงเดียว โดยทำหน้าที่เป็นอินทิเกรเตอร์เสมอ แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย

ในวงจรนี้ มีการปรับปรุงโดยการเพิ่ม R_2 เป็นตัวลดอัตราขยายของวงจรที่ความถี่ต่ำ จะได้สมการ V_o/V_i ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{1 + sR_2C_1} \right) \quad (2.12)$$

ให้ $s=j\omega$, $\omega=2\pi f$ และ $f_a = 1/(2\pi R_2C_1)$ จะได้

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{1 + j2\pi fR_2C_1} \right) \quad (2.13)$$

$$|A| = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{1 + j \left(\frac{f}{f_a} \right)} \right) \quad (2.14)$$

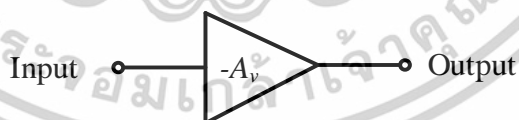
ในกรณีนี้ที่

- $f > f_a$ วงจรจะทำหน้าที่ เป็นอินทิเกรเตอร์
- $f < f_a$ วงจรจะทำหน้าที่เป็น วงจรขยายแบบกลับเฟส $A=R_2/R_1$
- $f=f_a$ จะมีอัตราขยาย $A=0.707(R_2/R_1)$

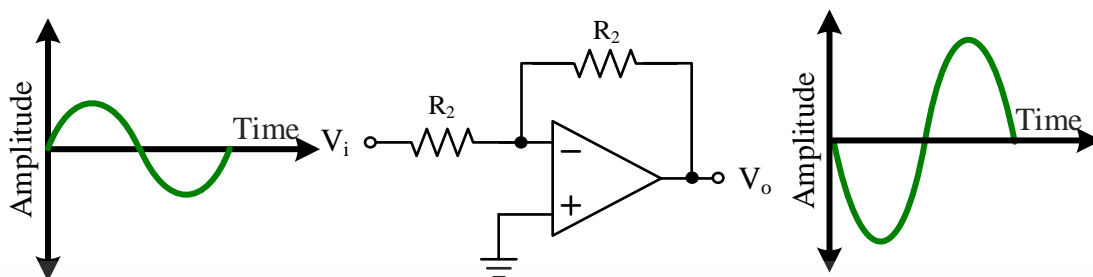
วงจขยาย (Amplifier)

วงจขยายคือ [49][50]วงจรที่ทำหน้าที่ขยายหรือย่อขนาดของสัญญาณ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ วงจขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) เฟสของสัญญาณเอาต์พุตจะมีความแตกต่างจากสัญญาณอินพุต 180 องศา แสดงสัญลักษณ์และวงจดังรูปที่ 2.26 และ 2.28 วงจขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) ในวงจรูปแบบนี้สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตจะมีเฟสเท่าเดิม แสดงสัญลักษณ์และวงจดังรูปที่ 2.28 และ 2.30

- วงจขยายแบบกลับเฟส



รูปที่ 2.26 สัญลักษณ์วงจขยายแบบกลับเฟส



รูปที่ 2.27 วงจรขยายแบบกลับเฟส

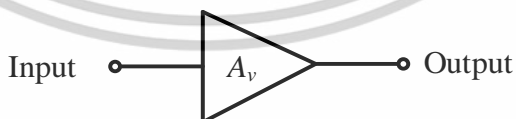
ในวงจรขยายออปแอมป์นั้นสามารถที่จะกำหนดอัตราการขยายของวงจรได้โดยการใช้ วงจรฟีดแบ็คลบ (Negative Feedback) เมื่อเราป้อนสัญญาณเข้าทางขากลับเฟส (ขา -) แรงดันเอาต์พุตจะมีมุมเฟสต่างไปจากแรงดันทางเข้า 180 องศา สัญญาณตรงกันข้ามนี้จะถูกป้อนกลับผ่าน R_2 เข้ามายังขาลบอีกครั้งหนึ่ง ตรงจุดนี้จะทำให้สัญญาณเกิดการหักล้างกันอัตราการขยายจึงลดลง ถ้าตัวต้านทานที่เป็นตัวป้อนกลับมีค่ามาก จะทำให้สัญญาณป้อนกลับมีขนาดเล็กอัตราการขยายออกจึงสูง ถ้าตัวต้านทานที่เป็นตัวป้อนกลับมีค่าน้อยสัญญาณป้อนกลับไปได้มากอัตราการขยายก็จะลดลง ฉะนั้นอัตราส่วนของความต้านทาน R_1 และ R_2 จะเป็นตัวกำหนดอัตราการขยายของวงจรโดยไม่ขึ้นกับอัตราการขยายของออปแอมป์ ซึ่งสามารถหาอัตราการขยายแรงดันได้จากสมการต่อไปนี้

$$A = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.15 แสดงสมการเอาต์พุตได้ดังสมการต่อไปนี้

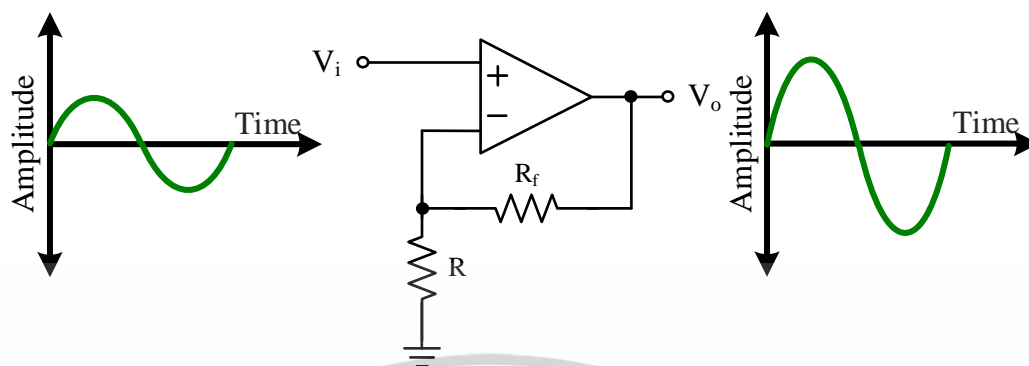
$$V_o = \left(-\frac{R_f}{R}\right) V_i \quad (2.16)$$

- วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส



รูปที่ 2.28 สัญลักษณ์วงจขยายแบบไม่กลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

วงจรขยายนี้เป็นวงจรขยายอีกแบบหนึ่งที่ต้องการเฟสในการขยายเป็นเฟสเดียวกัน ดังนั้นการป้อนสัญญาณอินพุตจึงต้องป้อนเข้าที่ขาบวก ซึ่งเมื่อขยายออกก็เอาต์พุตแล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีเฟสเหมือนเดิม ดังนั้นในวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสนี้การป้อนกลับเพื่อลดอัตราขยายจึงยังคงต้องป้อนไปยังขาลบ เพื่อให้เกิดการหักล้างของสัญญาณกันภายในตัวไอซีออปแอมป์ โดยสามารถหาอัตราการขยายของวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

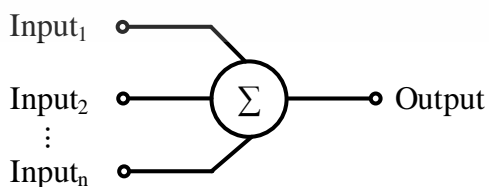
$$A = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 แสดงสมการเอาต์พุตได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) V_i \quad (2.18)$$

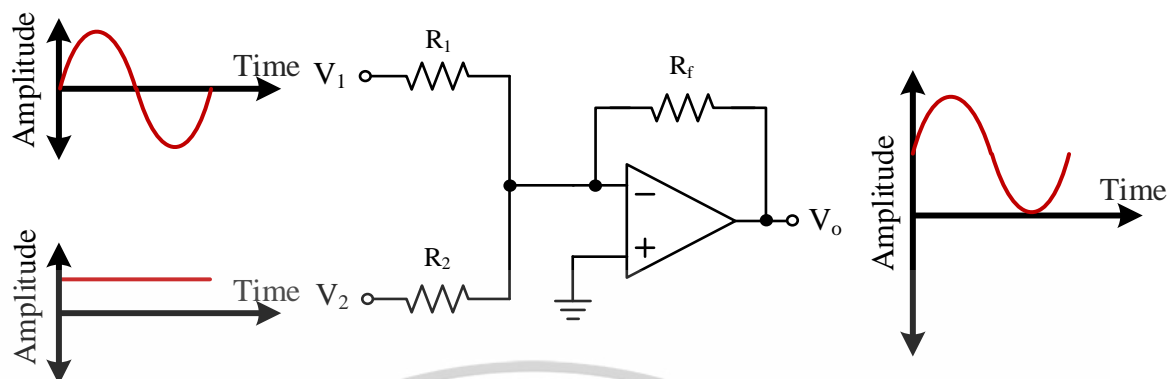
วงจรวก (Summing)

วงจรรวมสัญญาณ[50][51] คือ วงจรที่ทำหน้าที่ รับสัญญาณอินพุตหลายๆ สัญญาณ มารวมกันเป็นสัญญาณเอาต์พุตเพียงสัญญาณเดียว แสดงสัญลักษณ์และวงจรถังรูปที่ 2.30 และ 2.31 ตามลำดับ



รูปที่ 2.30 สัญลักษณ์วงจรวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 วงจรบวก

จากรูปที่ 2.31 จะสังเกตเห็นว่าวงจรบวก คือวงจรที่พัฒนามาจากวงจรขยายแบบกลับเฟส แต่สามารถรับค่าสัญญาณอินพุตหลายสัญญาณได้ในเวลาเดียวกัน แสดงสมการได้ดังนี้

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_f \quad (2.19)$$

จากกฎของโอมห์ จัดรูปสมการที่ 2.19 จะได้สมการต่อไปนี้

$$\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} + \frac{V_{i3}}{R_3} = -\frac{V_o}{R_f} \quad (2.20)$$

จัดรูปสมการที่ 2.20 จะได้สมการของเอาต์พุต ดังต่อไปนี้

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n}V_n\right) \quad (2.21)$$

ถ้าหาก $R_1=R_2=R_3=R_n$ ซึ่งเป็นส่วนของอัตราขยาย จึงสามารถจัดรูปใหม่ได้ ดังต่อไปนี้

$$V_o = -\frac{R_f}{R}(V_1 + V_2 + \dots + V_n) \quad (2.22)$$

ในกรณีที่ $R=R_f$ จะส่งผลให้อัตราขยายของวงจรเท่ากับ 1 จะได้สมการเอาต์พุตดังต่อไปนี้

$$V_o = -(V_1 + V_2 + \dots + V_n) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่างๆ ที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับระบบ ไดนามิกที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรือ ที่เรียกกันย่อๆ ว่าเป็นระบบโวลวน ซึ่งเป็นการศึกษาในความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีความยากในการทำความเข้าใจ ไม่สามารถคาดเดาได้อย่างแน่นอน ต่างจากระบบที่มีความเป็นเชิงเส้นโดยทั่วไป จึงมีความจำเป็นต้องใช้หลักการและทฤษฎี เฉพาะทาง ในการวิเคราะห์และวัดประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งถูกกล่าวไว้ในบทนี้

โดยบทนี้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของระบบโวลวน การวิเคราะห์ระบบโวลวนด้วยทฤษฎี การแยกออกเป็นสองทิศทาง (Bifurcation) ใช้ในการวิเคราะห์ช่วงพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดความไม่เสถียรของระบบ ต่อมาได้พูดถึง การวิเคราะห์เลขชี้กำลัง Lyapunov หรือ (Lyapunov Exponent :LE) ใช้ในการบอกว่าระบบเกิดความโวลวนหรือไม่ และลักษณะของตัวดึงดูดผ่านทางค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov จากค่าของเลขชี้กำลัง Lyapunov นั้น เรานำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณความซับซ้อนของระบบ จากทฤษฎีการคาดเดาของ Kaplan และ Yorke (Kaplan-Yorke Dimension : D_{KY}) จากทฤษฎีที่กล่าวมานั้น เป็นทฤษฎีที่ได้รับความนิยมและการยอมรับในหมู่นักวิจัยที่ทำการศึกษาระบบไดนามิกที่ไม่เป็นเชิงเส้น และต่อมาได้กล่าวถึงการ สร้างสัญญาณโวลวนจากโดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การสร้างด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กล่าวถึงออปแอมป์ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกนำมาเป็นอุปกรณ์หลักในการสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณโวลวนและวงจรร้อยต่างๆที่จำเป็นในการสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณโวลวน และส่วนที่สองกล่าวถึงการสร้างสัญญาณโวลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ กล่าวถึงหลักการทำงาน คุณสมบัติเฉพาะตัวต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาใช้

จากหลักการและทฤษฎีต่างๆที่กล่าวมานั้นเป็นพื้นฐานในการนำความเข้าใจและสร้างระบบไดนามิกที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือระบบโวลวน โดยผู้วิจัยได้นำข้อมูลต่างๆที่ได้กล่าวมาใช้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจงานวิจัยต่างๆที่ถูกลำเสนอมาในอดีตในบทต่อไป (บทที่ 3) เพื่อชี้ให้เห็นถึงข้อดีข้อเสียมาเป็นพื้นฐานในการในการออกแบบและพัฒนาระบบโวลวนที่มีประสิทธิภาพสูงและและสามารถสร้างได้จริงต่อไป

บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่ถูกนำเสนอเกี่ยวกับการสร้างวงจรถ่ายทอดสัญญาณอนาล็อกที่ถูกตีพิมพ์ในอดีตที่ผ่านมาโดยมุ่งเน้นการศึกษาหาแนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพและนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอ ในงานวิจัยที่เลือกนำมาศึกษานั้น เป็นการนำระบบอลวนที่มีมาในอดีตหรือระบบที่ถูกนำมาปรับปรุงใหม่ซึ่งงานวิจัยที่มีในอดีตนั้นมีความแตกต่างกันของระบบทั้งในด้านจำนวนพจน์รูปแบบของพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งส่งผลต่อความซับซ้อนในการนำไปสร้างเป็นวงจรถ่ายทอดสัญญาณวิธีการในการสร้างวงจรถ่ายทอดสัญญาณ ในงานที่เลือกนำมาใช้ในการศึกษานั้นสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบของวงจรถ่ายทอดสัญญาณอนาล็อกแบบที่ใช้อุปกรณ์ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักซึ่งยังพบปัญหาที่สามารถปรับความพารามิเตอร์ของระบบให้มีความแม่นยำได้ยากทำให้ส่งผลต่อความถูกต้องของสัญญาณเอาต์พุต จึงมีการศึกษาวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการนำอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้มาประยุกต์ใช้ในการสร้างวงจรถ่ายทอดสัญญาณอนาล็อก จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้ 2 ชนิดที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้ คือ FPGA (Field Programmable Gate Array)[52] เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบหนึ่งที่ภายในประกอบไปด้วยตัวดำเนินการทางดิจิทัลอยู่ภายในจำนวนมากทำให้สามารถโปรแกรมเพื่อเลือกใช้งานตามที่ต้องการได้อย่างอิสระ FPA (Field Programmable Analog Array) [53] เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตั้งโปรแกรมใหม่ได้คล้ายคลึงกับ FPGA แต่มีความแตกต่างกันในรูปแบบของการทำงาน ที่เป็นรูปแบบของบล็อกอนาล็อกเชิงคำนวณ (Configurable Analog Block :CAB) โดยสามารถโปรแกรมการเชื่อมของ CAB ได้อย่างอิสระ โดยทั้ง FPGA และFPA เป็นเทคโนโลยีแบบใหม่ที่มาแก้ปัญหาความซับซ้อนในการออกแบบวงจร และปัญหาความคาดเคลื่อนประจำตัวของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

ในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการออกแบบระบบอลวนรูปแบบใหม่บนพื้นฐานแบบจำลองการกระตุก รวมไปถึงการนำเทคนิคและวิธีการต่างๆ ที่ได้รับความนิยม มาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบที่ทำการออกแบบ โดยเนื้อหาในบทนี้เป็นอ้างอิงผลงานวิจัย [54] [55] [56] [57] เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองอลวนรูปแบบใหม่และนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบของระบบอลวนประสิทธิภาพของระบบด้านความซับซ้อนและเทคนิคในการนำไปสร้างเป็นวงจรถ่ายทอดสัญญาณ ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

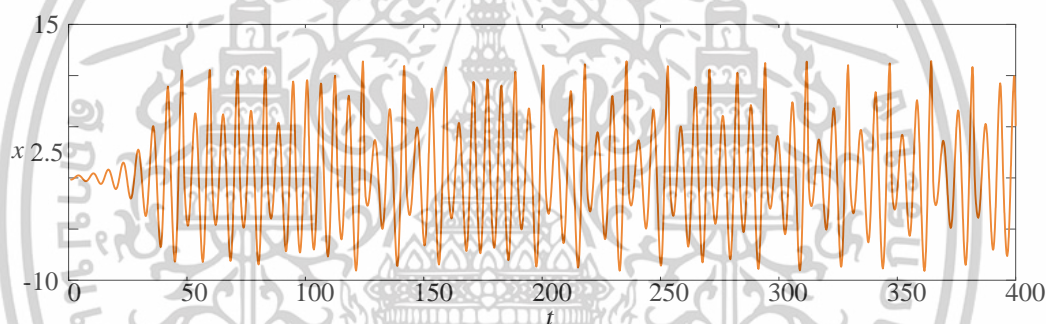
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณอววนของ Rossler ด้วยอุปกรณ์ OPAMP [54]

3.2.1 แบบจำลองอววนต้นแบบของระบบอววน Rossler

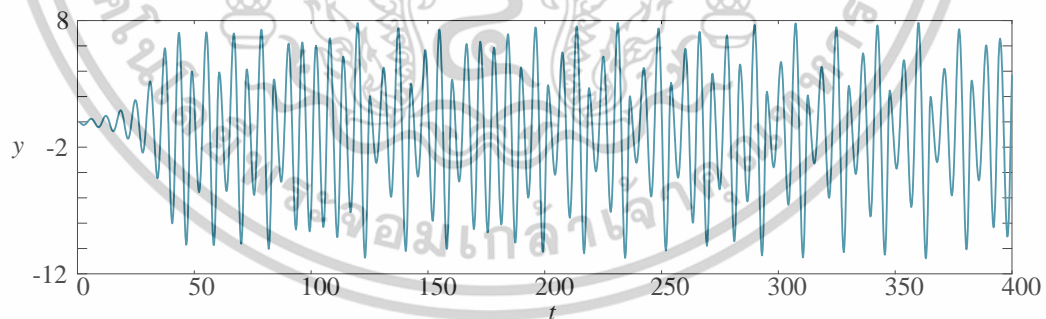
ในปี ค.ศ. 1976 Otto Eberhard Rössler ได้นำเอาระบบอววนปีกผีเสื้อของ Edward Norton Lorenz ที่แสดงในสมการที่ (2.4) มาปรับปรุงโดยการ ลดพจน์ไม่เป็นเชิงเส้น และพารามิเตอร์ ลงอย่างละ 1 พจน์ ทำให้ได้ระบบที่ยังสามารถสร้างสภาวะอววนได้ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง แต่ส่งผลต่อความซับซ้อนของระบบที่ลดลงตามไปด้วย แสดงสมการของระบบดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -y - z \\ \dot{y} &= x + by \\ \dot{z} &= b + z(x - c)\end{aligned}\quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) ช่วงที่นำเสนอ ใช้ค่าพารามิเตอร์ $b=0.2$ และ $c=5.7$ โดยมีค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $x_0=1$, $y_0=1$ และ $z_0=1$ แสดงลักษณะเอาต์พุตบนแกนเวลาและตัวตั้งจุด ดังรูปต่อไปนี้

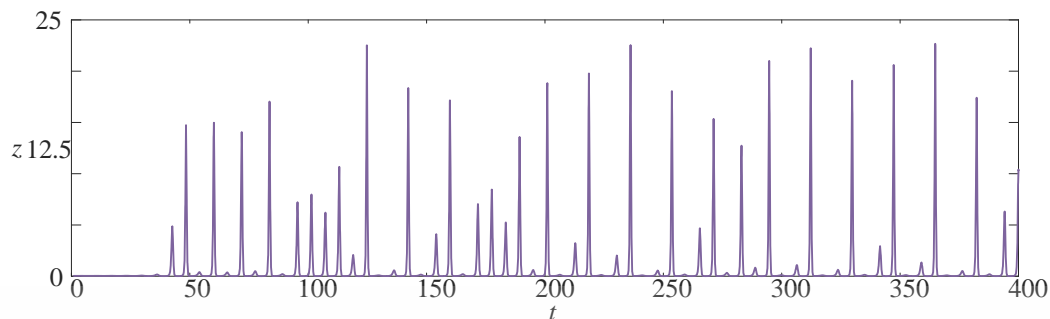


(ก)



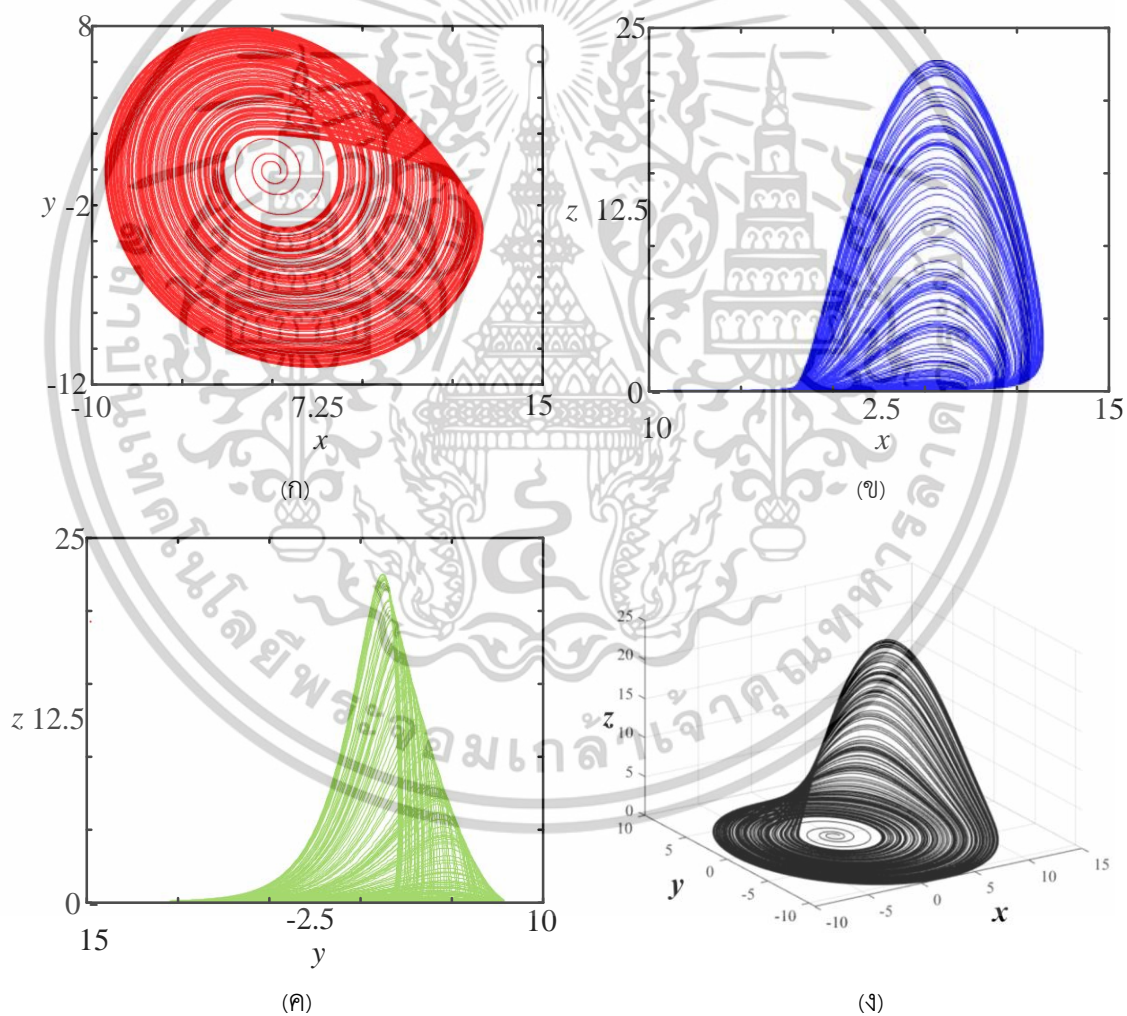
(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 3.1 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบ Rossler

(ก) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ x (ข) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ y (ค) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ z 

รูปที่ 3.2 เอาต์พุตตัวดึงดูดของระบบ Rossler

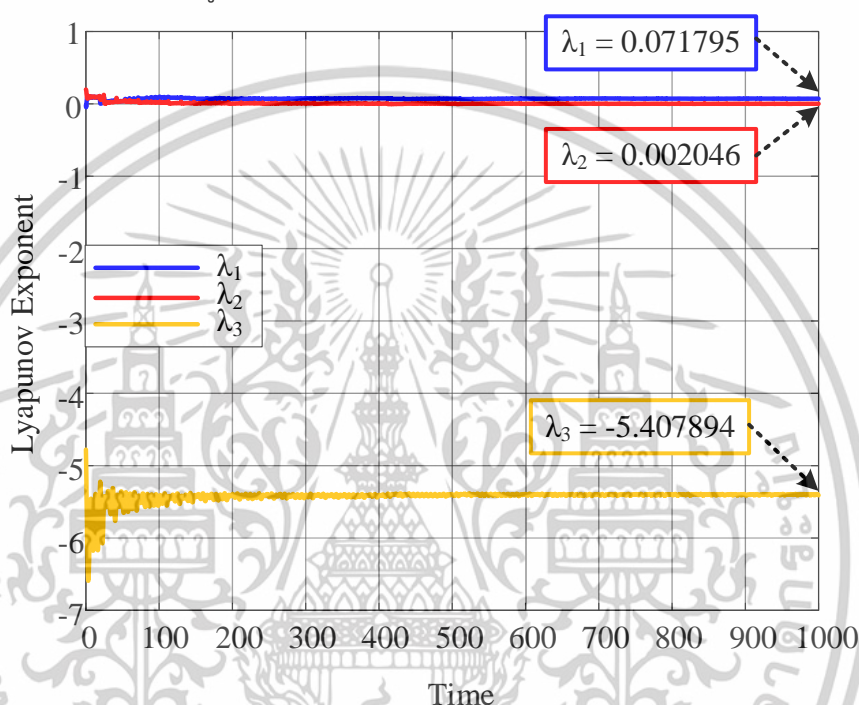
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) ตัวตั้งจุด ระนาบ $x-y$ (ข) ตัวตั้งจุด ระนาบ $x-z$ (ค) ตัวตั้งจุด ระนาบ $y-z$

(ง) ตัวตั้งจุดรูปแบบ 3 มิติ

3.2.2 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke ของระบบลอวน Rossler

จากทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.2.3 ที่กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณความซับซ้อนของระบบลอวน จากค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบ Rossler

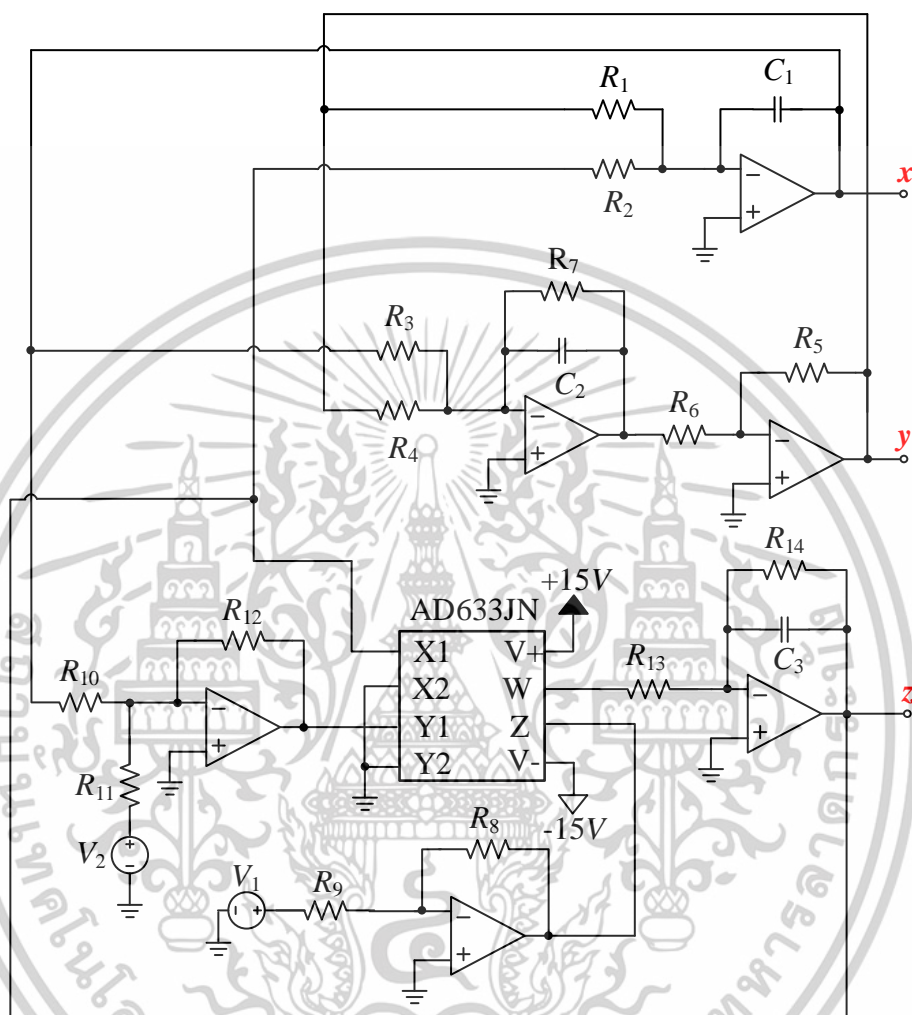
จากรูปที่ 3.3 มีค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ดังนี้ $\lambda_1=0.071795$, $\lambda_2=0.002046$ และ $\lambda_3=-5.407894$ สามารถคำนวณความซับซ้อนของระบบได้จากสมการที่ (2.5) ซึ่งจะพบว่า ระบบลอวนของ Rossler ที่มี 3 พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$D_{KY} = 2 + \frac{0.071795 + 0.002046}{|-5.407894|} = 2.0137 \quad (3.2)$$

3.2.3 การสร้างวงจรถ้าเนิดสัญญาณของระบบลอวน Rossler

ในงานนี้ Artur Karimov และคณะนำเสนอการออกแบบวงจรถ้าเนิดสัญญาณโดยใช้อุปกรณ์ออปแอมป์ และตัวคูณอนาล็อก ตามสมการของระบบ ในสมการที่ (3.1) แสดงรูปการณออกแบบวงจรถ้ารูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันของระบบ Rossler

จากรูปที่ 3.4 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ ของแบบจำลอง Rossler ที่ โดยมีการออกแบบบน พื้นฐานของอะปรกรณ์ออปแอมป์ เบอร์ OPA2134 และตัวคูณอนาล็อก เบอร์ AD633JN และ ส่วนประกอบ RC ที่ถูกแสดงในตารางที่ 3.1 ในวงจรนี้มีการใช้ไฟเลี้ยงของวงจร $\pm 15\text{v}$ การปรับ ค่าพารามิเตอร์ b c สามารถปรับ แรงดัน V_1 และ V_2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตารางค่า RC ของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน ในรูปที่ 3.4

ส่วนประกอบ RC	ค่า
$R_1, R_2, R_3, R_{11}, R_{12}$	10 $k\Omega$
R_4	50 $k\Omega$
R_5, R_6	39 $k\Omega$
R_7	75k
R_8	12k
R_9	470k
R_{10}	2.5K
R_{13}	1k
R_{14}	220k
C_1, C_2, C_3	10 nF

ตารางที่ 3.2 สรุปจำนวนอุปกรณ์จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน

อุปกรณ์	จำนวน (ตัว)
OPAMP	6
Multiplier	1
Resistor	14
Capacitor	3

ในงานนี้นำเสนอระบบอลวนของ Rossler ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการปรับปรุงมาจากระบบปีกผีเสื้อของ Lorenz โดยลดความซับซ้อนของระบบทำให้ง่ายต่อการนำไปออกแบบเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแต่ส่งผลทำให้ความซับซ้อนของระบบ Rossler นั้น ต่ำลงจากระบบต้นแบบของ Lorenz ระบบของ Rossler มีค่าความซับซ้อน $D_{KY}=2.0137$ ซึ่งนับว่าเป็นระบบอลวนที่มีความซับซ้อนค่อนข้างต่ำ งานนี้มีการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ บนพื้นฐานของออปแอมป์ เบอร์ OPA2134 จำนวน 6 ตัว ตัวคูณอนาล็อก เบอร์ AD633JN ตัวต้านทาน 14 ตัว และ ตัวเก็บประจุ 3 ตัว

3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันการกระตุ้นด้วยฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น **Hyperbolic Sine** ด้วยอุปกรณ์ **OPAMP** [55]

3.3.1 แบบจำลองออสซิลเลชันแบบของระบบการกระตุ้น

ในปี ค.ศ.1944 Sprott ได้ค้นพบสมการที่ก่อให้เกิดพฤติกรรมที่มีความอลวนและมีตัวดึงดูดแบบสามมิติที่ประกอบไปด้วย 5 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้น 2 เทอม และต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Gittlied ได้กล่าวว่าสมการที่ Sprott นำเสนออาจเขียนได้ในรูปแบบสมการอันดับสามที่เรียกว่า Jerk function แสดงดังสมการที่ (3.3)

$$\ddot{x} = j(x, \dot{x}, \ddot{x}) \quad (3.3)$$

Jerk function คือการอนุพันธ์อันดับสามของการกระตุ้น x ซึ่งในทางกลศาสตร์คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเทียบกับเวลาแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \dot{x} = v \\ \frac{d^2x}{dt^2} &= \ddot{x} = a \\ \frac{d^3x}{dt^3} &= \ddot{\dot{x}} = j \end{aligned} \quad (3.4)$$

โดยที่ t คือ เวลา (Time) x คือการกระตุ้น (Position) v คือ อัตราเร็ว (Velocity) a คือ ความเร่ง (Acceleration) และ j คือการกระตุ้น (Jerk) หรือที่รู้จักกันในชื่อ ระบบการกระตุ้น ซึ่งระบบออสซิลเลชันการกระตุ้นที่ Sprott นำเสนอสามารถ เขียนให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งจำนวนสามสมการ จากสมการที่ 2 สามารถแปลงเป็นระบบการกระตุ้นได้ดังต่อไปนี้

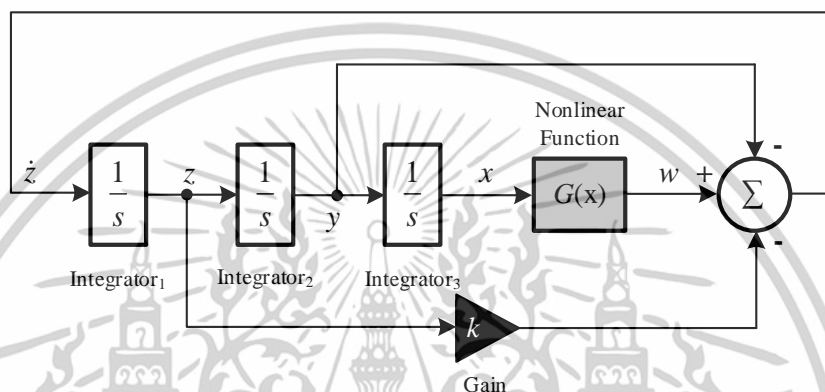
$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \dot{x} = v \\ \frac{d^2x}{dt^2} &= \ddot{x} = a \\ \frac{d^3x}{dt^3} &= \ddot{\dot{x}} = -A\ddot{x} - B\dot{x} + G(x) \end{aligned} \quad (3.5)$$

หรือสามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งได้ดังสมการที่ (3.6) โดยที่ $y = \dot{x}, z = \ddot{x}$

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y \\ \frac{dy}{dt} &= z \\ \frac{dz}{dt} &= J(x, y, z) \end{aligned} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sportt เรียกสมการสุดท้ายในสมการที่ (3.5) และ (3.6) ว่า สมการการกระตุก โดย $G(x)$ เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น A และ B เป็นคงที่ แม้ว่าสมการ $G(x)$ จะเป็นสมการใดๆก็ตาม นั้นแสดงถึงความง่ายในการนำเอาระบบอลวนการกระตุก มาใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบอลวนรูปแบบใหม่ ในการจัดรูปของระบบสมการการกระตุกนั้นสามารถนิยามใหม่ได้ในรูปของระบบสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง การลดรูปที่กล่าวมานั้นถือเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือระบบอลวน จากสมการที่ (3.5) สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอลวนการกระตุกได้ดังนี้

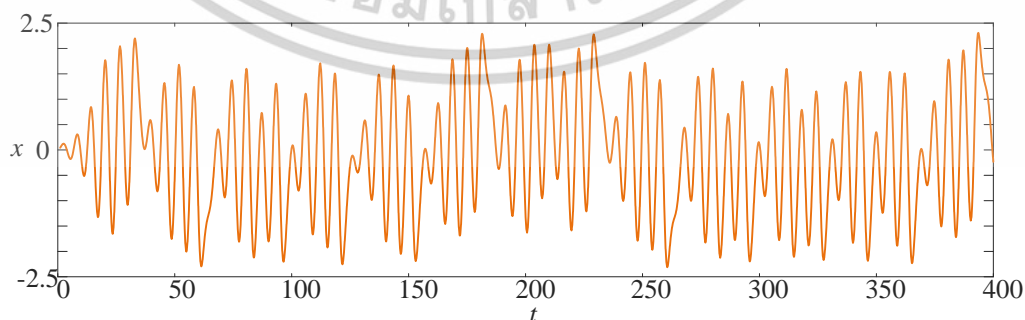


รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองการกระตุก (Jerk Model)

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอระบบอลวนรูปแบบใหม่ที่ได้รับการพัฒนาบนพื้นฐานของระบบการกระตุกแบบเดิม ถูกนำเสนอโดย Xiaoyan Hu และคณะ โดยนำเสนอระบบการกระตุกรูปแบบใหม่ที่มีฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นรูปแบบ hyperbolic Sine แสดงสมการของระบบที่นำเสนอต่อไปนี้

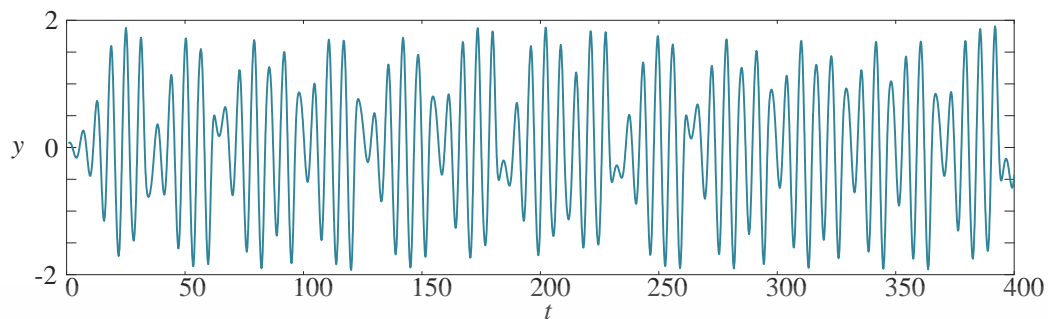
$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= -az - y - 0.2z - \sinh(x) \end{aligned} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.7) ช่วงที่นำเสนอ ใช้ค่าพารามิเตอร์ $a=1.67$ โดยมีค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $x_0=0, y_0=0$ และ $z_0=0.1$ แสดงลักษณะเอาต์พุตบนแกนเวลาและตัวดิ่งจุด ดังรูปต่อไปนี้

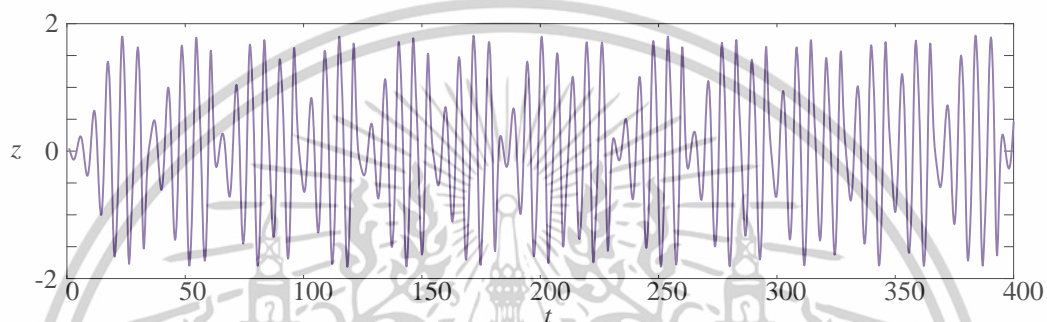


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

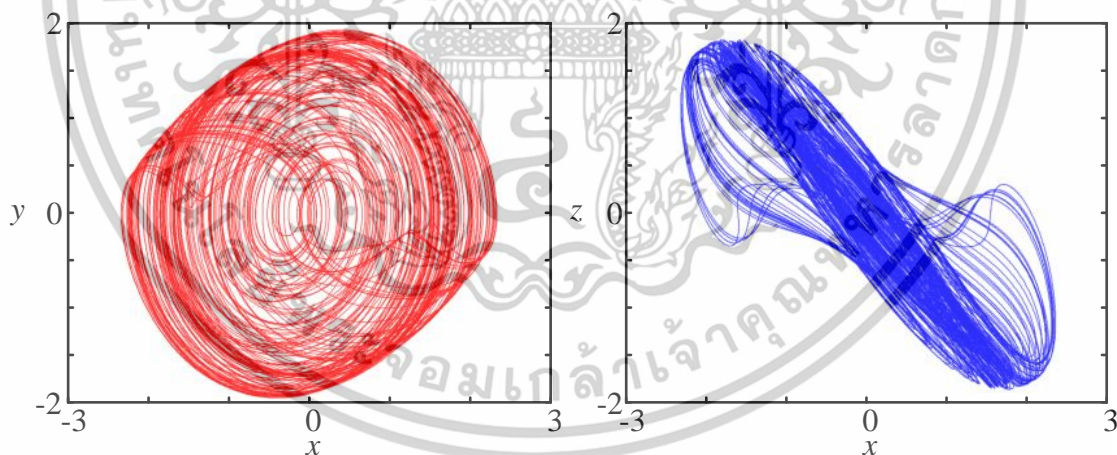


(จ)



(ค)

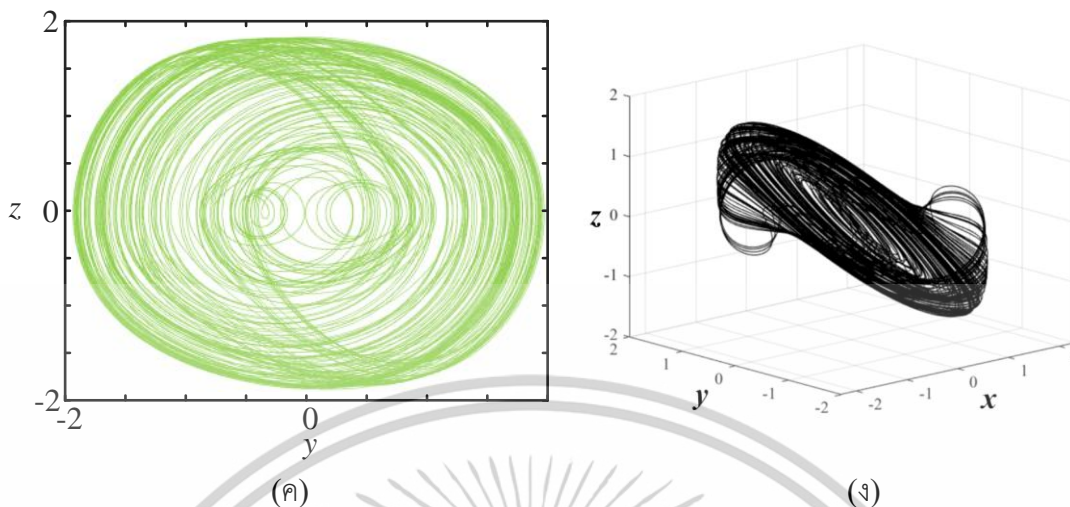
รูปที่ 3.6 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบการกระตุ้นแบบใหม่
(ก) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ x (ข) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ y (ค) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ z



(ก)

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



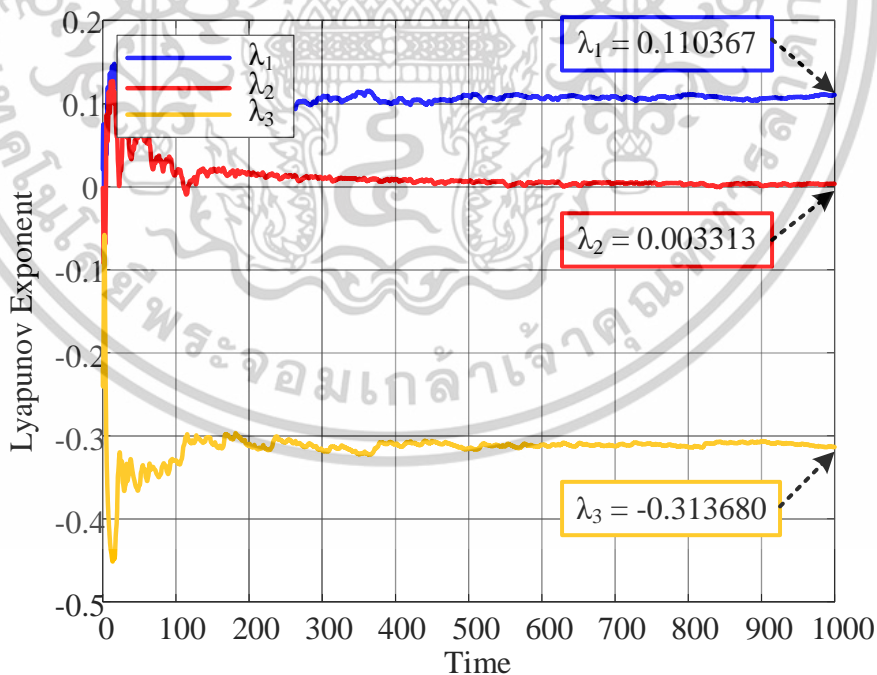
รูปที่ 3.7 เอตต์ฟุตตัวดึงดูดของระบบลอวนการกระตุกรูปแบบใหม่ที่มี 3 พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น

(ก) ตัวดึงดูด ระนาบ x - y (ข) ตัวดึงดูด ระนาบ x - z (ค) ตัวดึงดูด ระนาบ y - z

(ง) ตัวดึงดูดรูปแบบ 3 มิติ

3.3.2 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke ของระบบการกระตุก

จากทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.2.3 ที่กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณความซับซ้อนของระบบลอวน จากค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบลอวนการกระตุกรูปแบบใหม่

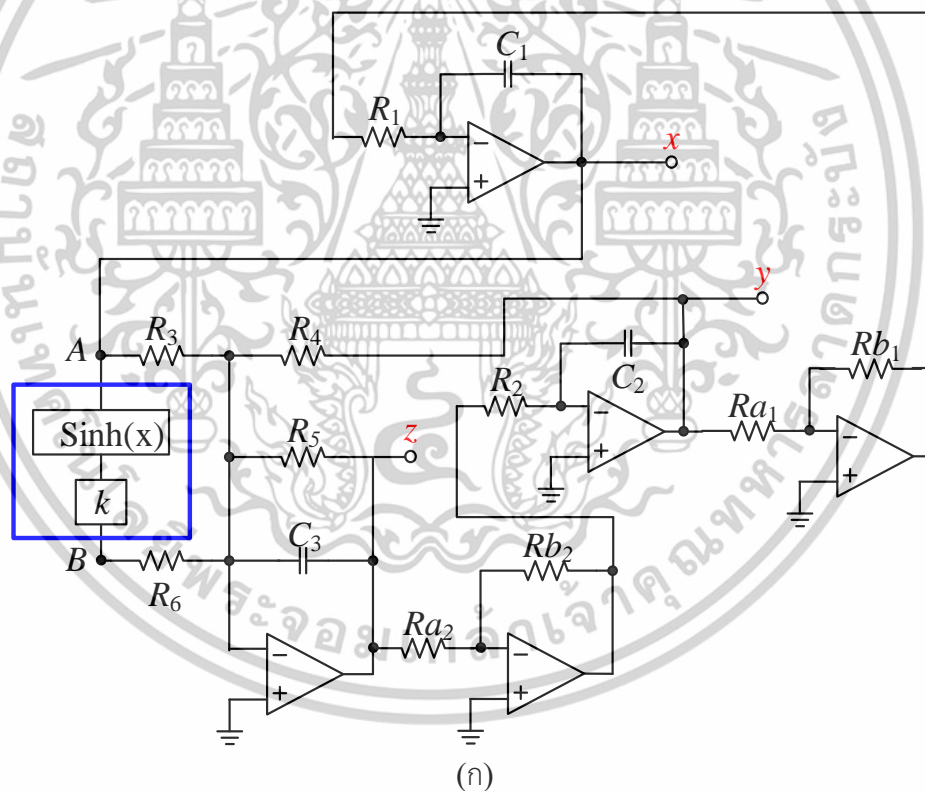
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.8 มีค่า เลขชี้กำลัง Lyapunov ดังนี้ $\lambda_1=0.110367$, $\lambda_2=0.003313$ และ $\lambda_3=-0.313680$ สามารถคำนวณความซับซ้อนของระบบได้จากสมการที่ (2.5) ซึ่งจะพบว่า ระบบอลวนการกระตุกแบบใหม่ที่มี 3 พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนี้

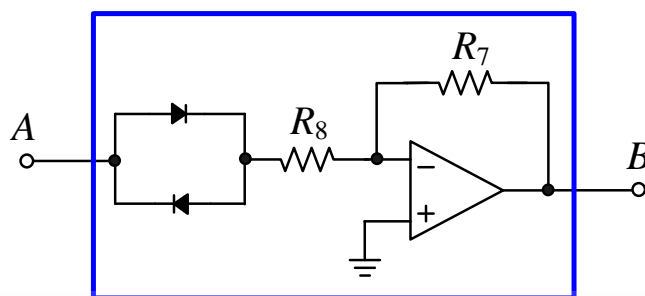
$$D_{KY} = 2 + \frac{0.110367 + 0.003313}{|-0.313680|} = 2.3624 \quad (3.8)$$

3.3.3 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนของระบบการกระตุก

งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม PSIM (Power Simulation) ในการทดสอบวงจรจากสมการที่แสดงรูปแบบวงจรที่ออกแบบดังรูปที่ 3.9 ซึ่งประกอบด้วย เอาต์พุต 3 ตำแหน่ง อินทิเกรเตอร์ 3 ตัว อินเวอร์เตอร์ 2 ตัว และ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Hyperbolic Sine 1 ตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.9 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันการกระตุ้นรูปแบบใหม่ด้วยฟังก์ชันไม่เปิดเชิงเส้น $\sinh(x)$

(ก) ภาพรวมวงจรถูกกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน (ข) วงจรฟังก์ชันไม่เปิดเชิงเส้น $\sinh(x)$

จากรูปที่ 3.9 สามารถแสดงค่าองค์ประกอบของวงจรและจำนวนได้ดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ตารางค่า RC ของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน ในรูปที่ 3.5

ส่วนประกอบ RC	ค่า
$R_1, R_2, R_4, R_6, R_7, R_8, R_{a1}, R_{a2}, R_{b1}, R_{b2}$	$10 \text{ k}\Omega$
R_3	$5.988 \text{ k}\Omega$
R_5	$50 \text{ k}\Omega$
C_1, C_2, C_3	100 nF

ตารางที่ 3.4 สรุปจำนวนอุปกรณ์จากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน

อุปกรณ์	จำนวน (ตัว)
OPAMP	5
Resistor	12
Capacitor	3
Diode	2

ในงานนี้นำเสนอระบบออสซิลเลชันการกระตุ้นแบบใหม่ โดยใช้ฟังก์ชันไม่เปิดเชิงเส้น $\sinh(x)$ ในระบบออสซิลเลชันการกระตุ้นเป็นระบบที่มีความอิสระในการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันไม่เปิดเชิงเส้นของระบบ ทำให้ได้ระบบออสซิลเลชันรูปแบบใหม่ ในระบบที่นำเสนอมีความซับซ้อน $D_{KY}=2.3624$ ในงานนี้มีการออกแบบวงจรโดยใช้ ออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์หลัก จำนวน 5 ตัว ตัวต้านทาน 12 ตัว ตัวเก็บประจุ 3 ตัว ไดโอด 2 ตัว ในระบบการกระตุ้น ในสมการที่ 3 เป็นสมการที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ควบคุม และพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนในสมการที่ 1 และ 2 มีเพียงตัวแปรแสดง 1 ตัวเท่านั้น ทำให้การออกแบบวงจรมีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

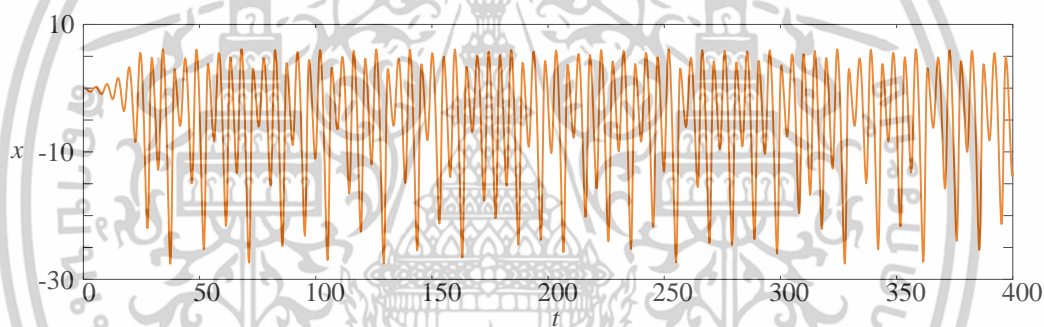
3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวน Sprott N ด้วย FPAA [56]

3.4.1 แบบจำลองอลวนต้นแบบของระบบ Sprott N

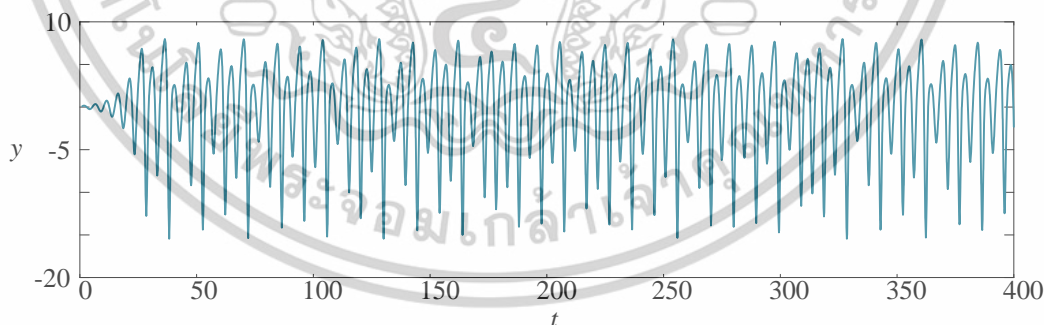
ในปี ค.ศ. 1994 Sprott ได้นำเสนอ ระบบอลวนอันดับสาม รูปแบบใหม่ 19 ระบบโดยตั้งชื่อระบบ A จนถึง S ในงานวิจัยนี้เลือกนำเอาระบบอลวน N ของ Sprott มาเป็นต้นแบบในการศึกษาและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วย FPAA แสดงสมการของระบบอลวน Sprott N ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -2y \\ \dot{y} &= x + z^2 \\ \dot{z} &= 1 + y - 2z \end{aligned} \quad (3.9)$$

จากสมการระบบอลวน Sprott N ประกอบไปด้วย 6 พจน์ โดยมีพจน์ไม่เป็นเชิงเส้น 1 พจน์ และค่าคงที่ 1 พจน์ เมื่อกำหนดให้ ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ $x_0=0.1, y_0=0.1$ และ $z_0=0.1$ แสดงลักษณะเอาต์พุตบนแกนเวลา ดังรูปต่อไปนี้

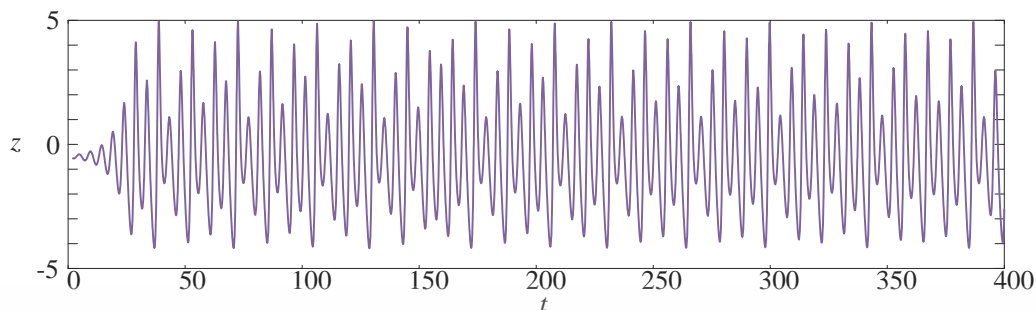


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 3.10 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบ Sportt N

(ก) เอาต์พุตสัญญาณสเตรจ x (ข) เอาต์พุตสัญญาณสเตรจ y (ค) เอาต์พุตสัญญาณสเตรจ z

3.4.2 การปรับขนาดสัญญาณให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ FPAA ของระบบ Sprott N

ในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วย อุปกรณ์ FPAA นั้นในบางกรณีนั้นไม่อาจทำระบบอลวนที่ออกมาใช้เป็นสมการต้นแบบในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณได้โดยตรงเนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ในเรื่องระดับแรงดัน ทางฝั่งเอาต์พุตไม่เพียงพอต่อการสร้างสัญญาณให้สมบูรณ์ ทำให้ได้สัญญาณในลักษณะ Saturate

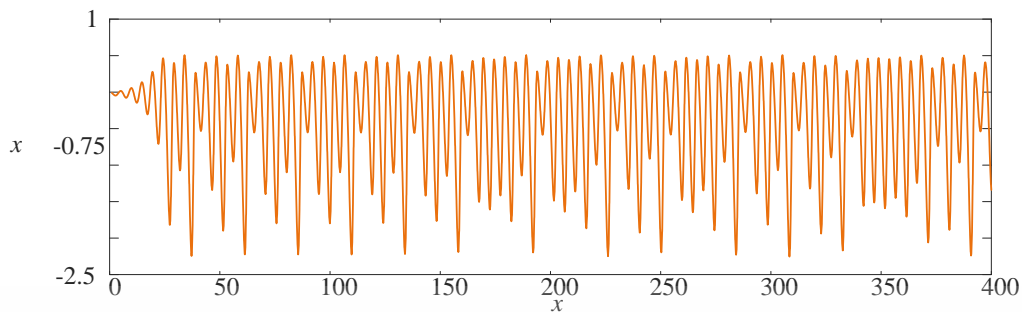
ช่วงการทำงานของอุปกรณ์ FPAA อินพุต/เอาต์พุต อยู่ในช่วง ± 3 โวลต์ จากรูปที่ 3.10 ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของ ตัวแปรสเตรจ x , y และ z มีขนาด เกินกว่าช่วงการทำงานของอุปกรณ์ FPAA จากปัญหาที่ผลจึงต้องทำการ ปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุตลงให้อยู่ในช่วงการทำงานของอุปกรณ์ FPAA ดังแสดงอัตราส่วนดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u &= \frac{x}{12} \\ v &= \frac{y}{9} \\ w &= \frac{z}{3} \end{aligned} \quad (3.10)$$

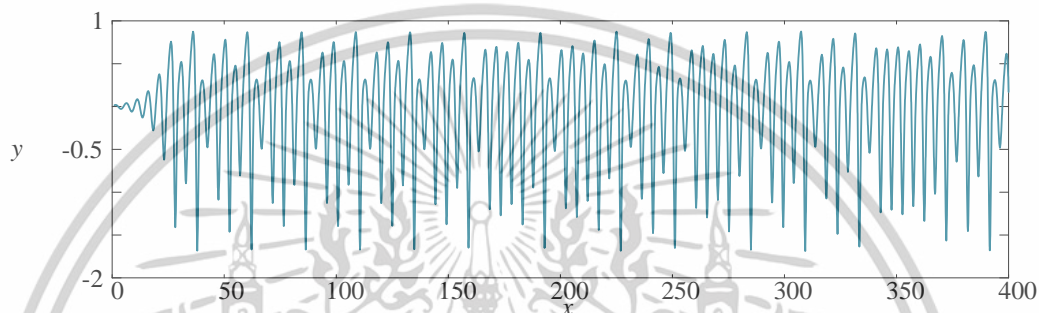
จากอัตราส่วนการปรับขนาดสัญญาณเอาต์พุตในสมการที่ (3.10) จะได้สมการตัวแปรสเตรจใหม่เป็น u , v และ w แสดงสมการของระบบอลวนหลังจากปรับขนาด ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{u} &= -1.5v \\ \dot{v} &= 1.33u + w^2 \\ \dot{w} &= 0.33 + 3v - 2w \end{aligned} \quad (3.11)$$

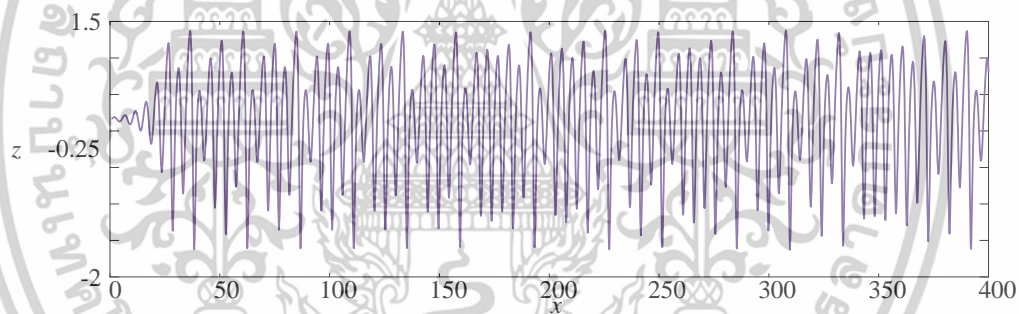
แสดงลักษณะเอาต์พุตบนแกนเวลาและตัวตั้งจุด จากระบบสมการที่ถูกรับปรับขนาดแล้ว ดังรูปต่อไปนี้



(ก)



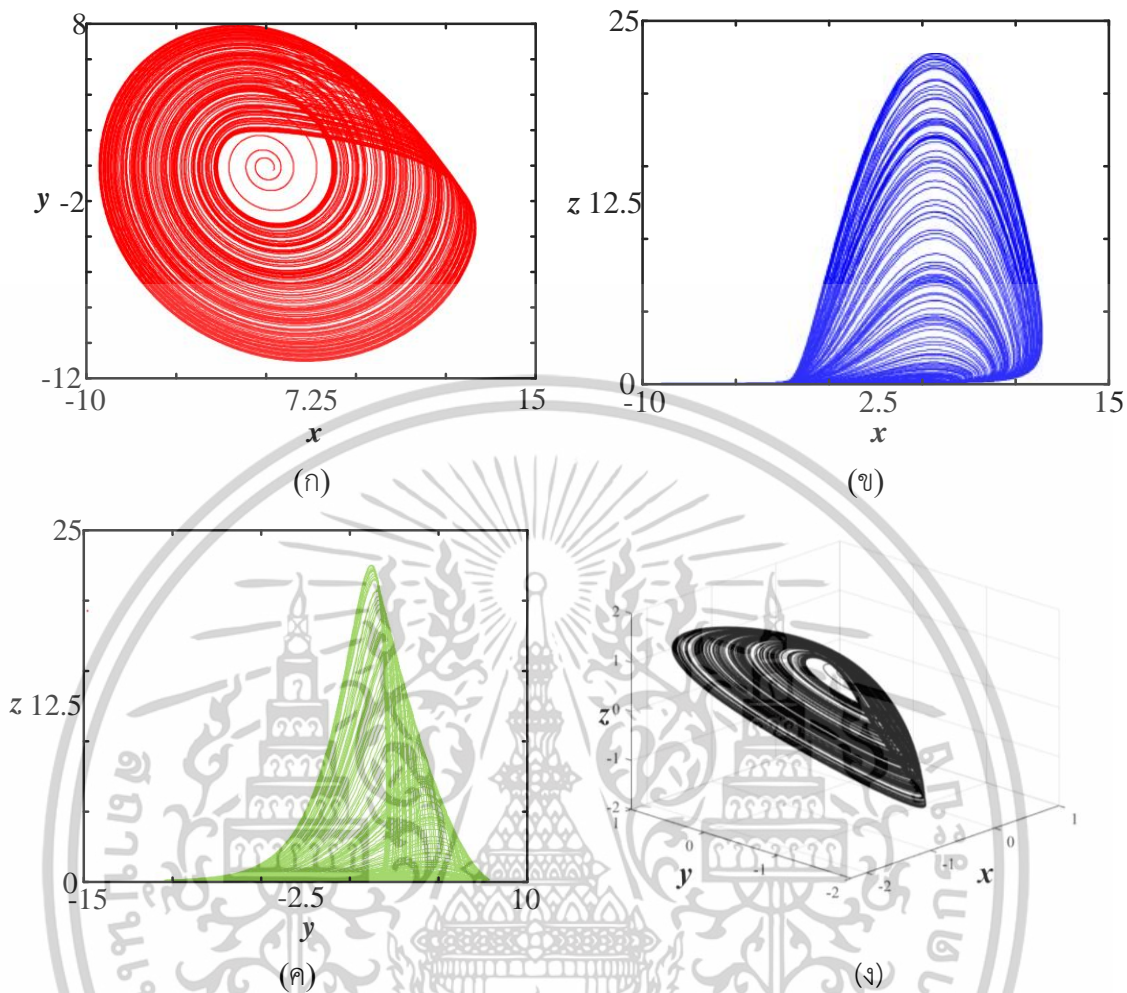
(ข)



(ค)

รูปที่ 3.11 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาหลังการปรับขนาดของระบบ Sportt N
 (ก) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ x (ข) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ y (ค) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ z

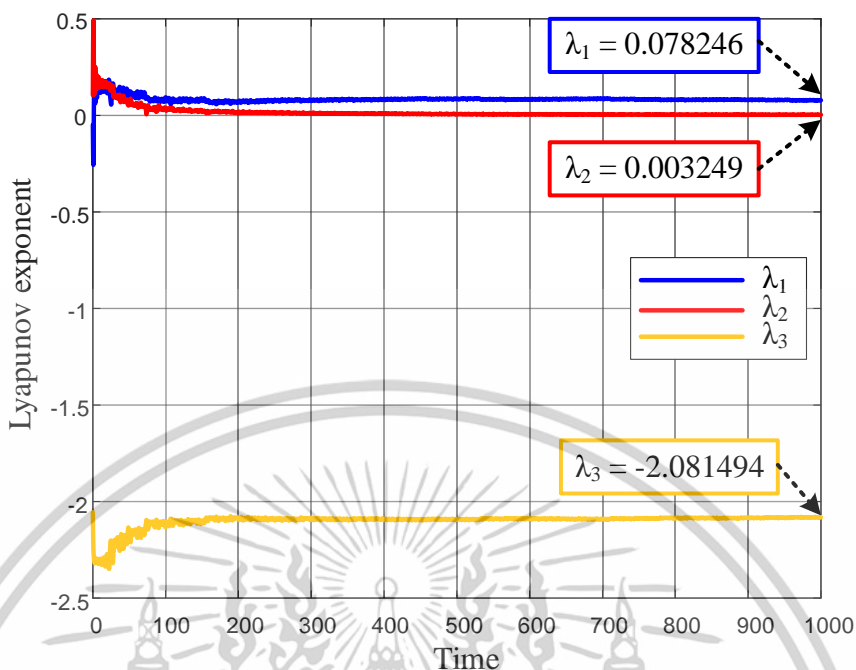
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 เอตต์พุดตัวดึงดูดของระบบลอวน Sprott N
 (ก) ตัวดึงดูด ระนาบ x - y (ข) ตัวดึงดูด ระนาบ x - z (ค) ตัวดึงดูด ระนาบ y - z
 (ง) ตัวดึงดูดรูปแบบ 3 มิติ

3.4.3 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke ของระบบ Sprott N

จากทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.2.3 ที่กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณความซับซ้อนของระบบลอวน จากค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov แสดงดังรูปต่อไปนี้



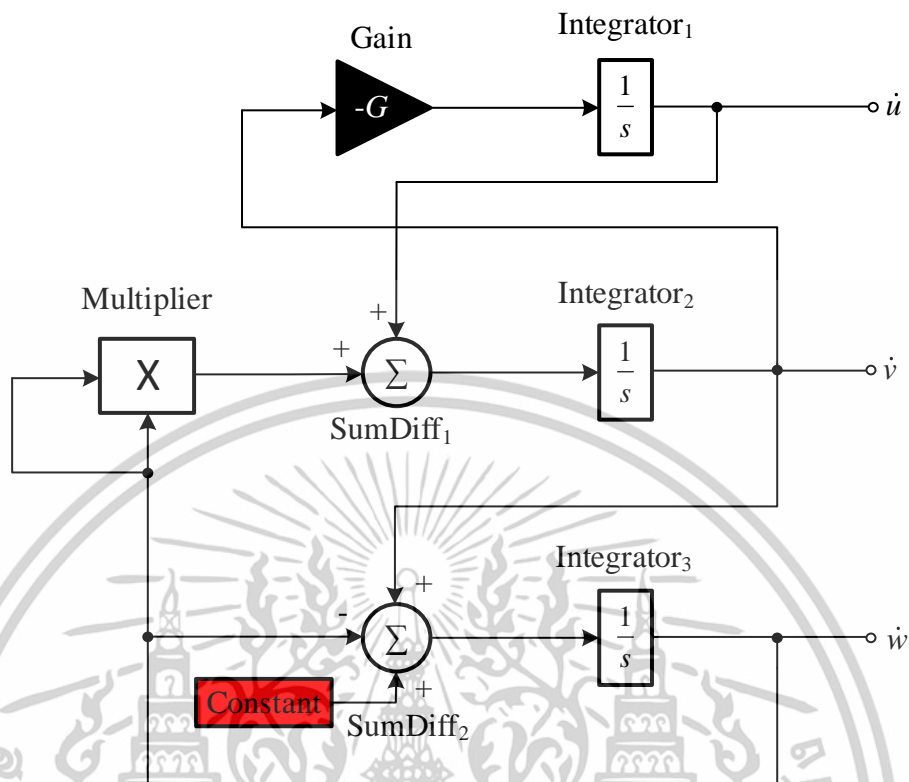
รูปที่ 3.13 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบอลวน Sprott N

จากรูปที่ 3.13 มีค่า เลขชี้กำลัง Lyapunov ดังนี้ $\lambda_1=0.078246$, $\lambda_2=0.003249$ และ $\lambda_3=-2.081494$ สามารถคำนวณความซับซ้อนของระบบได้จากสมการที่ (2.5) ซึ่งจะพบว่าระบบอลวน Sprott N ได้ดังนี้

$$D_{KY} = 2 + \frac{0.078246 + 0.003249}{|-2.081494|} = 2.036 \quad (3.12)$$

3.4.4 วงจรกำเนิดสัญญาณของระบบ Sprott N

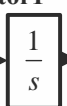


งานวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์ FPAA ในการออกแบบ เป็นพื้นฐานในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน โดยออกแบบระบบสมการที่ได้หลังจากการปรับขนาดระดับสัญญาณให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ FPAA สมการที่ (3.11) สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมจากการออกแบบบนโปรแกรม Anadigm ดังรูปต่อไป



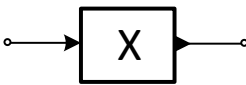
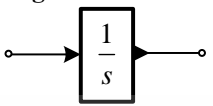
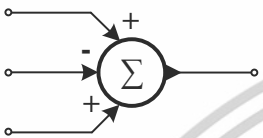
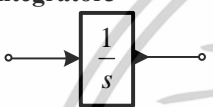

รูปที่ 3.14 แผนภาพการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลเตอร์ Sportt N บน FPGA

การสร้างสัญญาณออสซิลเลเตอร์จาก FPGA ในแต่ละบล็อกจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าเฉพาะตัวของแต่ละบล็อก ตามที่ออกแบบไว้โดยจากสมการที่ได้ทำการปรับค่า ดังสมการที่ (3.11) แสดงรายละเอียดการตั้งค่าของแต่ละบล็อก ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การตั้งค่าเฉพาะของแต่ละบล็อก

ชื่อ	คุณสมบัติ	พารามิเตอร์	ความถี่
Integrator1 	Polarity Non-inverting Input Sampling phase Phase 1 Compare Control To No Reset	Integration Const [1/us] 0.00250	Clock A 250 kHz (Chip Clock 3)
GainInv1 		Gain 1.50	Clock A 250 kHz (Chip Clock 3)
SumDiff1 	Output Phase Phase 2 Input1 Non-inverting Input2 Non-inverting Input3 off Input4 off	Gain 1 (Upperinput) 1.33 Gain 2 (Lowerinput) 1.00	Clock A 250 kHz (Chip Clock 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Multioier1 	Sample and Hold off	Multiplication Factor 1.00	Clock A 250 kHz (Chip Clock 3)
Integrator2 	Polarity Non-inverting Input Sampling phase Phase 2 Compare Control To No Reset	Integration Const [1/us] 0.00250	Clock A 250 kHz (Chip Clock 3)
SumDiff2 	Output Phase Phase 2 Input1 Non-inverting Input2 inverting Input3 Non-inverting Input4 off	Gain 1 (Upperinput) 2.00 Gain 2 (Middleinput) 3.00 Gain 3 (Lowerinput) 0.165	Clock A 250 kHz (Chip Clock 3)
Integrator3 	Polarity Non-inverting Input Sampling phase Phase 2 Compare Control To No Reset	Integration Const [1/us] 0.00250	Clock A 250 kHz (Chip Clock 3)
Voltage1 	Polarity Positive (+2V)		

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบอลวน Sportt N ที่เป็นหนึ่งในระบบที่ Sport นำเสนอ ด้วยวงจรอนาล็อกแบบปรับค่าได้ FPAA ในการสร้างวงจรถ้าเนิดสัญญาณด้วยอุปกรณ์ FPAA จำเป็นต้องปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงการทำงานของ FPAA ± 3 โวลต์ ในการออกแบบใช้โปรแกรม Anadigm ในรูปแบบบล็อกไดอะแกรม ประกอบไปด้วย อินทิเกรเตอร์ 3 ตัว ตัวคูณ 1 ตัว ตัวรวม 2 ตัว อัตราขยาย 1 ตัว และ ไฟตรง 1 ตัว

3.5 วงจรถ้าเนิดสัญญาณอลวน Chua ด้วย FPGA [57]

3.5.1 แบบจำลองอลวนต้นแบบของระบบ Chua

วงจรถ้าเนิดสัญญาณของ Chua เป็นวงจรถ้าเนิดสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นอย่างง่ายในการสร้างพฤติกรรมอลวนแบบ 2 วงม้วน วงจรถ้าเนิดสัญญาณของ Chua ได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นวงจรถ้าเนิดสัญญาณที่เรียบง่ายและเป็นสากล วงจรถ้าเนิดสัญญาณของ Chua สามารถเขียนเป็นสมการทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ดังนี้

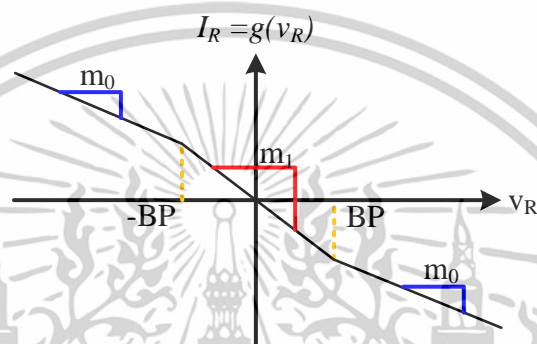
$$\begin{aligned}
 \frac{dv1}{dt} &= \frac{1}{c1}(G(v2 - v1) - f(v1)) \\
 \frac{dv2}{dt} &= \frac{1}{c2}(G(v1 - v2)) + i3 \\
 \frac{di3}{dt} &= -\frac{1}{L}v2
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

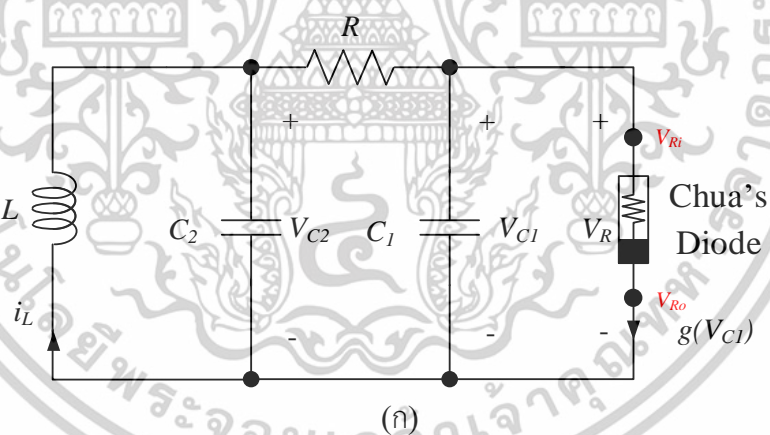
โดย v_1, v_2 แสดงถึงแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ตามลำดับ และ i_3 คือกระแสของตัวเหนี่ยวนำ L, G คือ การนำไฟฟ้าของตัวต้านทาน แสดงสมการของฟังก์ชัน $f(v_1)$ ในสมการ (3.14)

$$f(v_1) = m_1 v_1 + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)|v_1 + \beta p| - |v_1 - \beta p| \quad (3.14)$$

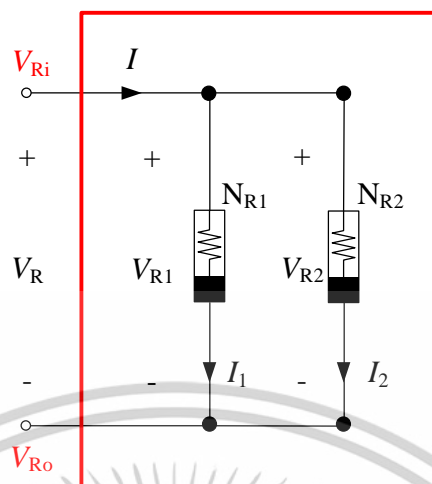
จากสมการที่ (3.14) m_1 และ m_0 คือความชันของพื้นที่ด้านในและด้านนอกตามลำดับ และ BP คือจุดแบ่งของพื้นที่ แสดงรูปตัวอย่างฟังก์ชันจากสมการที่ (3.14) ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 ลักษณะกราฟจากสมการไม่เป็นเชิงเส้นของ Chua



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

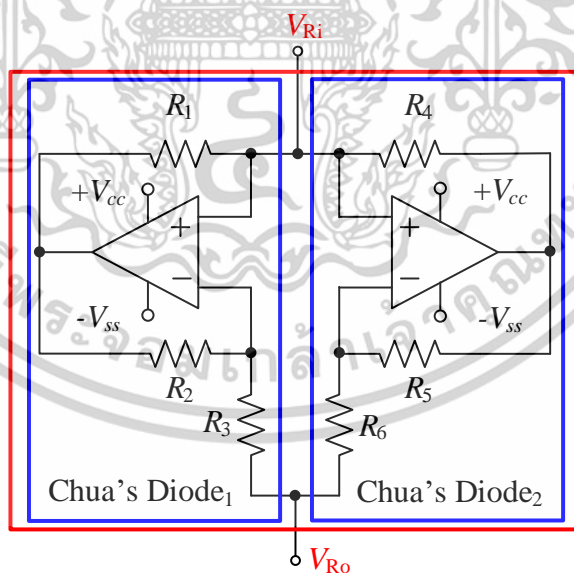


(ข)

รูปที่ 3.16 วงจรของ Leon Ong Chua

(ก) วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันหลักของ Chua (ข) วงจรไดโอด ของ Chua

วงจรของ Chua เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน ที่ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 และตัวเหนี่ยวนำ L และตัวต้านทาน R ดังแสดงในรูปที่ 3.16 แสดงตัวอย่างการออกแบบ Chua ไดโอด ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การออกแบบวงจรไดโอดของ Chua ด้วยออปแอมป์และตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.17 แสดงวงจรไดโอดของ Chua 2 วงจร ต่อขนานเข้าด้วยกันเพื่อทำหน้าที่เป็น ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นของระบบลอว์นของ Chua โดยวงจรไดโอดของ Chua แต่ละตัวทำหน้าที่เสมือนตัวต้านทานเชิงลบ กระแสที่ไหลผ่านไดโอดของ Chua แต่ละตัวจะมีค่า $I_1=f_1(V_{R1})$ และ $I_2=f_2(V_{R2})$ กระแสรวมที่ไหลผ่านจะมีค่าเท่ากับ $I=g(V_R)$ เมื่อ $g(V_R)=f_1(V_R)+f_2(V_R)$ ทำให้ได้สัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 3.15 ซึ่งประกอบไปด้วยความชัน 2 ค่า คือ m_0, m_1 และจุด Breakpoints (BP) เมื่อ กำหนดให้ $R_1=R_2, R_4=R_5$ และ E_{sat} แรงดันไฟเลี้ยงของออปแอมป์ แสดงสมการขององค์ประกอบแต่ละส่วน ดังต่อไปนี้

$$m_0 = -\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \quad (3.14)$$

$$m_1 = -\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_6} \quad (3.15)$$

$$\pm BP = \frac{R_6}{R_5 + R_6} (\pm E_{sat}) \quad (3.16)$$

จากแบบจำลองวงจรของ chua สามารถเขียนสมการของระบบลอว์นได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(y - x - f(x)) \\ \dot{y} &= x - y + z \\ \dot{z} &= -\beta y \end{aligned} \quad (3.17)$$

เมื่อ

$$f(x) = m_{2n-1}x + \frac{1}{2} \sum_{i=k}^{2n-1} (m_{i-1} - m_i)(|x + b_i| - |x - b_i|) \quad (3.18)$$

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบลอว์นของ Chua รูปแบบใหม่ที่สามารถสร้างเอาต์พุตตัวตั้งจุด รูปแบบ 2 วงม้วน 3 วงม้วน และ 4 วงม้วนได้ โดยการปรับปรุงฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ได้รูปแบบสัญญาณที่แตกต่างกันออกไป แสดงฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ที่ปรับปรุงดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันสำหรับ ตัวตั้งจุด 2 วงม้วน

$$f(x) = m_1x + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)(|x + b_1| - |x - b_1|) \quad (3.19)$$

ฟังก์ชันสำหรับ ตัวตั้งจุด 3 วงม้วน

$$f(x) = m_1x + \frac{1}{2}(m_1 - m_2)(|x + b_1| - |x - b_1|) + \frac{1}{2}(m_2 - m_3)(|x + b_2| - |x - b_2|) \quad (3.20)$$

ฟังก์ชันสำหรับ ตัวตั้งจุด 4 วงม้วน

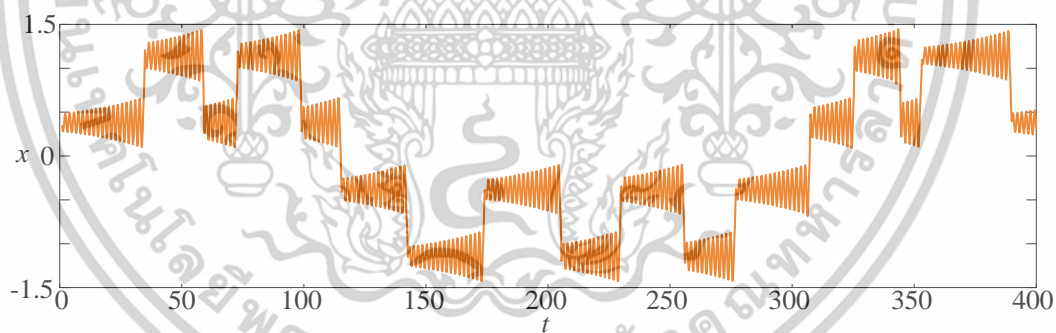
$$\begin{aligned}
 f(x) &= m_1 x + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)(|x + b_1| - |x - b_1|) \\
 &+ \frac{1}{2}(m_1 - m_2)(|x + b_2| - |x - b_2|) \\
 &+ \frac{1}{2}(m_2 - m_3)(|x + b_3| - |x - b_3|)
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

จากสมการฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น สมการที่ (3.21) ถึง สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวตั้งจุดแต่ละรูปแบบได้ ดังตารางต่อไปนี้

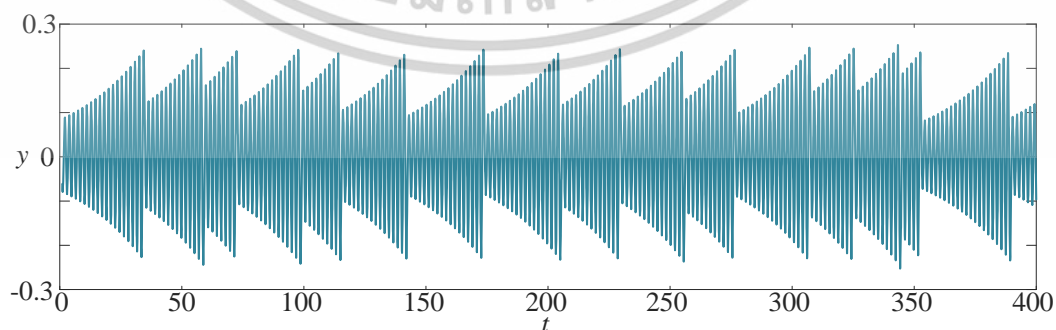
ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละรูปแบบของ ระบบอลวนของ Chua

รูปแบบตัวตั้งจุด	พารามิเตอร์ $\alpha=9, \beta=100/7$		
	ความชัน	ขอบเขต	เงื่อนไขเริ่มต้น
2-วงม้วน	$m_0=-3, m_1=-0.3$	$b_1=0.1$	$x_0=-0.2, y_0=0, z_0=0.2$
3-วงม้วน	$m_1=m_3=-0.3$ $m_2=-3$	$b_1=0.8, b_2=1.37$	$x_0=-0.3, y_0=0.1, z_0=0$
4-วงม้วน	$m_0=m_2=-3.036$ $m_1=m_3=-0.276$	$b_1=0.1, b_2=0.66$ $b_3=0.86$	$x_0=-0.1, y_0=0.1, z_0=0$

จากสมการที่ 3.11 แสดงรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาและตัวตั้งจุดรูปแบบ 4 วงม้วนดังรูปต่อไปนี้

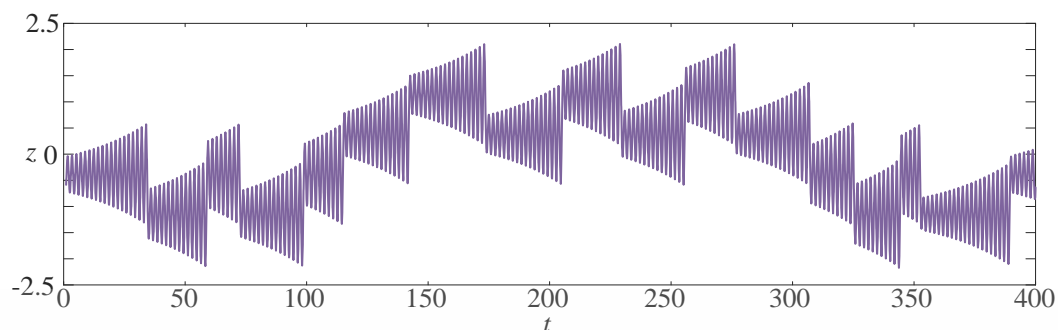


(ก)



(ข)

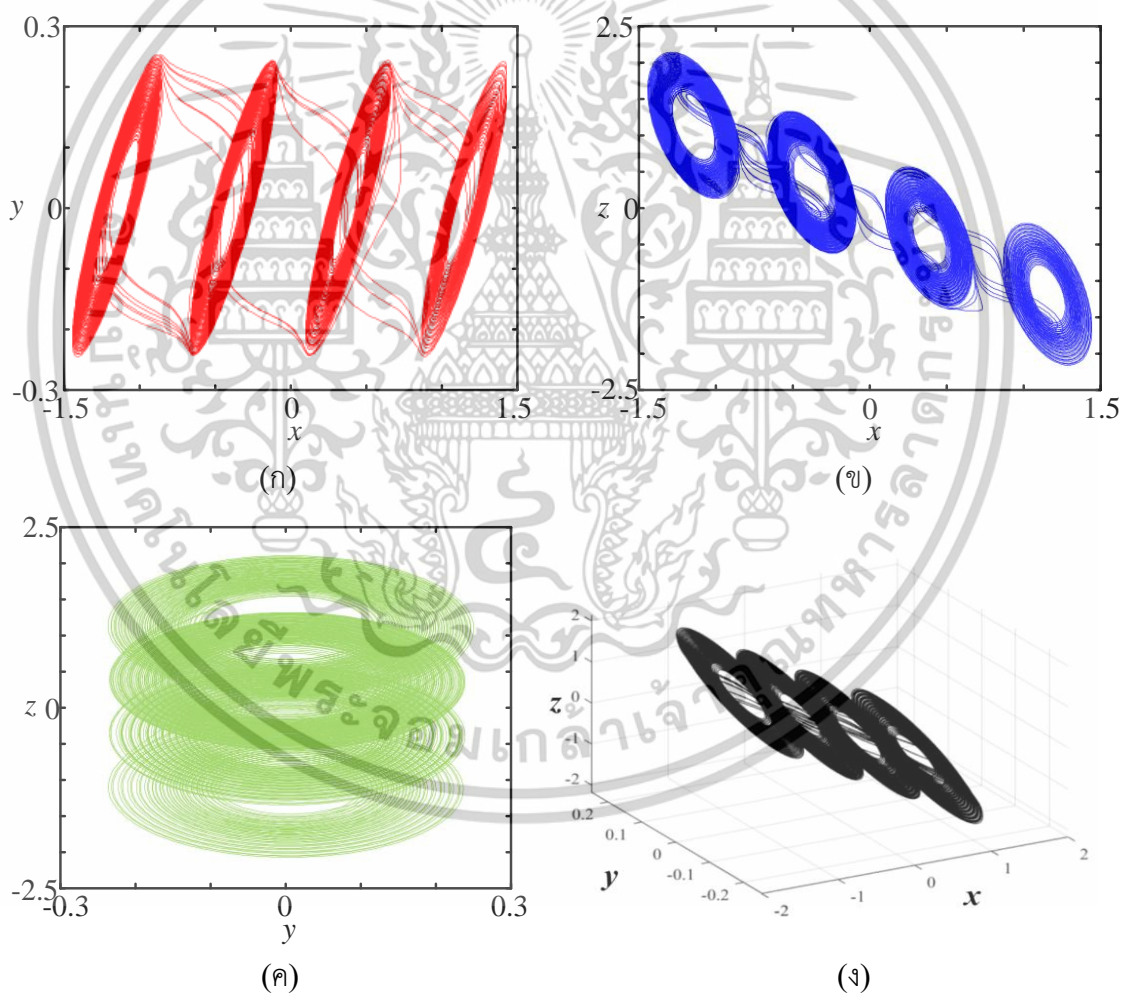
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 3.18 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบ Chua's

(ก) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ x (ข) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ y (ค) เอาต์พุตสัญญาณสแตจ z



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 3.19 เอาต์พุตตัวตั้งจุดของระบบออสซิลเลชันการกระตุ้นรูปแบบใหม่ที่มี 3 พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น

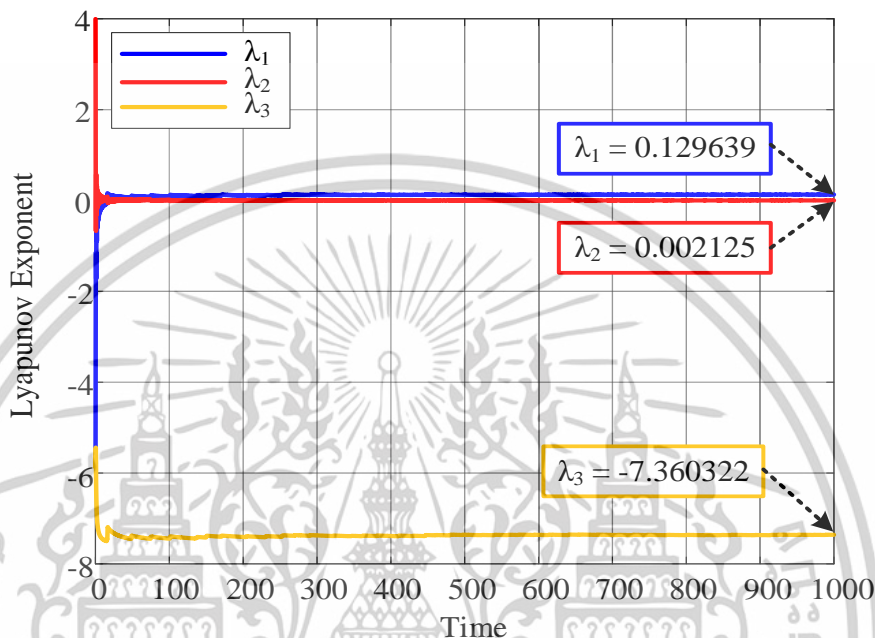
(ก) ตัวตั้งจุด ระนาบ x - y (ข) ตัวตั้งจุด ระนาบ x - z (ค) ตัวตั้งจุด ระนาบ y - z

(ง) ตัวตั้งจุดรูปแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การคาดเดาของ Kaplan และ Yorke ของระบบ Chua

จากทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.2.3 ที่กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณความซับซ้อนของระบบอลวน จากค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.20 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบอลวน Chua

จากรูปที่ 3.20 มีค่า เลขชี้กำลัง Lyapunov ดังนี้ $\lambda_1=0.129639$, $\lambda_2=0.002125$ และ $\lambda_3=-7.360322$ สามารถคำนวณความซับซ้อนของระบบได้จากสมการที่ ซึ่งจะพบว่า ระบบอลวนการกระตุกแบบใหม่ที่มี 3 พจน์ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนี้

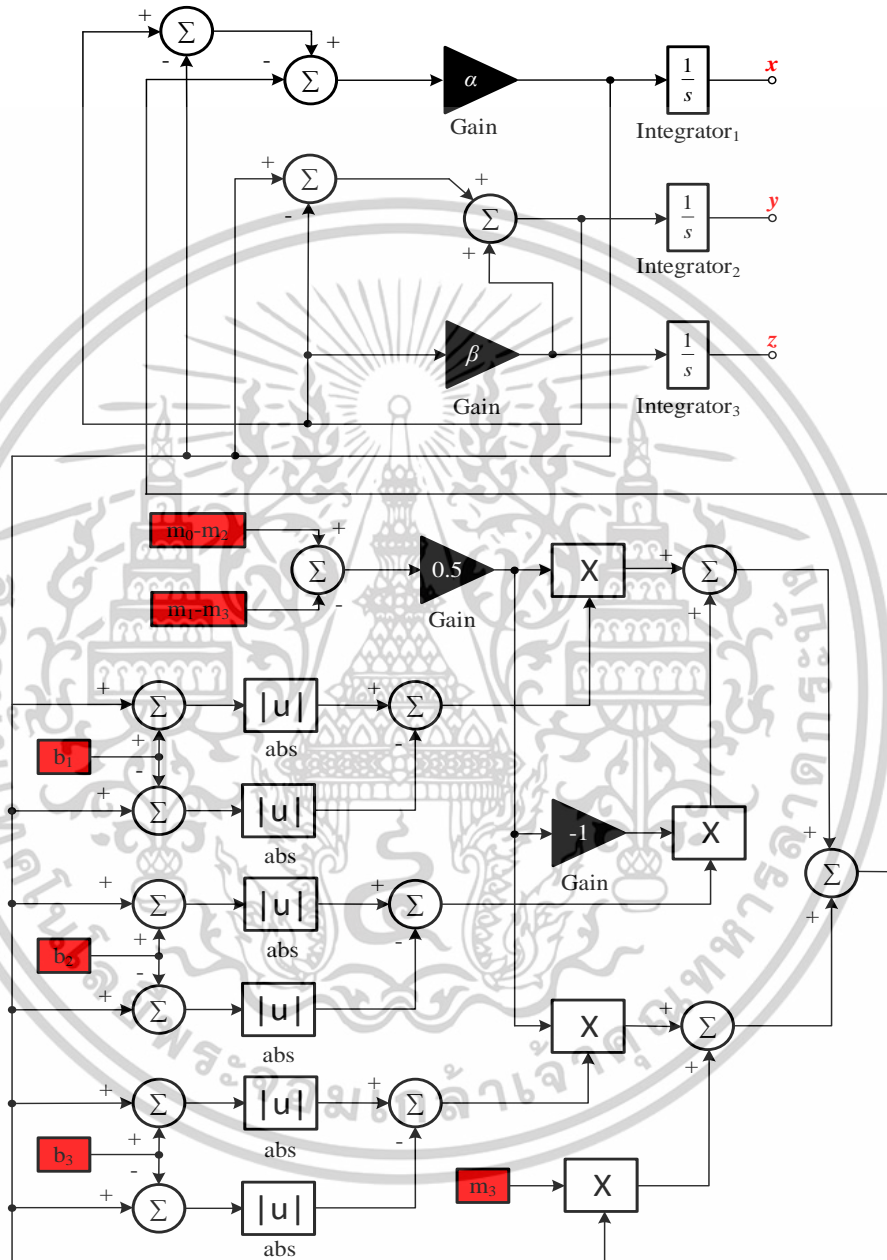
$$D_{KY} = 2 + \frac{0.129639 + 0.002125}{|-7.360322|} = 2.0179 \quad (3.22)$$

3.5.3 วงจรกำเนิดสัญญาณของระบบ Chua

งานวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์ FPGA มาประยุกต์ใช้ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน โดยออกแบบระบบผ่านเครื่องมือ Xilinx ซึ่งเป็นเครื่องมือในการออกแบบระบบกำเนิดสัญญาณ ซึ่งติดตั้งในโปรแกรมหลัก Matlab(Simulink) เครื่องมือ Xilinx ยังสามารถจำลองผลจากการออกแบบ การประมวลผลตรวจสอบอัลกอริธึมของฮาร์ดแวร์และสามารถปรับความเร็วของการจำลอง (Clock Speed) ซึ่งเปรียบเสมือนการทดสอบจริงบน อุปกรณ์ FPGA แสดงการออกแบบระบบอลวนของ Chua ในสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ (3.13) จากการออกแบบระบบบอวนของ Chua ในรูปที่ 3.21 ประกอบไปด้วย ตัวคูณ (Multiplied) ตัวบวก(adder) ซึ่งเป็นระบบ 32 บิต ประกอบไปด้วย 1 บิต สำหรับเครื่องหมาย 16 บิตสำหรับเสรีจส่วน และ 15 บิตสำหรับจำนวนเต็ม ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.21 แผนภาพการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณบอวนของ Chua บน FPGA

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบบอวนของ Chua รูปแบบหลายวงม้วน บน อุปกรณ์ FPGA จากการปรับรูปแบบฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของ Chua ทำให้ได้รูปแบบสัญญาณเอ๊าต์พุตที่แตกต่างไปจากเดิมในงานนี้ กรณีตัวตั้งจุด 4 วงม้วน มีค่าความซับซ้อน $D_{KY}=2.0179$ ในงานนี้ มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน บนเครื่องมือ Xilinx ในโปรแกรม MATLAB ในรูปแบบของ บล็อกไดอะแกรม ประกอบไปด้วยค่าคงที่ 6 ตัว ตัวบวก 13 ตัว ตัวลบ 3 ตัว ตัวคูณ 4 ตัว ค่าสัมบูรณ์ 6 ตัว อัตราขยาย 4 ตัว และ อินทิเกรเตอร์ 3 ตัว

3.6 บทสรุป

ในบทความนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่ถูกนำเสนอในอดีต โดยเลือกระบบที่มีความแตกต่าง 4 ระบบ มาใช้เป็นต้นแบบการศึกษาและเปรียบเทียบ ในด้านของจำนวนพจน์ของตัวแปรสแตจ ค่าคงที่ และความเป็นเชิงเส้น รวมถึงความอิสระในการปรับเปลี่ยนพจน์ความไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ได้ระบบอลวนรูปแบบใหม่ พร้อมทั้งประสิทธิภาพความซับซ้อนของแต่ละระบบ โดยรูปแบบของสมการของแต่ละระบบมีผลโดยตรงต่อความซับซ้อนในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ นอกจากการเลือกงานวิจัยต้นแบบที่มีระบบแตกต่างกันแล้ว ยังเลือกงานวิจัยที่มีความแตกต่างในด้านการออกแบบและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยวิธีการที่ต่างกันไป 2 รูปแบบ คือ ส่วนของวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน และส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบตั้งค่าได้ FPGA, FPAA

ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนนั้นมุ่งเน้นการออกแบบวงจรให้มีความเรียบง่าย ลดจำนวนอุปกรณ์ให้น้อยที่สุด เพื่อลดผลกระทบของความคาดเคลื่อนจากอุปกรณ์ต่อระบบ ในการปรับค่าพารามิเตอร์ให้ระบบเกิดสถานะไม่เสถียรหรือการเกิดสัญญาณอลวนที่ต้องมีความแม่นยำในการปรับค่าพารามิเตอร์จากคุณสมบัติอ่อนไหวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น จึงมีการนำเสนอวิธีการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้ อาทิเช่น FPGA, FPAA รวมไปถึงอุปกรณ์ประเภทไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้มีความแม่นยำในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ และปรับเปลี่ยนรูปแบบของระบบ และพจน์ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างอิสระ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้จึงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในปัจจุบัน

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอระบบอลวนรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนสูง พร้อมกับนำเสนอการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน ด้วยออปแอมป์ จากต้นแบบวงจรที่ถูกนำเสนอในอดีต ในหัวข้อที่ 3.2, 3.4 และ 3.5 นั้นเป็นระบบสมการที่ประกอบไปด้วยพจน์ ที่มีลักษณะของการคูณ ซึ่งจำเป็นต้องมีการนำอุปกรณ์ มัลติพลายเออร์เข้ามาใช้ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน แต่หากใช้อุปกรณ์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตั้งค่าได้นั้นจะไม่มีผลกระทบจากการใช้มัลติพลายเออร์ วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่นำเสนอ ออกแบบโดยหลีกเลี่ยงการใช้ มัลติพลายเออร์ในการออกแบบวงจร เพื่อลดความซับซ้อนขนาดรวมถึงลดต้นทุนในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน และประยุกต์ใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนเพื่อแก้ไขปัญหาความคาดเคลื่อนจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่างๆในบทต่อไป (บทที่ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยระบบอลวนการกระตุ้นรูปแบบใหม่ โดยออปแอมป์และอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างระบบอลวนรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนสูง จากพื้นฐานระบบอลวนการกระตุ้นและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน โดยระบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นจำนวน 2 ฟังก์ชัน ฟังก์ชันแรกเป็นฟังก์ชันพื้นฐาน *Signum* ซึ่งเคยถูกนำเสนอไว้ในงานวิจัยในอดีต ฟังก์ชันสองคือฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นใหม่ดัดแปลงจากฟังก์ชันสี่เหลี่ยม

ในส่วนของการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน 2 รูปแบบ คือ วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน ที่สามารถออกแบบได้เรียบง่ายโดยใช้พื้นฐานของวงจรของความถี่ *Tow-Thomas* นำมาออกแบบตามบล็อกไดอะแกรมของระบบอลวนแบบใหม่ที่นำเสนอภายในบทนี้ ด้วยอุปกรณ์ออปแอมป์ เบอร์ *LF347*, สวิตช์ *54HC4066* ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ โดยไม่มีการใช้ตัวคูณอนาล็อกภายในวงจรทำให้วงจรมีความเรียบง่าย ลดจำนวนอุปกรณ์ภายในวงจร และรูปแบบต่อมาเป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ในสร้างสัญญาณอลวน ด้วย *Arduino Mega 2560* ในรูปแบบดิจิทัลและนำมาแปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อกด้วยวงจร *R2R Ladder* ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบทั้ง 2 รูปแบบ เป็นอุปกรณ์ พื้นฐานที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายในเชิงพาณิชย์ พร้อมใช้ทฤษฎีการแยกออกไปสองทิศทาง ในการวิเคราะห์ช่วงพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการพัฒนารูปแบบของตัวดึงดูดและนำทฤษฎีเลขชี้กำลัง *Lyapunov* ในการวิเคราะห์อัตราการแยกตัวของวิถีวงโคจรออกมาเป็นปริมาณเชิงตัวเลข ค่าที่ได้จากทฤษฎีเลขชี้กำลัง *Lyapunov* นำมาใช้ในการคำนวณค่าความซับซ้อนของระบบอลวนเป็นปริมาณเชิงตัวเลข โดยทฤษฎีการคาดเดาของ *Kaplan* และ *Yorke* ซึ่งทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบถูกกล่าวไว้ในบทที่ 2

4.2 ระบบอลวนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการออกแบบระบบอลวนรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนสูงที่มีลักษณะของเอาต์พุตตัวดึงดูดแบบหลายวงม้วน บนพื้นฐานของระบบการกระตุ้น โดยกล่าวในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหัวข้อที่ 3.3 จากงานวิจัยนี้ทำให้เราทราบถึงคุณสมบัติของระบบอลวนการกระตุ้นที่มีความอิสระของการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างอิสระ ต่างจากระบบอลวนแบบอื่นๆ ซึ่งมีความเฉพาะเจาะจง

ของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นของระบบนั้นๆ ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างอิสระเช่นเดียวกับระบบลอวนการ
กระทุก

ระบบลอวนที่นำเสนอมีการปรับปรุงจากระบบแบบเดิมในสมการที่ 3.5 โดยการเพิ่มฟังก์ชันไม่เป็น
เชิงเส้นจากเดิมที่มี 1 ตำแหน่ง Dimension z ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{z} = -Az - By - g(x) \quad (4.1)$$

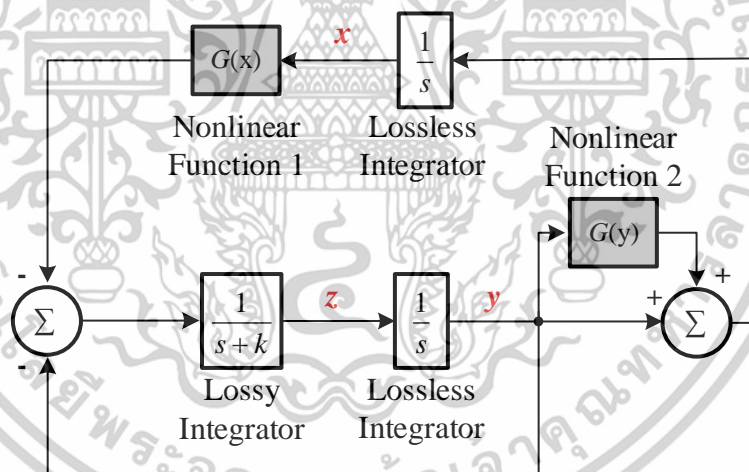
โดย $G(x)$ คือฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น จากเดิมที่มีฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นเพียง 1 ตำแหน่ง ใน
วิทยานิพนธ์นี้เพิ่มฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ Dimension x อีก 1 ตำแหน่ง เพื่อให้ได้ระบบรูปแบบใหม่
และมีประสิทธิภาพด้านความซับซ้อนของระบบเพิ่มมากขึ้น พร้อมทั้งความสามารถในการสร้างตัวดึงดู
แบบหลายวงม้วน แสดงสมการของระบบดังต่อไปนี้

$$\dot{x} = y + g(y) \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) จะได้สมการของระบบลอวนการกระทุกรูปแบบที่นำเสนอดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y + g(y) \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= -kz - y - g(x) \end{aligned} \quad (4.3)$$

สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมของระบบลอวนรูปแบบที่นำเสนอจากสมการที่ (4.3) ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบลอวนการการกระทุกรูปแบบที่นำเสนอ

จากรูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบลอวนการการกระทุกรูปแบบใหม่ ซึ่งประกอบไปด้วย
อินทิเกรเตอร์ ตัวรวม และส่วนของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น 2 ตำแหน่ง โดยปรับปรุงรูปแบบของ
บล็อกไดอะแกรมจากเดิม แสดงดังรูปที่ 3.5 ที่ใช้อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย (Lossless Integrator) ทำ
ให้ต้องมีบล็อกของอัตราขยาย (k) แยกออกมา ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีการนำเสนอรูปแบบของ
บล็อกไดอะแกรมที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ โดยใช้พื้นฐานของวงจรกรองความถี่ Two-Thomas ที่มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ อินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย (Lossy Integrator) ที่สามารถปรับค่าอัตราขยายได้ในตัว ทำให้สามารถลดจำนวนบล็อกโคเดแกรมและอุปกรณ์ของวงจรลงได้

4.3 ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

จากที่กล่าวมาข้างต้นในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีการใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น 2 ตำแหน่ง ประกอบไปด้วย ฟังก์ชัน $G(x)$ และ $G(y)$ แสดงตำแหน่งของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.1 แสดงสมการของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ ดังสมการต่อไปนี้

สมการของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นตัดแปลง Signum

$$f_1(x) = Ax - B \operatorname{sgn}(x) \quad (4.4)$$

หรือสามารถเขียนในอีกรูปแบบได้ดังนี้

$$f_1(x) = Ax - B \tanh(1000x) \quad (4.5)$$

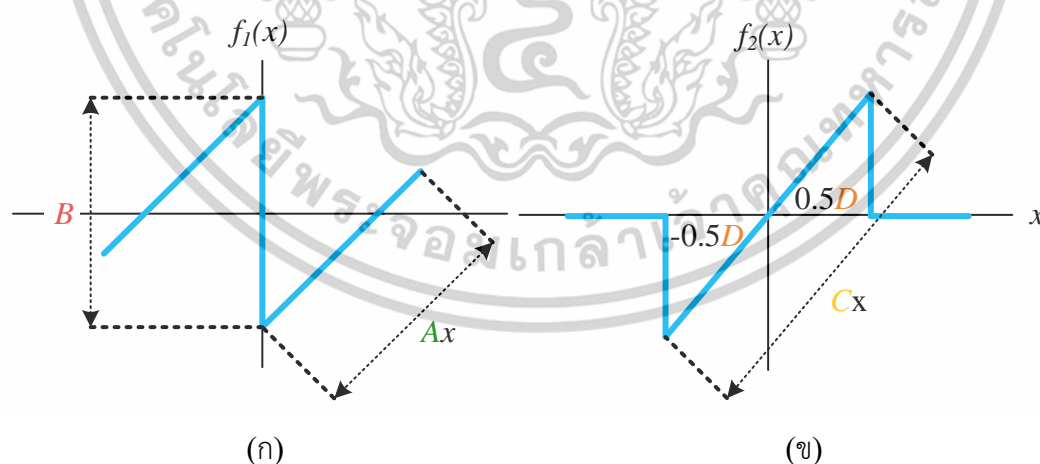
สมการของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นตัดแปลงสี่เหลี่ยม

$$f_2(x) = Cx \cdot \operatorname{Rect}(Dx) \quad (4.6)$$

หรือสามารถเขียนในอีกรูปแบบได้ดังนี้

$$f_2(x) = Cx \cdot \frac{1}{2} \left(\tanh\left(100x + \frac{50}{D}\right) - \tanh\left(100x - \frac{50}{D}\right) \right) \quad (4.7)$$

โดยลักษณะฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปต่อไปนี้

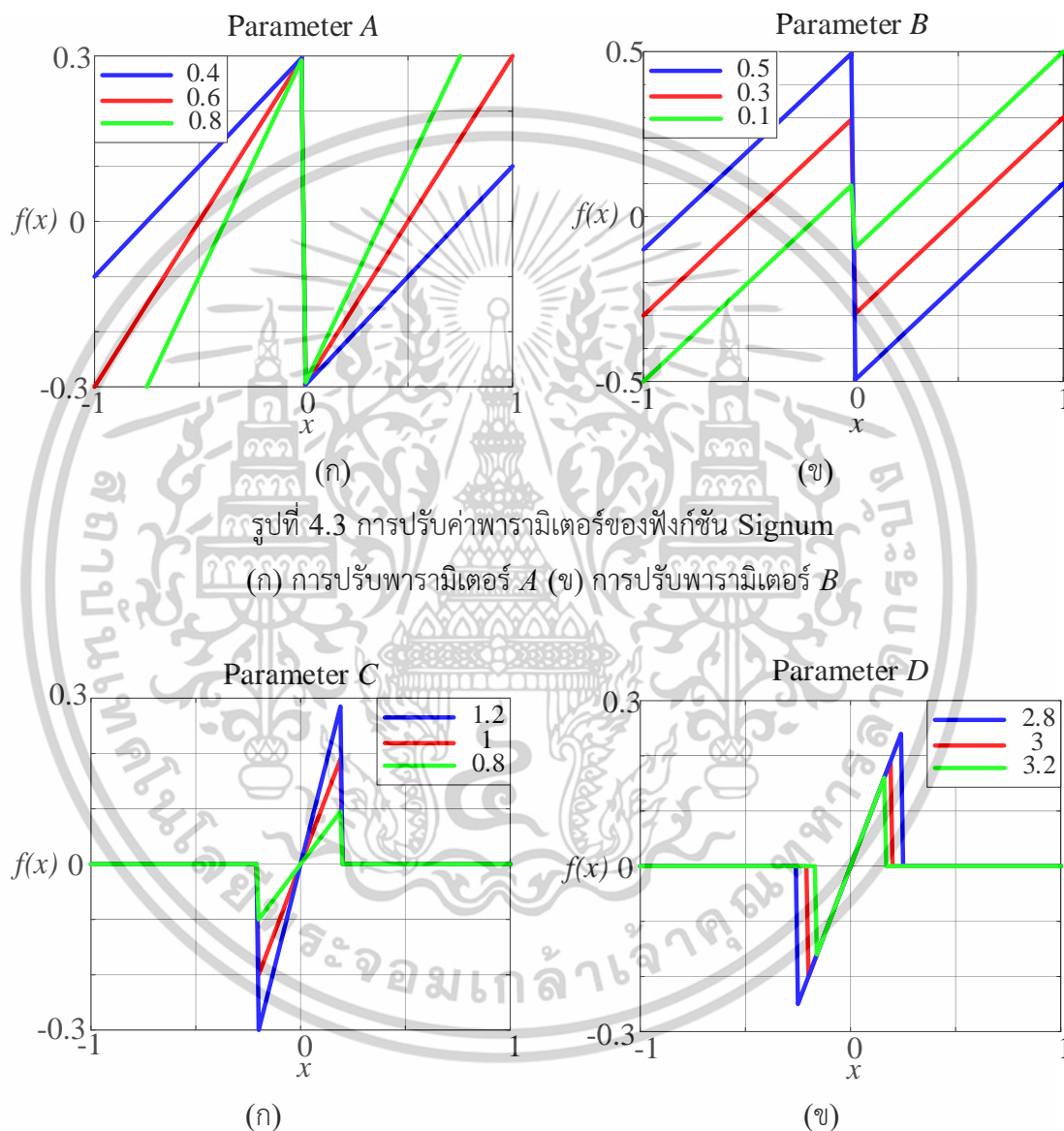


รูปที่ 4.2 ลักษณะของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่นำเสนอ

(ก) ฟังก์ชันตัดแปลง Signum (ข) ฟังก์ชันตัดแปลงสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ที่นำเสนอภายในระบบบอวลวนรูปแบบใหม่ โดยฟังก์ชันในรูป (ก) เป็นฟังก์ชันดั้งเดิมที่เคยมีการนำเสนอมาก่อนในอดีตเป็นฟังก์ชันพื้นฐานของแบบระบบบอวลวนการกระตุก และในรูป (ข) เป็นฟังก์ชันรูปแบบใหม่ที่น่าสนใจ ดัดแปลงจากฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Rectangular) แสดงตัวอย่างการปรับค่าพารามิเตอร์ของ ทั้ง 2 ฟังก์ชันดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชัน Signum

(ก) การปรับพารามิเตอร์ A (ข) การปรับพารามิเตอร์ B

รูปที่ 4.4 การปรับค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันดัดแปลงสี่เหลี่ยม

(ก) การปรับพารามิเตอร์ C (ข) การปรับพารามิเตอร์ D

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงรูปแบบการปรับค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแต่ละตัว โดยรูปที่ 4.3 (ก) เป็นการปรับความชันของกราฟ ด้วยพารามิเตอร์ A (ข) เป็นการปรับความสูงของกราฟ ด้วย

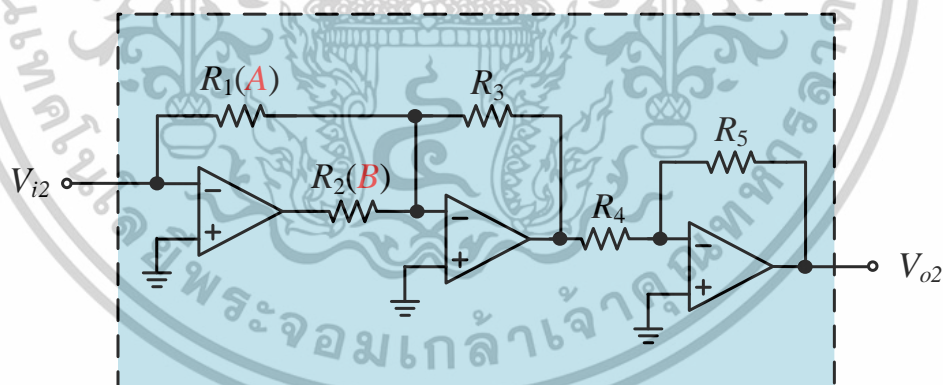
พารามิเตอร์ B ของฟังก์ชัน Signum และรูปที่ 4.4 (ก) เป็นการปรับความชันของกราฟ (ข) เป็นการปรับความกว้างของฟังก์ชัน ดัดแปลงสี่เหลี่ยม ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นแต่ละฟังก์ชัน นั้นส่งผลต่อรูปร่างและขนาดของสัญญาณเอาต์พุต รวมไปถึงช่วงการเกิดสัญญาณอลวน โดยสามารถวิเคราะห์ช่วงที่เกิดความอลวนของระบบ ได้จากทฤษฎีการแยกออกไปสองทิศทางในหัวข้อที่ 2.2.1

4.4 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนการกระตุ้นรูปแบบใหม่

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนการกระตุ้นที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบโดยออกแบบด้วยอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในได้การตั้งค่าได้และตั้งค่าไม่ได้ โดยอุปกรณ์ที่ตั้งค่าไม่ได้ นำเสนอการออกแบบวงจรด้วยออปแอมป์ และอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้ ออกแบบโดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 แสดงการออกแบบวงจรทั้ง 2 รูปแบบดังหัวข้อต่อไปนี้

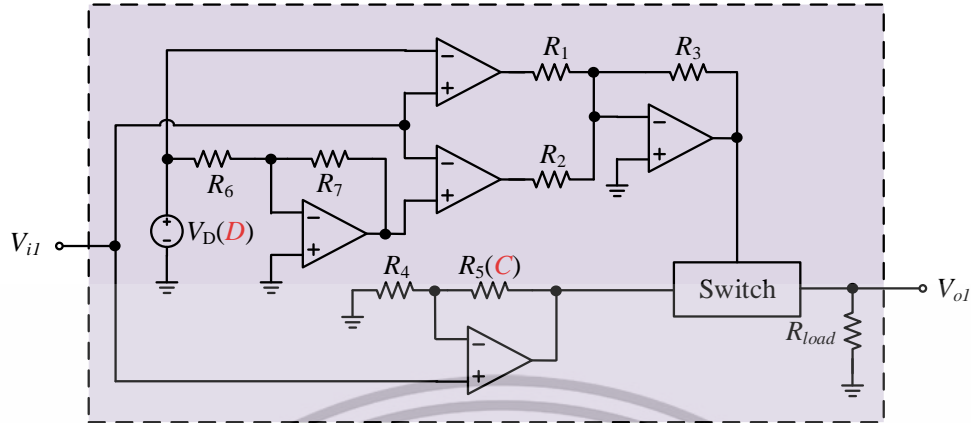
4.4.1 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยออปแอมป์

ในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณด้วยออปแอมป์ ซึ่งแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของการออกแบบวงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นทั้ง 2 ฟังก์ชัน คือวงจรฟังก์ชันดัดแปลง Signum ($G(y)$) วงจรฟังก์ชันดัดแปลงสี่เหลี่ยม ($G(x)$) จากสมการ ที่ (4.4) และ (4.6) ใช้อุปกรณ์ออปแอมป์ LF347 ร่วมกับ สวิตช์ 54HC4066 และอุปกรณ์พาสซีฟ RC แสดงดังรูปต่อไปนี้



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

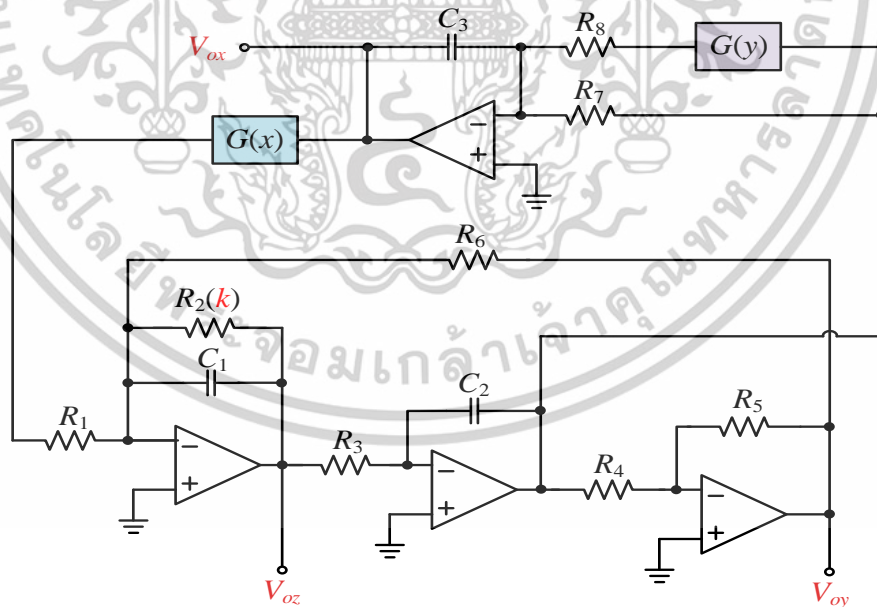


(ข)

รูปที่ 4.5 วงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

(ก) วงจรฟังก์ชันตัดแปลง Signum (ข) วงจรฟังก์ชันตัดแปลงสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.5 (ก) ฟังก์ชันตัดแปลง Signum สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ A และ B ของได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ R_1 และ R_2 ตามลำดับ ในรูปที่ 4.5 (ข) ฟังก์ชันตัดแปลงสี่เหลี่ยม สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ C ได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้ R_5 และ พารามิเตอร์ D ปรับได้จากแรงดันเทอร์ชโฮลด์ V_D ส่วนที่สองเป็นส่วนของวงจรหลักในการการวงจรถ้าเนตสัญญาณออลวนถูกออกแบบเพื่อยืนยันหลักการสร้างจากบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.6 วงจรกำเนิดสัญญาณออลวนหลักที่สามารถปรับค่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 แสดงวงจรส่วนหลักที่นำเสนอ โดยออกแบบจากพื้นฐานวงจรกรองความถี่ Tow-Thomas สามารถปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณได้จากสัมประสิทธิ์ k จากการปรับค่าตัวต้านทานที่จุด R_2 หรือเรียกว่า Quality Factor ของคุณสมบัติวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง แสดงสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{V_{oy}}{V_{oi}} = - \frac{1}{R_3 R_1 C_1 C_2} \frac{1}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_2 C_1} \right) + \frac{1}{C_1 C_2 R_6 R_3}} \quad (4.10)$$

สามารถวัดสัญญาณเอาต์พุตได้ทั้ง 3 สเตจ คือ สเตจ x , y และ z ที่ V_{ox} , V_{oy} , V_{oz} ตามลำดับ แสดงค่าของอุปกรณ์ RC และจำนวนอุปกรณ์วงจรส่วนย่อยและวงจรส่วนหลักในรูปที่ 4.5 (ก), (ข) และ (ค) ดังตาราง ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าส่วนประกอบ RC ของวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันหลัก

ส่วนประกอบ RC	ค่า
$R_1, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$	$1k\Omega$
$R_1(k)$	$10k\Omega$
C_1, C_2, C_3	$10nF$

ตารางที่ 4.2 ค่าส่วนประกอบ RC ของวงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นตัดแปลงสี่เหลี่ยม ($G(x)$)

ส่วนประกอบ RC	ค่า
R_1, R_2, R_3, R_4, R_6	$10k\Omega$
$R_5(C)$	$10k\Omega$
R_7	$5k\Omega$
RV_8	$100k\Omega$

ตารางที่ 4.3 ค่าส่วนประกอบ RC ของวงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum ($G(y)$)

ส่วนประกอบ RC	ค่า
$R_1(A)$	$10k\Omega$
$R_2(B)$	$100k\Omega$
R_3	$3.1k\Omega$
R_4, R_5	$10k\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

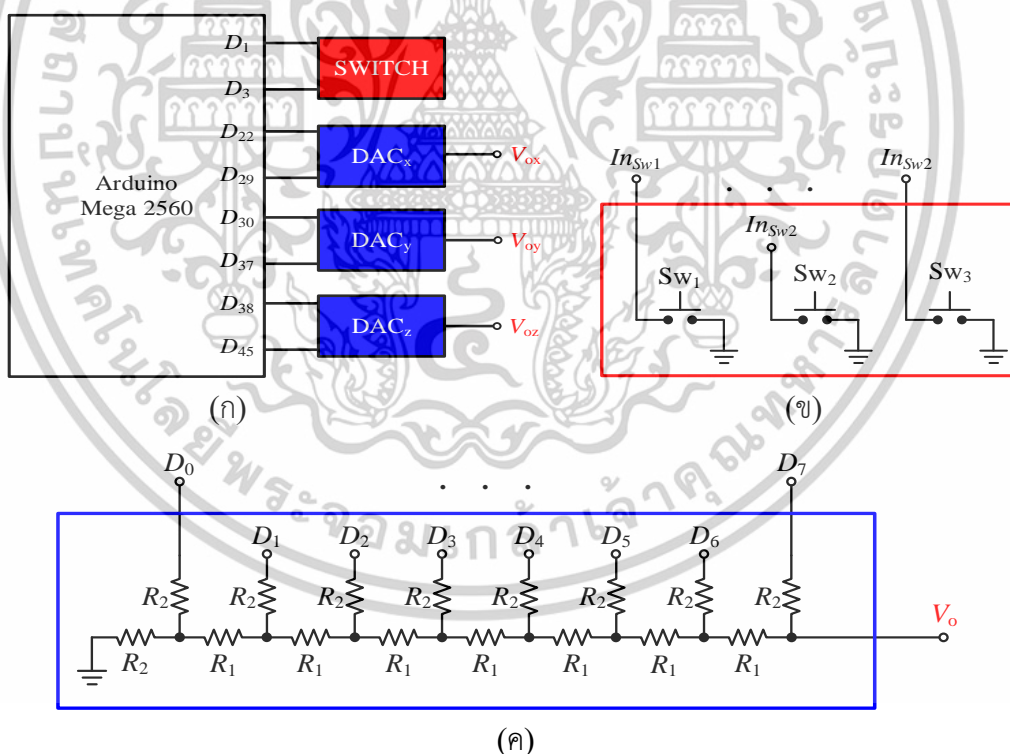
จากตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 สามารถสรุปอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยออปแอมป์ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 อุปกรณ์ส่วนประกอบของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบใหม่ที่นำเสนอ

อุปกรณ์	จำนวน (ตัว)
OPAMP	13
Logic Switch	1
Resistor Variable	5
Resistor	16
Capacitor	3

4.4.2 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบเลือกรูปแบบได้จากอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

- (ก) ภาพรวมการเชื่อมต่อพอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ (ข) สวิตช์เลือกรูปแบบ
(ค) วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก(DAC) R2R Ladder 8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แสดงดังรูปที่ 4.7 แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 เป็นส่วน คือ ส่วนการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์และส่วนแยกในรูปแบบที่ 4.7 (ข) และ (ค) โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณออสซิลเลชันออกมาเป็นรูปแบบค่าทางคณิตศาสตร์ จากการประมาณค่าโดยทฤษฎีออยเลอร์ และผ่านการปรับขนาดสัญญาณ (AMC) ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.2 เรียกสัญญาณนี้ว่า สัญญาณออสซิลเลชันแบบดิจิทัล

ส่วนที่ 2 คือส่วนของ สวิตช์ ควบคุมและปรับรูปแบบของสัญญาณได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องทำการโปรแกรมให้กับอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ใหม่ แสดงดังรูป 4.7 (ข)

ส่วนที่ 3 เป็นส่วนของ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 8 บิต โดยรับค่าสัญญาณออสซิลเลชันแบบดิจิทัลขนาดที่ถูกส่งจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 แบบขนาน และได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณออสซิลเลชันแบบอนาล็อก ที่ระดับแรงดันของสัญญาณ 0 ถึง 5 โวลต์ เพื่อแสดงผลออกเป็นรูปแบบการพล็อต 2 มิติ หรือตัวตั้งดูต แสดงดังรูป 4.7 (ค)

จากการนำอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันทำให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของระบบได้อย่างอิสระจากการปรับเปลี่ยนระบบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการโปรแกรมให้กับตัวอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยคุณสมบัติที่สามารถตั้งค่าได้จึงสามารถกำหนด ระบบสมการหรือค่าพารามิเตอร์ ที่แตกต่างกัน ไว้ล่วงหน้าได้ โดยเลือกรูปแบบสัญญาณจากปุ่มกด (Button Switch) ที่ต่อกับพอร์ตดิจิทัลของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข)

4.5 ผลการทดสอบระบบออสซิลเลชันที่นำเสนอ

หัวข้อนี้แสดงผลการทดสอบระบบออสซิลเลชันที่นำเสนอ ทั้ง 2 รูปแบบ โดยแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

ผลการทดสอบทางทฤษฎีจากโปรแกรม MATLAB ประกอบไปด้วย การแสดงลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวตั้งดูตจากแผนภาพการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของระบบด้วยทฤษฎีแยกออกไปสองทิศทาง(Bifurcation) และในส่วนต่อมาเป็นการนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 5 ตัวของระบบ จากการวิเคราะห์ในส่วนที่ 1 มาวิเคราะห์ด้วย ทฤษฎีเลขชี้กำลัง Lyapunov เพื่อตรวจสอบว่าระบบมีความเป็นออสซิลเลชันและมีลักษณะของตัวตั้งดูตลักษณะแบบ Strang attractor หรือไม่ ซึ่งเป็นรูปแบบตัวตั้งดูตที่เราให้ความสนใจมากที่สุดใ้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ พร้อมแสดงค่าความซับซ้อนของตัวตั้งดูต (D_{ky}) ในแต่ละลักษณะ จากทฤษฎีคาดเดาของ Kaplan และ Yorke ซึ่งทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ถูกกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.1, 2.2.2 และ 2.2.3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบทางวงจรถ้าจากโปรแกรม Proteus โดยเป็นการทดสอบวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณออสซิลเลเตอร์ด้วยออปแอมป์ และการออกแบบด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์จากหัวข้อ ที่ 4.4.1 และ 4.4.2 ตามลำดับ ด้วยโปรแกรม Proteus ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถทดสอบการออกแบบวงจรถ้าที่ออกแบบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ประเภทไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้ภายในโปรแกรมเดียวกัน

ผลการทดสอบวงจรถ้าจริง จากผลการทดสอบจากเชิงตัวเลขจากโปรแกรม MATLAB และผลทางวงจรถ้าจากโปรแกรม Proteus เพื่อเป็นแนวทางในการทดสอบและเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวงจรถ้าที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบไปด้วยวงจรถ้าทั้ง 2 รูปแบบ แสดงผลการทดสอบระบบออสซิลเลเตอร์ทั้ง 3 ส่วน ของระบบทั้ง 2 รูปแบบดังต่อไปนี้

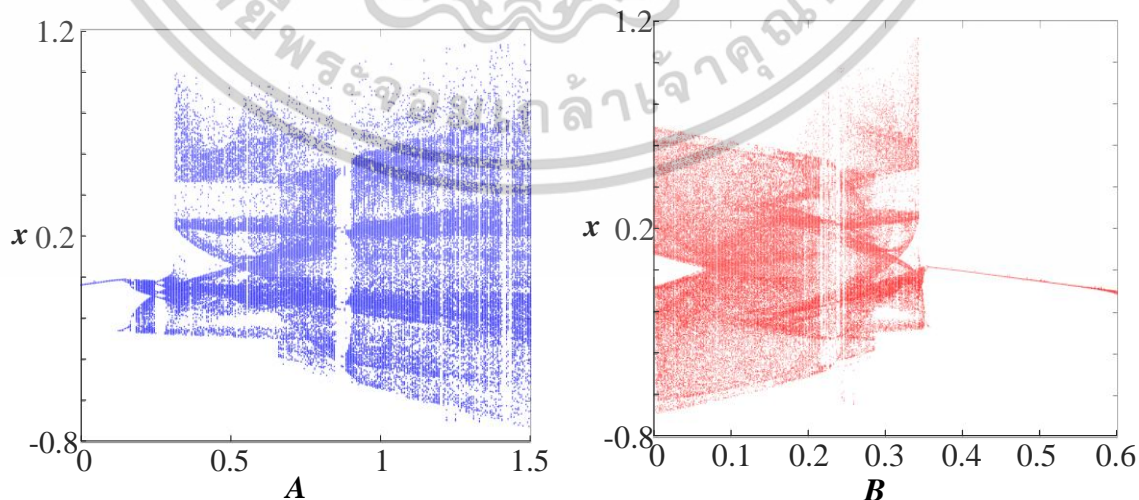
4.5.1 ระบบออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอรูปแบบที่ 1

ในรูปแบบที่ 1 มีการออกแบบระบบโดยการใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่แตกต่างกันสองรูปแบบ $G(x)$ คือ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นสี่เหลี่ยมตัดแปลง (f_2) ดังสมการที่ (4.6) $G(y)$ คือ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นตัดแปลง Signum (f_1) ดังสมการที่ (4.4) โดยแสดงสมการของระบบที่นำเสนอรูปแบบที่ 1 ดังต่อไปนี้

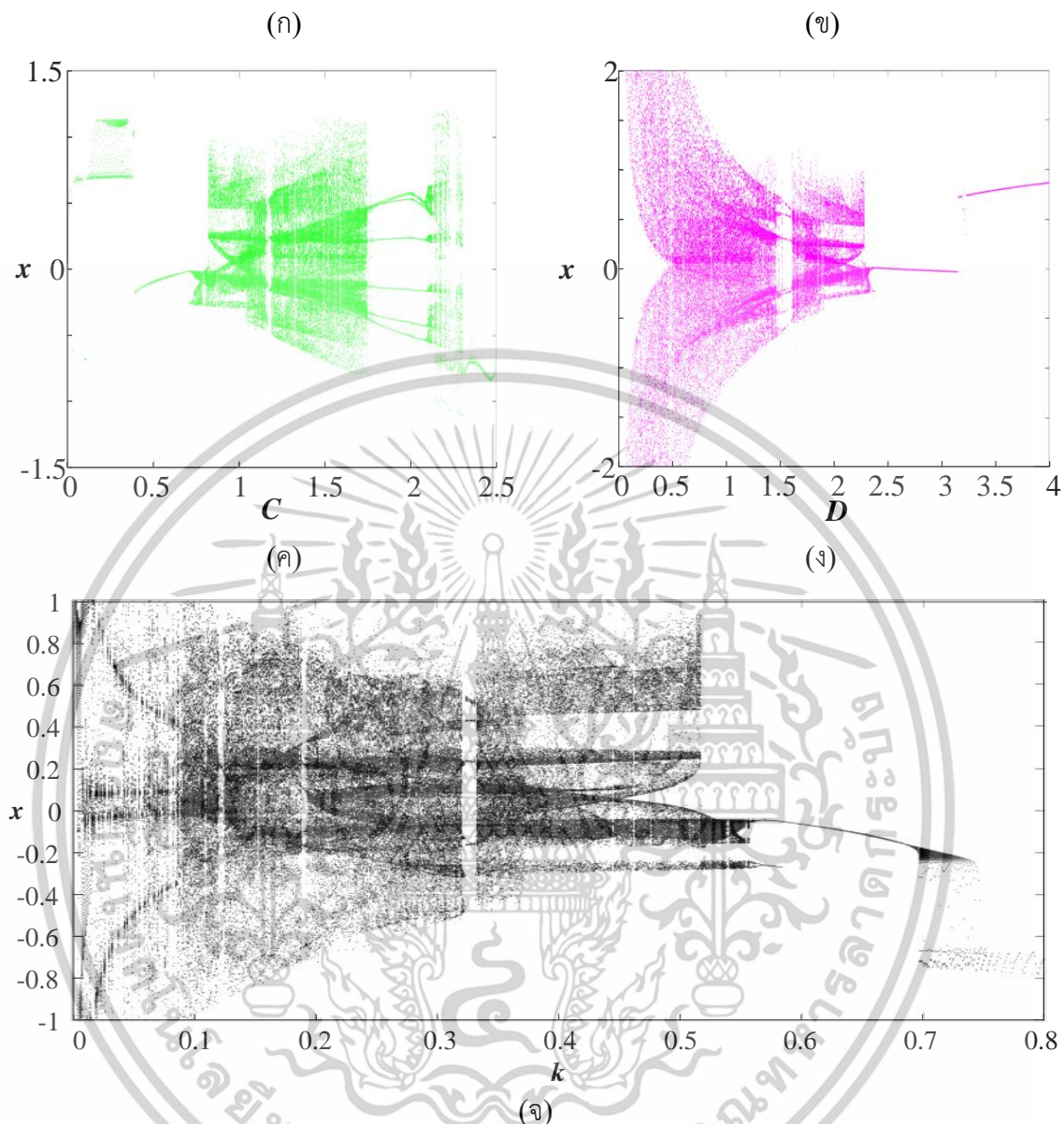
$$\begin{aligned}\dot{x} &= y + (Ay - B \operatorname{sgn}(y)) \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= -kz - y - (Cx \cdot \operatorname{Rect}(Dx))\end{aligned}\quad (4.8)$$

การวิเคราะห์ระบบด้วยทฤษฎีการแยกออกไปสองทิศทาง (Bifurcation)

ระบบรูปแบบที่ 1 ที่นำเสนอประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ 5 ตัว คือ A, B, C, D, k กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น $x_0=0.1, y_0=0.1, z_0=0.1$ กำหนดค่าพารามิเตอร์ $A=0.6, B=0.3, C=1, D=2$ และ $k=1.5$ แสดงแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางของระบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

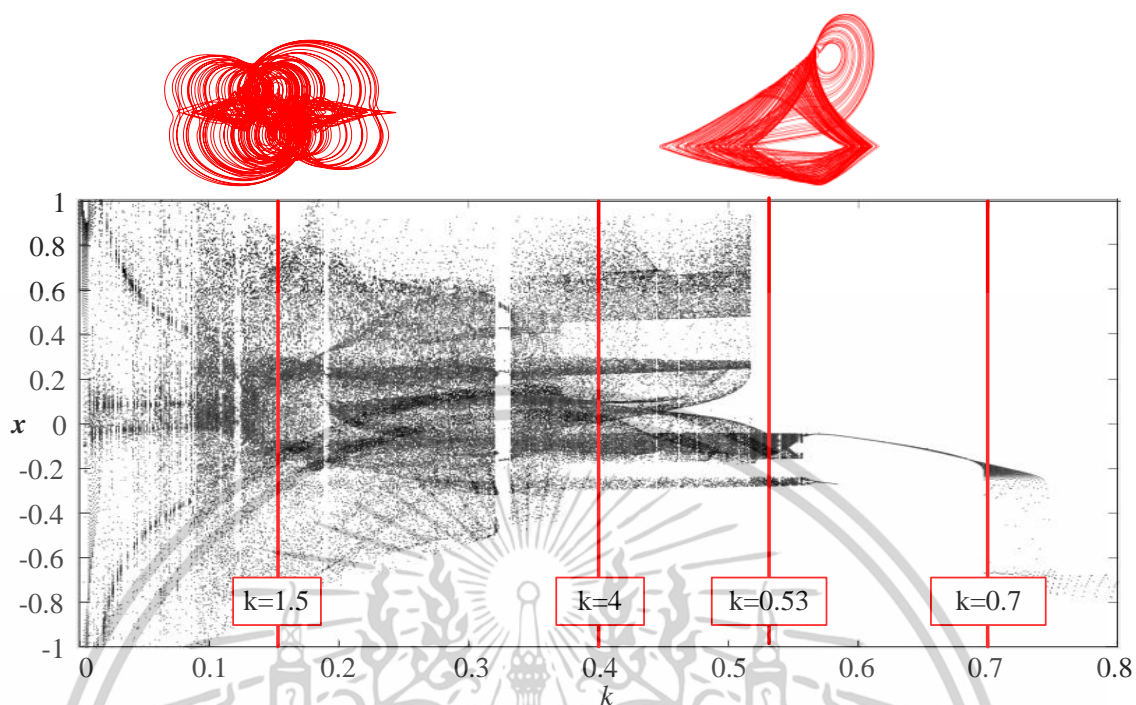


รูปที่ 4.8 แผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางของระบบที่นำเสนอรูปแบบที่ 1

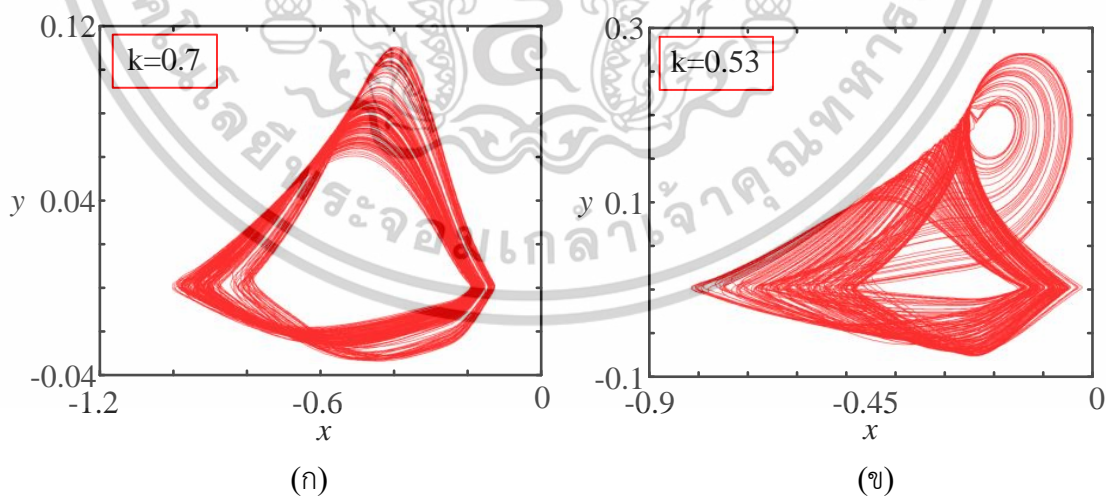
(ก) พารามิเตอร์ A (ข) พารามิเตอร์ B (ค) พารามิเตอร์ C (ง) พารามิเตอร์ D (จ) พารามิเตอร์ E

จากรูปที่ 4.8 แสดงแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางในระบบที่นำเสนอรูปแบบที่ 1 สามารถแสดงรูปแบบของตัวดึงดูดหลายวงม้วนได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ k เพียงตัวเดียว โดยวิเคราะห์จากแผนภาพในรูป (จ) การวิเคราะห์ช่วงการแตกตัวของระดับสัญญาณจากชุดตัวแปรที่กำหนดซึ่งส่งผลต่อรูปแบบของสัญญาณเอาต์พุตตัวดึงดูด ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปได้ ดังแสดงเอาต์พุตตัวดึงดูดแต่ละลักษณะดังรูปต่อไปนี้

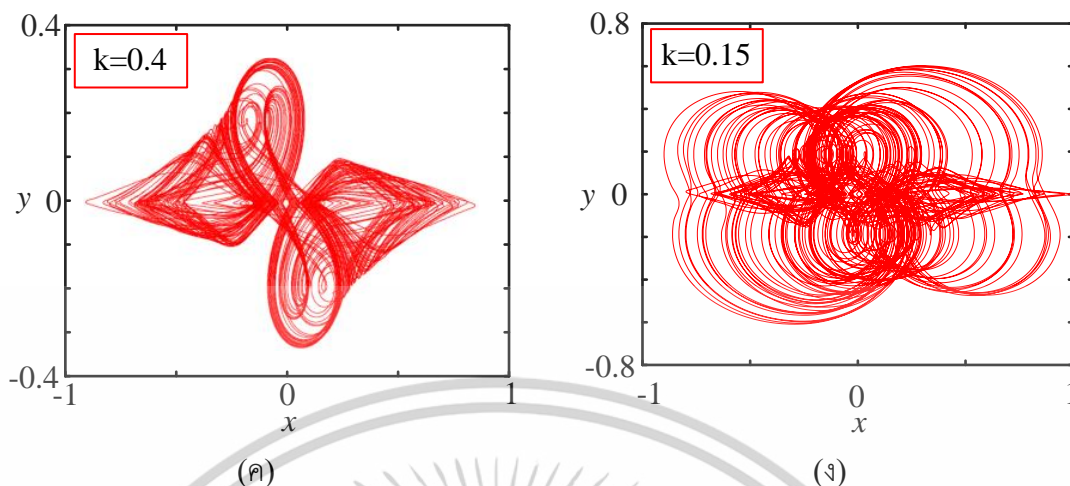
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกออกไปสองทิศทางและตั้งตึงดูของระบบลอจิสติกส์แบบที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

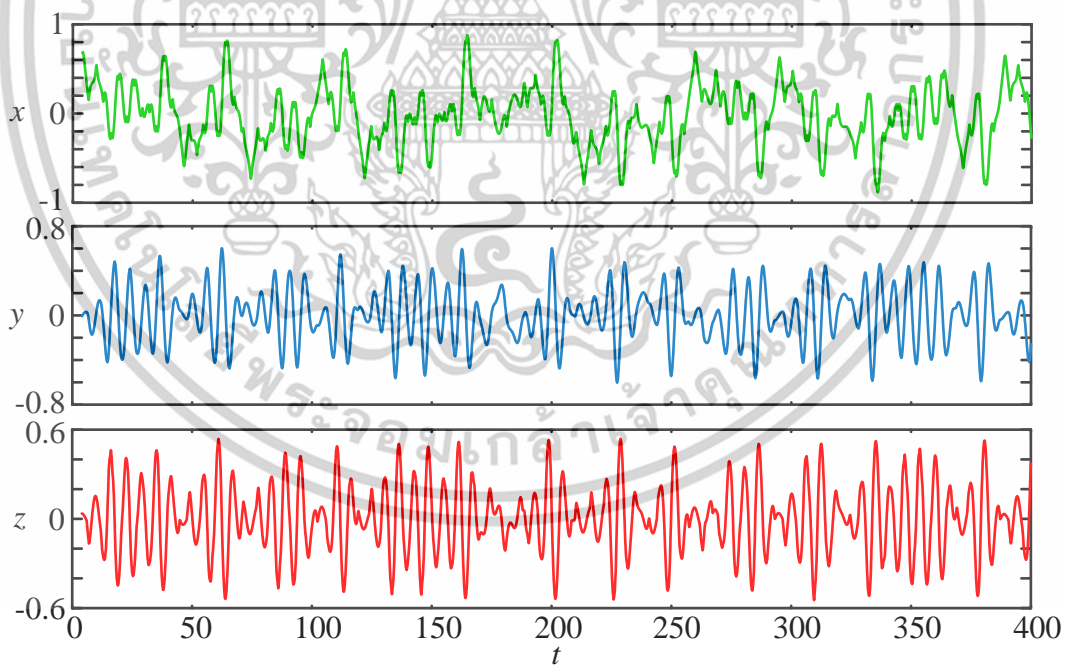


รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาต์พุตจากการปรับค่าพารามิเตอร์ k

(ก) ตัวตั้งจุดแบบเสถียร (ข) ตัวตั้งจุดแบบ 2 วงม้วน (ค) ตัวตั้งจุดแบบ 4 วงม้วน

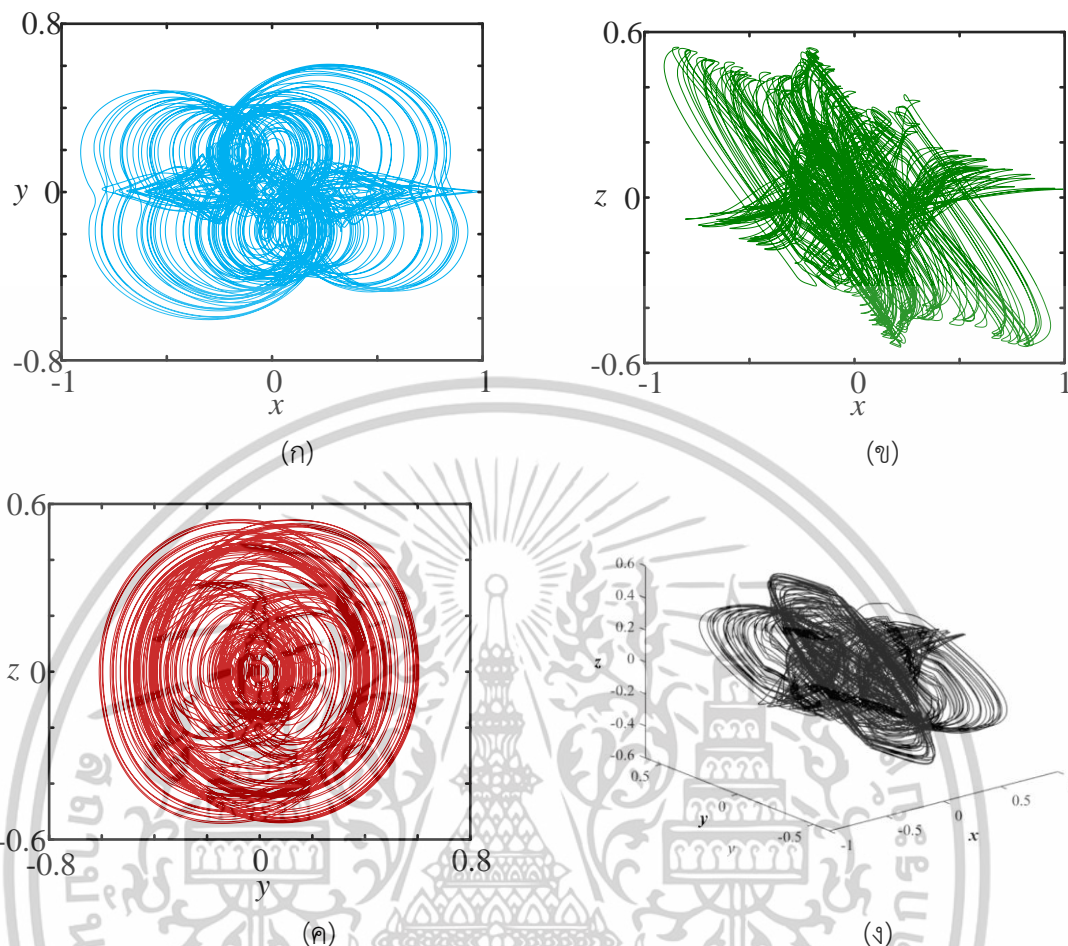
(ง) ตัวตั้งจุดแบบ 6 วงม้วน

จากรูปตัวตั้งจุดแบบ 6 วงม้วนที่แสดงในรูปที่ 4.10 (ง) เป็นรูปตัวตั้งจุดหลักที่นำเสนอเนื่องจากมีค่าความซับซ้อนที่สูงที่สุดและมีลักษณะที่เป็นสัดส่วนสวยงาม แสดงสัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาและของตัวตั้งจุดลักษณะ 6 วงม้วนทั้ง ทั้ง 3 ระนาบ และระนาบ 3 มิติ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบบอวนรูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วน

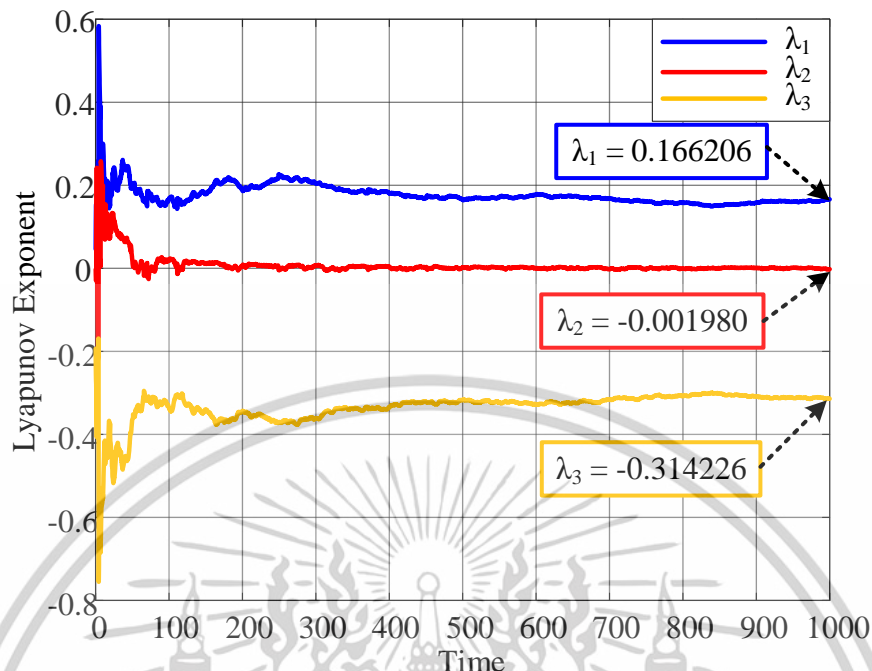
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 เอต์พุดตัวตึงคูด 6 วงม้วน ของระบบอลวนรูปแบบที่ 1
 (ก) ตัวตึงคูด ระนาบ $x-y$ (ข) ตัวตึงคูด ระนาบ $x-z$ (ค) ตัวตึงคูด ระนาบ $y-z$
 (ง) ตัวตึงคูดรูปแบบ 3 มิติ

การวิเคราะห์ระบบด้วยทฤษฎีเลขชี้กำลัง Lyapunov (Lyapunov Exponent)

ในระบบที่ 1 แสดงค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของตัวตึงคูด 6 วงม้วน ซึ่งเป็นลักษณะตัวตึงคูดหลักที่น่าเสนอ โดยกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเริ่มต้น $x_0=0.1, y_0=0.1, z_0=0.1$ กำหนดค่าพารามิเตอร์ $A=0.6, B=0.3, C=1, D=2$ และ $k=0.15$ แสดงค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.13 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบออลวนรูปแบบที่ 1

จากรูปที่ 4.13 มีค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ทั้งหมด 3 ค่า คือ $\lambda_1=0.166206$, $\lambda_2=-0.001980$, $\lambda_3=-0.314226$ ซึ่งมีผลรวมของค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov เท่ากับ -0.15 ซึ่งแสดงถึงความเป็นออลวน ณ ค่าพารามิเตอร์และเงื่อนไขเริ่มต้นที่กำหนด

แสดงค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบที่นำเสนอรูปแบบที่ 1 ทั้ง 3 ลักษณะ คือ 2, 4 และ 6 วงม้วน ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบที่ 1

ลักษณะตัวดึงดูด	เลขชี้กำลัง Lyapunov	ผลรวมเลขชี้กำลัง Lyapunov
2-วงม้วน	$\lambda_1=0.087359$ $\lambda_2=-0.001175$ $\lambda_3=-0.616184$	-0.53
4-วงม้วน	$\lambda_1=0.144605$ $\lambda_2=-0.000898$ $\lambda_3=-0.553707$	-0.41
6-วงม้วน	$\lambda_1=0.166206$ $\lambda_2=-0.001980$ $\lambda_3=-0.314226$	-0.15

จากทฤษฎีเลขชี้กำลัง Lyapunov ที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.2.2 ในระบบออลวนอันดับที่ 3 จะมีค่าของเลขชี้กำลัง Lyapunov ทั้งหมด 3 ค่า ค่าของเลขชี้กำลัง Lyapunov ตัวที่ 1 (λ_1) มีค่าเป็นบวก ตัวที่ 2 (λ_2) มีค่าเป็นศูนย์ ตัวที่ 3 (λ_3) จะมีค่าเป็นลบ และสุดท้ายจะต้องมีผลรวมของเลขชี้กำลัง Lyapunov

มีค่าเป็นลบเสมอ จากผลของเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบทั้ง 2 รูปแบบที่นำเสนอ ดังตารางที่ 4.2 เป็นไปตามทฤษฎี ในทุกๆลักษณะตัวดึงดูด

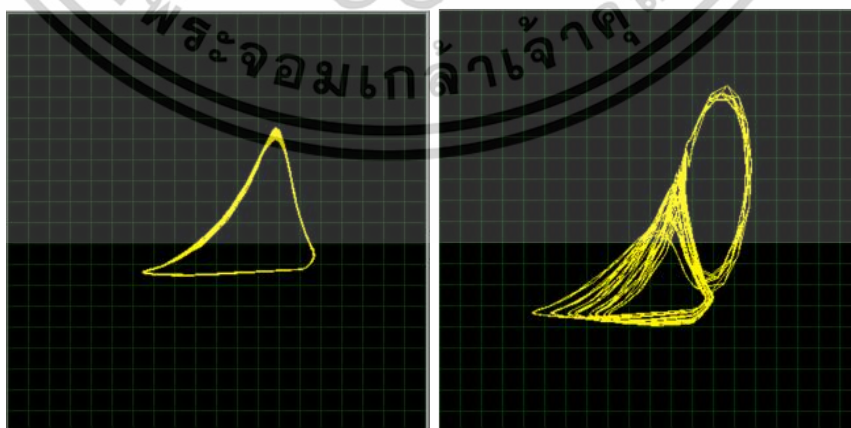
การวิเคราะห์ระบบด้วยทฤษฎีการคาดเดาของ Kaplan และ Yorke (Kaplan Yorke Conjunction)

จากค่าของเลขชี้กำลัง Lyapunov ดังตารางที่ 4.5 สามารถคำนวณค่าความซับซ้อนของตัวดึงดูด แต่ละลักษณะที่นำเสนอในระบบรูปแบบที่ 1 พบว่าค่าความซับซ้อนเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนวงม้วนของตัวดึงดูด ซึ่งในลักษณะตัวดึงดูดหลัก 6 วงม้วนที่นำเสนอของระบบรูปแบบที่ 1 มีค่าความซับซ้อนสูงถึง 2.52 แสดงค่าความซับซ้อนของตัวดึงดูดทั้ง 3 ลักษณะ ได้ดังตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.6 ค่าการคาดเดาของ Kaplan และ Yorke (D_{KY}) ของระบบรูปแบบที่ 1

ลักษณะตัวดึงดูด	D_{KY}
2-วงม้วน	2.14
4-วงม้วน	2.26
6-วงม้วน	2.52

ผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยออปแอมป์จากโปรแกรม Proteus

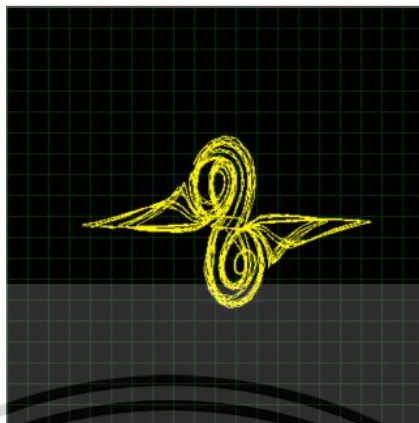
จากการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยออปแอมป์และอุปกรณ์ RC จากหัวข้อที่ 4.4.1 แสดงผลการทดสอบวงจรรูปแบบเอาต์พุตตัวดึงดูด ทั้ง 3 รูปแบบ คือ ตัวดึงดูด 2, 4 และ 6 วงม้วน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ A, B, C , จากตัวต้านทานปรับค่าได้ $R_1(A)=4.1k\Omega, R_2(B)=13.5k\Omega, R_5(C)=2.5k\Omega$ และพารามิเตอร์ D กำหนดจาก $V_D=0.55$ โวลต์ จากนั้นปรับค่าพารามิเตอร์ k ได้จาก $R_2(k)$ เพื่อแสดงตัวดึงดูดลักษณะ 1, 2, 4 และ 6 วงม้วน โดยมีค่าของตัวต้านทาน $R_2(k) = 675\Omega, 800\Omega, 1050k\Omega, 2125k\Omega$ ตามลำดับ แสดงเอาต์พุตตัวดึงดูดจากการปรับค่า $R_2(k)$ ดังรูปต่อไปนี้



(ก)

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

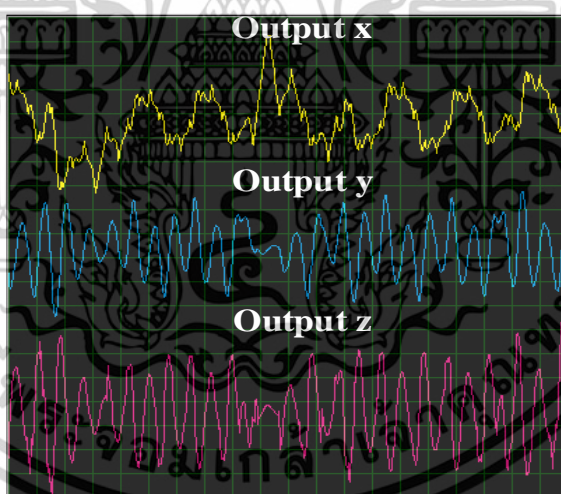


(ค)

รูปที่ 4.14 ผลการทดลองจากวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลเตอร์รูปแบบใหม่ด้วยออปแอมป์ จากโปรแกรม Proteus

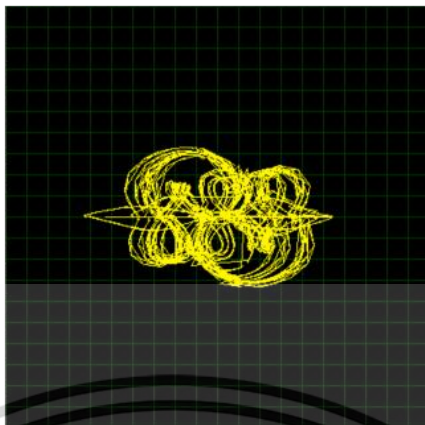
(ก) เอาต์พุตตัวตั้งจุด 1 วงม้วน (ข) เอาต์พุตตัวตั้งจุด 2 วงม้วน (ค)เอาต์พุตตัวตั้งจุด 4 วงม้วน

จากการระบอบอสซิลเลเตอร์รูปแบบที่ 1 ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 รูปแบบเอาต์พุตตัวตั้งจุดหลักที่นำเสนอ คือตัวตั้งจุดแบบ 6 วงม้วน แสดงผลการทดสอบ ดังรูปต่อไปนี้

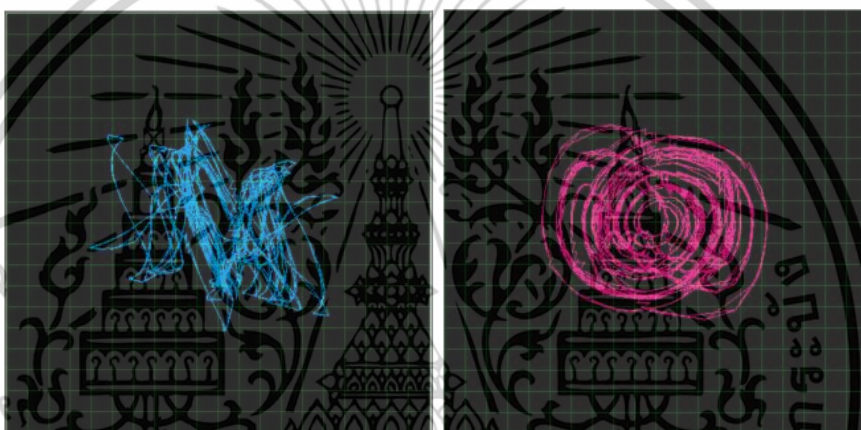


รูปที่ 2.14 สัญญาณเอาต์พุต x, y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วนจากโปรแกรม Proteus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

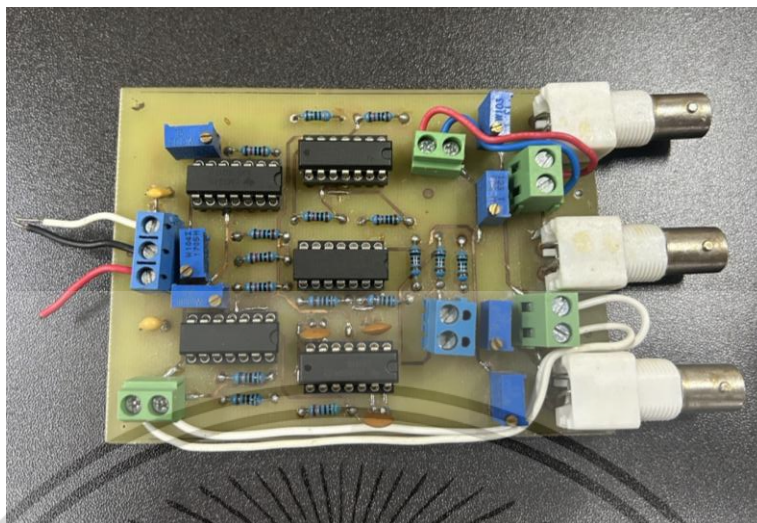
(ค)

รูปที่ 4.16 เาต์พุตตัวดึงดูดของระบบรูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus

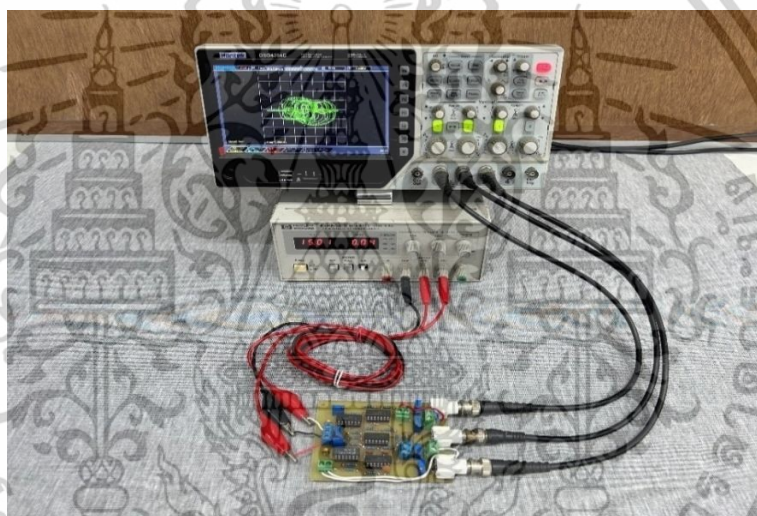
(ก) ตัวดึงดูดระนาบ $x-y$ (ข) ตัวดึงดูดระนาบ $x-z$ (ค) ตัวดึงดูดระนาบ $y-z$

ผลการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยออปแอมป์

ในการทดสอบผลการทำงานจริงของวงจรกำเนิดสัญญาณด้วยออปแอมป์ สามารถทำงานได้โดยการป้อนไฟเลี้ยงให้กับวงจรขนาด 15 โวลต์ เพียงอย่างเดียวเท่านั้นโดยไม่จำเป็นต้องมีการป้อนสัญญาณจากภายนอกเพื่อให้วงจรสามารถกำเนิดสัญญาณเอาต์พุตรูปแบบอลวนได้ โดยแสดงภาพรวมในการทดสอบและผลการทดสอบของวงจรจริง ดังต่อไปนี้



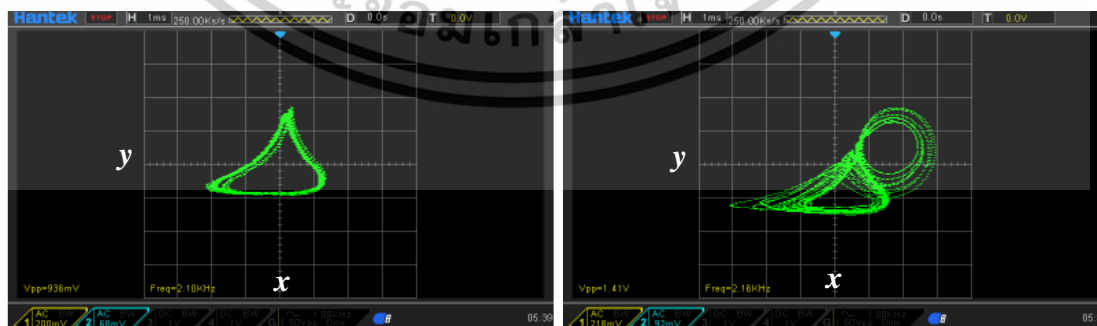
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 วงจรกำเนิดสัญญาณออสครูปแบบจากออปแอมป์ที่นำเสนอ

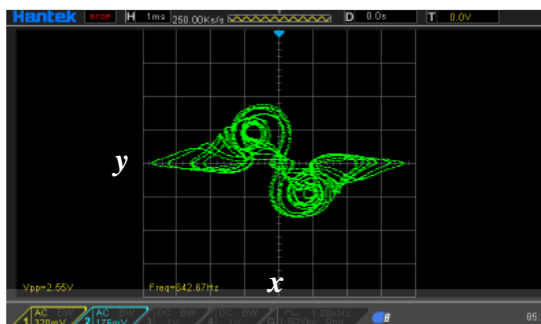
(ก) วงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอ (PCB) (ข) ภาพรวมการทดสอบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ



(ก)

(ข)

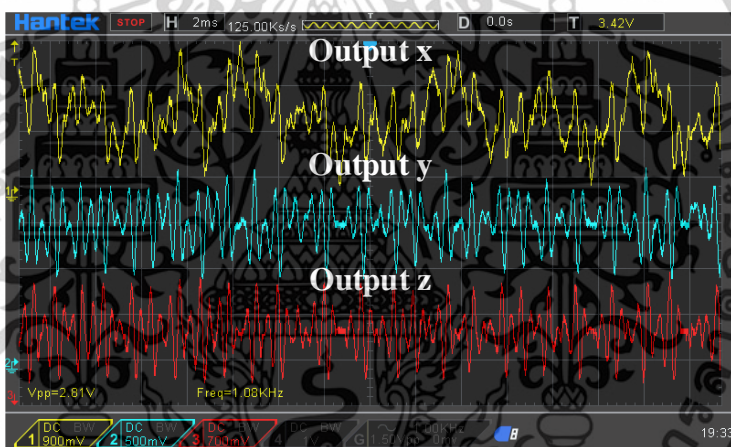
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



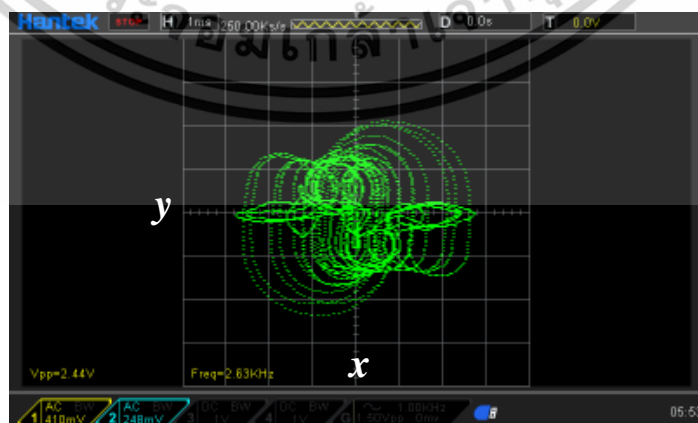
(ค)

รูปที่ 4.18 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรจริงจากการปรับค่าพารามิเตอร์ k
 (ก) ตัวตั้งจุดแบบเสถียร (ข) ตัวตั้งจุดแบบ 2 วงม้วน (ค) ตัวตั้งจุดแบบ 4 วงม้วน

จากระบบอลวนรูปแบบที่ 1 แสดงตัวเอาต์พุตสัญญาณบนแกนเวลา และตัวตั้งจุดลักษณะ 6 วงม้วน ทั้ง 3 ระนาบ คือ ระนาบ x - y , x - z และ y - z จากของวงจรจริง แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.19 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลาของระบบรูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วนจากวงจรจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.20 เาต์พุตตัวดึงดูดของระบบรูปแบบที่ 1 ลักษณะ 6 วงม้วน จากวงจรจริง

(ก) ตัวดึงดูดระนาบ x - y (ข) ตัวดึงดูดระนาบ x - z (ค) ตัวดึงดูดระนาบ y - z

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงลักษณะของตัวดึงดูดในระบบรูปแบบที่ 1 ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการปรับค่าของตัวต้านทาน $R_2(k)$ โดยตัวดึงดูดลักษณะ 1, 2, 4, 6 วงม้วน มีค่าของตัวต้านทาน $R_2(k) = 680\Omega, 820\Omega, 1k\Omega$ และ $2.2k\Omega$ ตามลำดับ

4.5.2 ระบบอลวนที่นำเสนอรูปแบบที่ 2

ในระบบที่ 2 ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นรูปแบบเดียวกัน 2 ตำแหน่ง $G(x)$ และ $G(y)$ คือฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นสี่เหลี่ยมตัดแปลง (f_2) แสดงสมการระบบที่นำเสนอรูปแบบที่ 2 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y + (A_y \cdot \text{Rect}(B_y)) \\ \dot{y} &= z \\ \dot{z} &= -kz - y - (C_x \cdot \text{Rect}(D_x)) \end{aligned} \quad (4.9)$$

การวิเคราะห์ระบบด้วยทฤษฎีการแยกออกไปสองทิศทาง (**Bifurcation**)

ระบบรูปแบบที่ 2 ที่นำเสนอประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ 5 ตัว คือ A, B, C, D, k เช่นเดียวกับระบบอลวนรูปแบบที่ 1 ซึ่งมีความแตกต่างกันที่ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังสมการที่ (4.9) ในระบบที่ 2 แตกต่างจากระบบที่ 1 ที่สามารถสร้างเอาต์พุตตัวดึงดูดรูปแบบหลายวงม้วนจากการปรับค่าพารามิเตอร์ k เพียงตัวเดียว แต่ในระบบรูปแบบที่ 2 นั้น มีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบเพื่อให้ได้ลักษณะของตัวดึงดูด 2 วงม้วน 3 วงม้วน และ 4 วงม้วน แสดงค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดของเอาต์พุตตัวดึงดูดแต่ละรูปแบบ โดยกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $x_0=0.1, y_0=0.1$ และ $z_0=0.01$ ดังตารางต่อไปนี้

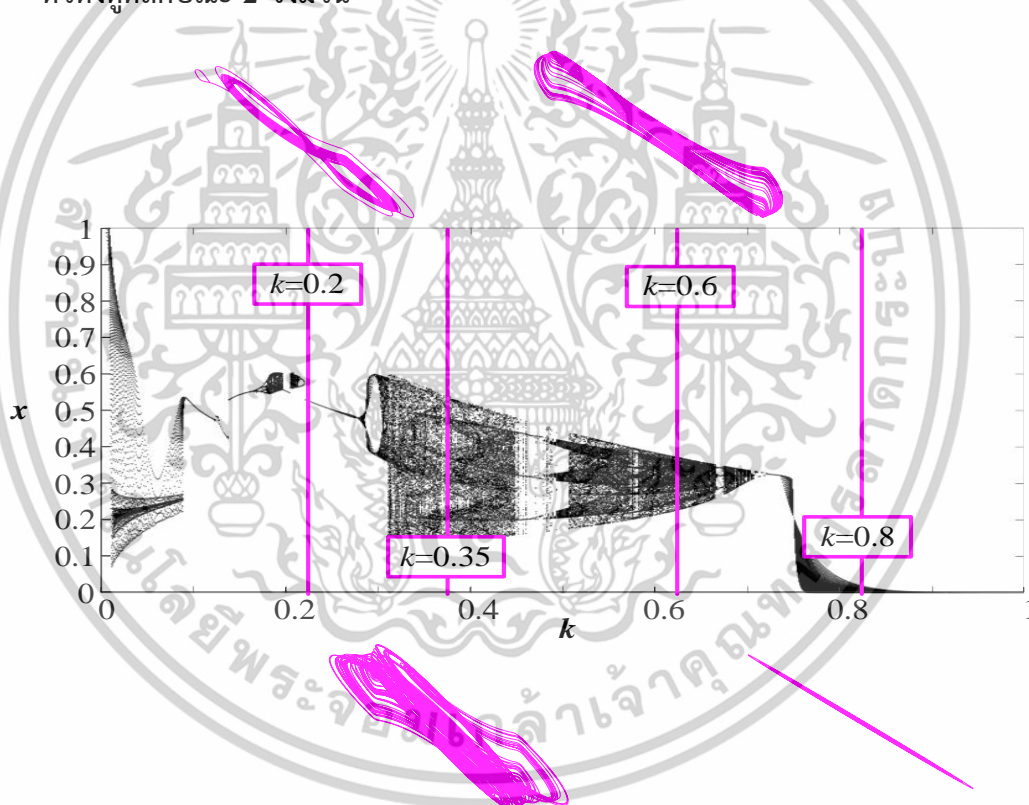
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ของตัวดึงดูดแต่ละลักษณะของระบบที่ 2

รูปแบบตัวดึงดูด	พารามิเตอร์
2-วงม้วน	$A=0.5, B=1.5, C=0.5, D=1.5, k=0.35$
3-วงม้วน	$A=2, B=1, C=2, D=1, k=0.35$
4-วงม้วน	$A=3, B=2, C=1, D=2, k=0.16$

จากตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ของเอาต์พุตตัวดึงดูดแต่ละรูปแบบประกอบไปด้วยชุดพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ แสดงความเปลี่ยนแปลงของตัวดึงดูดจากการแยกตัวของระดับสัญญาณจากแผนภาพการแยกออกไปสองทิศของตัวดึงดูดแต่ละรูปแบบ ดังรูปต่อไปนี้

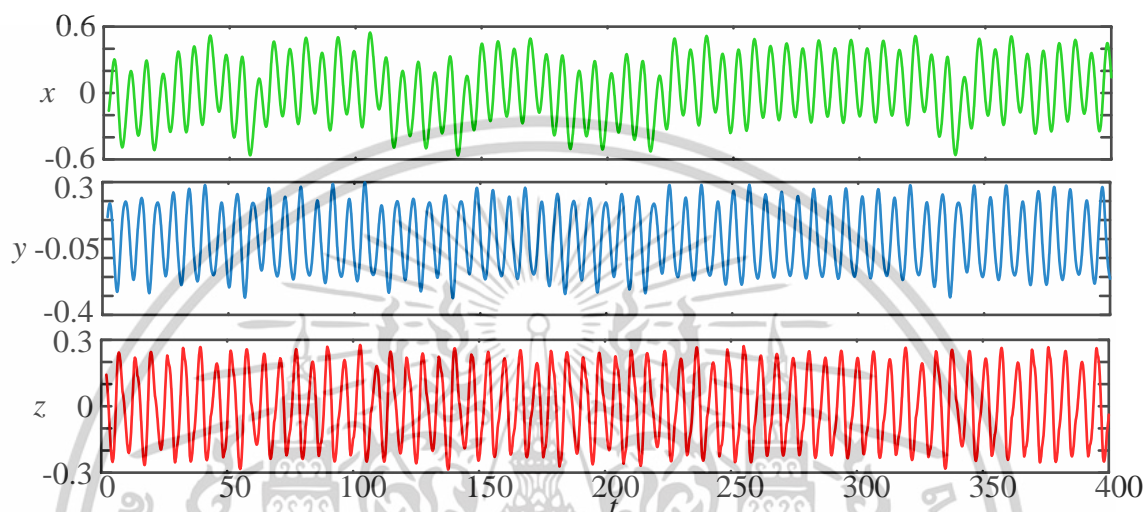
ตัวดึงดูดลักษณะ 2 วงม้วน



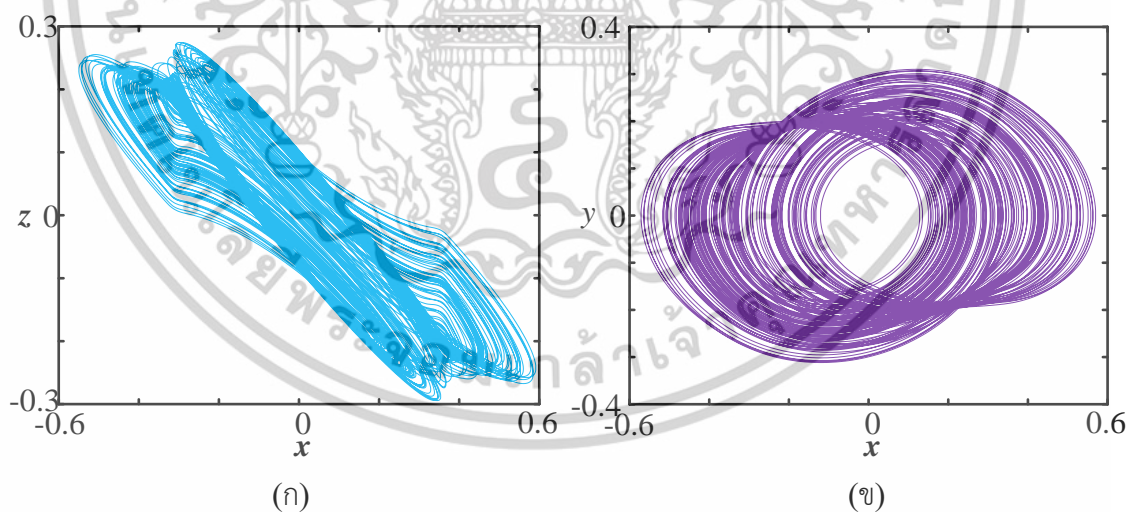
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกออกไปสองทิศทางและตัวดึงดูดแบบ 2 วงม้วน ของระบบอลวนรูปแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

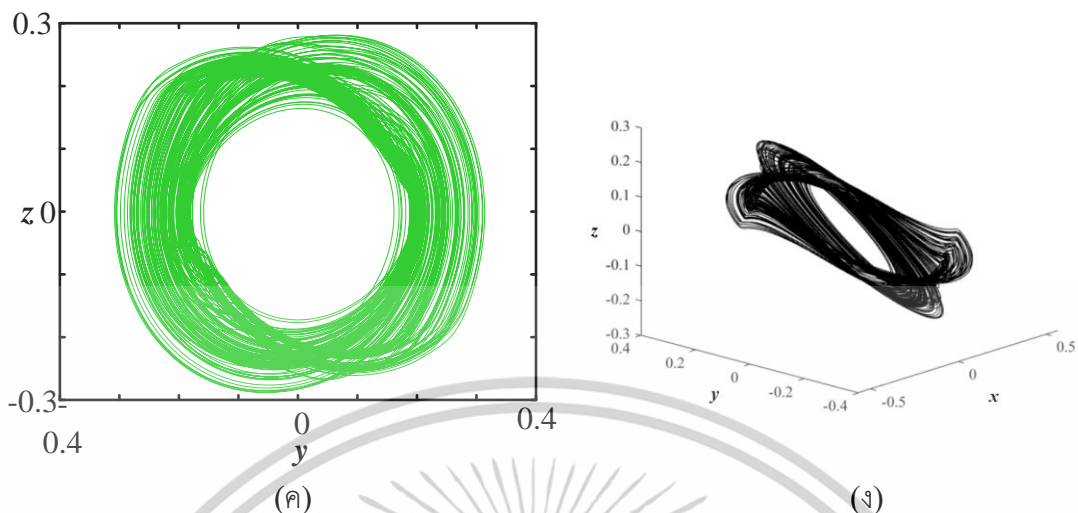
จากรูปที่ 4.21 เป็นการวิเคราะห์ พารามิเตอร์ k ช่วง 0 ถึง 1 จะสังเกตได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้มีการแตกตัวของระดับสัญญาณสูงที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 0.25 จนถึง 0.7 โดยตัวดึงดูดรูปแบบ 2 วงม้วนที่นำเสนอเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ $k=0.35$ แสดงเอาต์พุตบนแกนเวลาและตัวดึงดูดรูปแบบ 2 วงม้วน ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.22 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบบอลลวนรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน

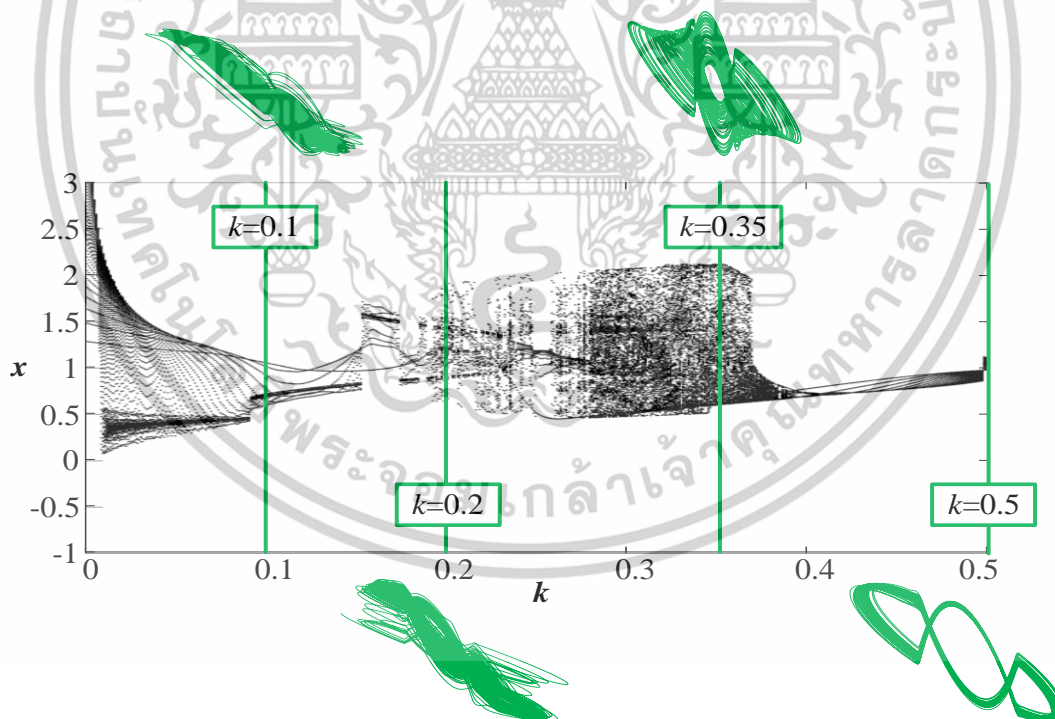


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 เฮอร์ฟุดตัวดึงดูด 2 วงม้วน ของระบบลอเรนรูปแบบที่ 2
 (ก) ตัวดึงดูด ระนาบ $x-y$ (ข) ตัวดึงดูด ระนาบ $x-z$ (ค) ตัวดึงดูด ระนาบ $y-z$
 (ง) ตัวดึงดูดรูปแบบ 3 มิติ

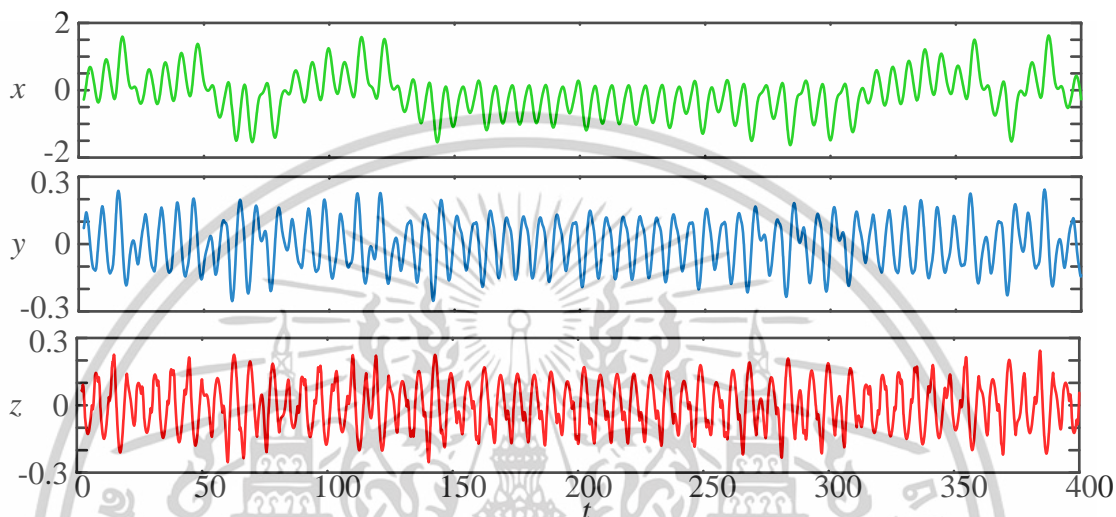
ตัวดึงดูดลักษณะ 3 วงม้วน



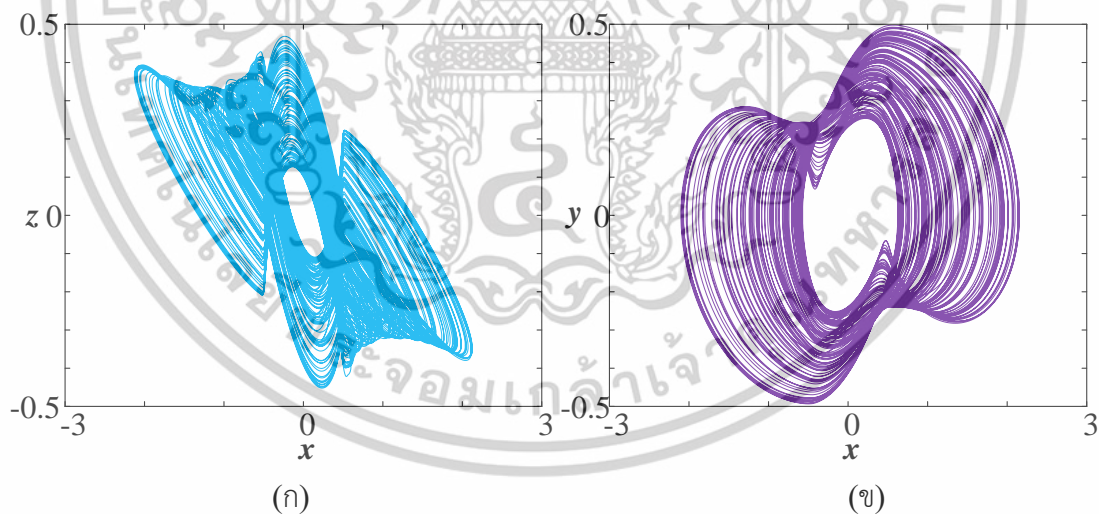
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกออกไปสองทิศทางและตั้งดึงดูดแบบ 3 วงม้วน ของระบบลอเรนรูปแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

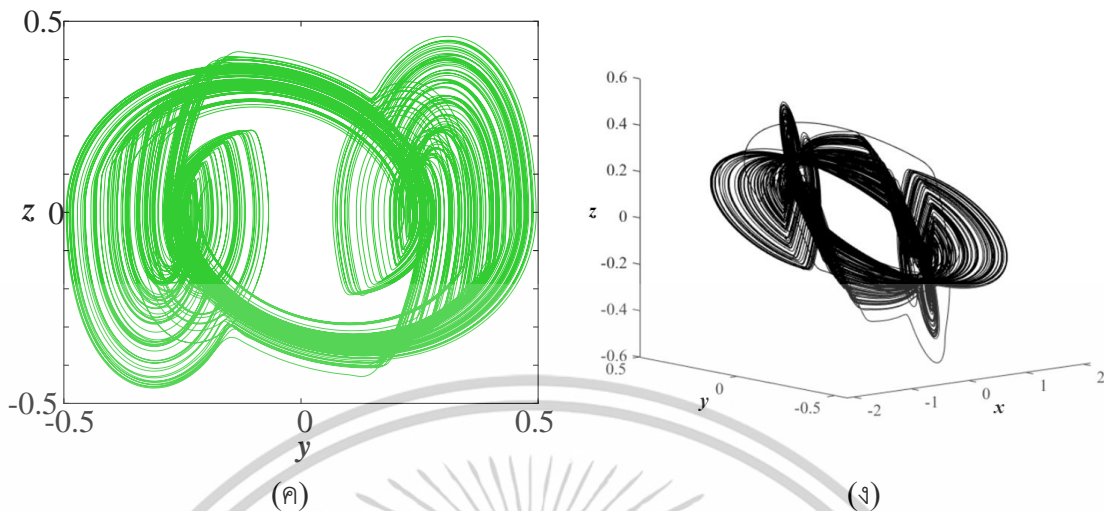
จากรูปที่ 4.24 แสดงแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทาง ของพารามิเตอร์ k ช่วง 0 ถึง 0.5 พบว่ามีช่วงที่เกิดการแตกตัวของระดับสัญญาณมากที่สุดในช่วงค่า k ประมาณ 0.27 ถึง 0.38 โดยเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ $k=0.35$ ที่มีรูปแบบของตัวดึงดูดรูปแบบ 3 วงม้วนที่มีความสวยงามและชัดเจนมากที่สุด แสดงเอาต์พุตบนแกนเวลาและตัวดึงดูดรูปแบบ 3 วงม้วน ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.25 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบลอว์นรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน

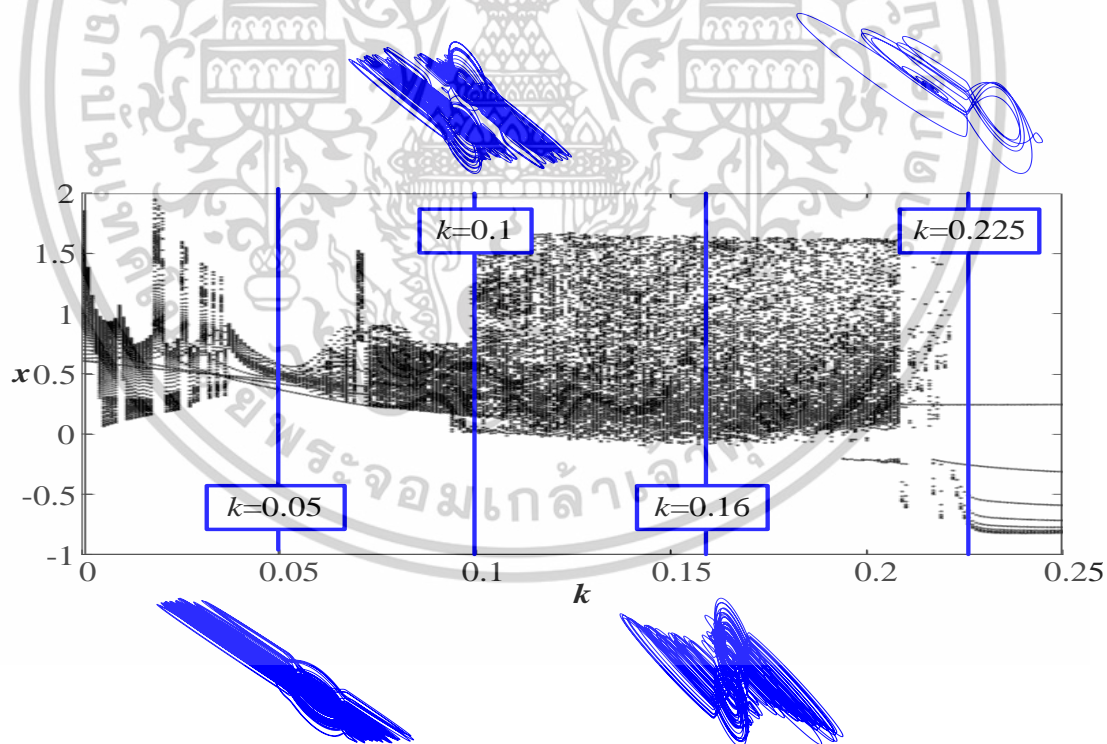


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 เอด์พุตตัวดึงดูด 3 วงม้วน ของระบบลอเรนรูปแบบที่ 2
 (ก) ตัวดึงดูด ระนาบ $x-y$ (ข) ตัวดึงดูด ระนาบ $x-z$ (ค) ตัวดึงดูด ระนาบ $y-z$
 (ง) ตัวดึงดูดรูปแบบ 3 มิติ

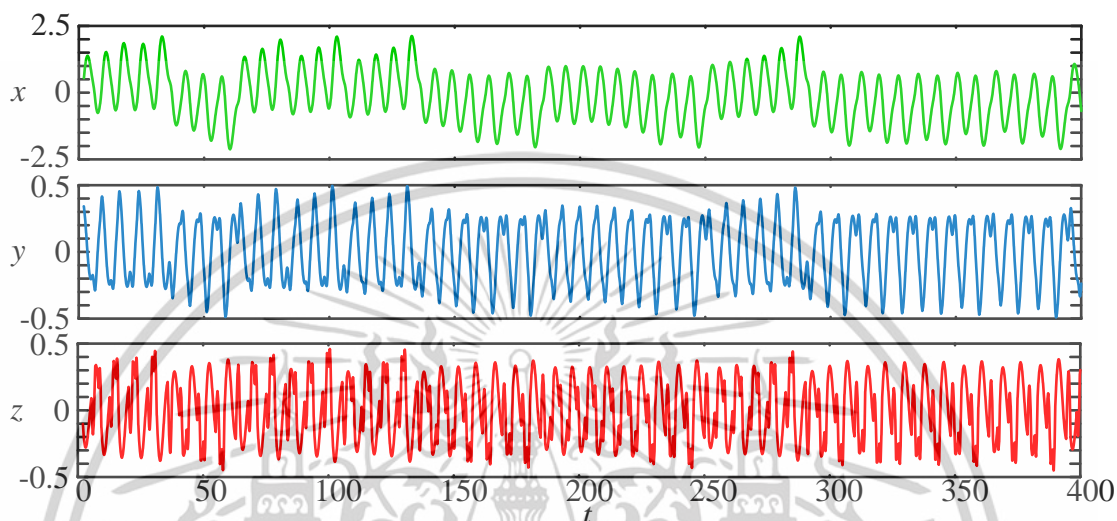
ตัวดึงดูดลักษณะ 4 วงม้วน



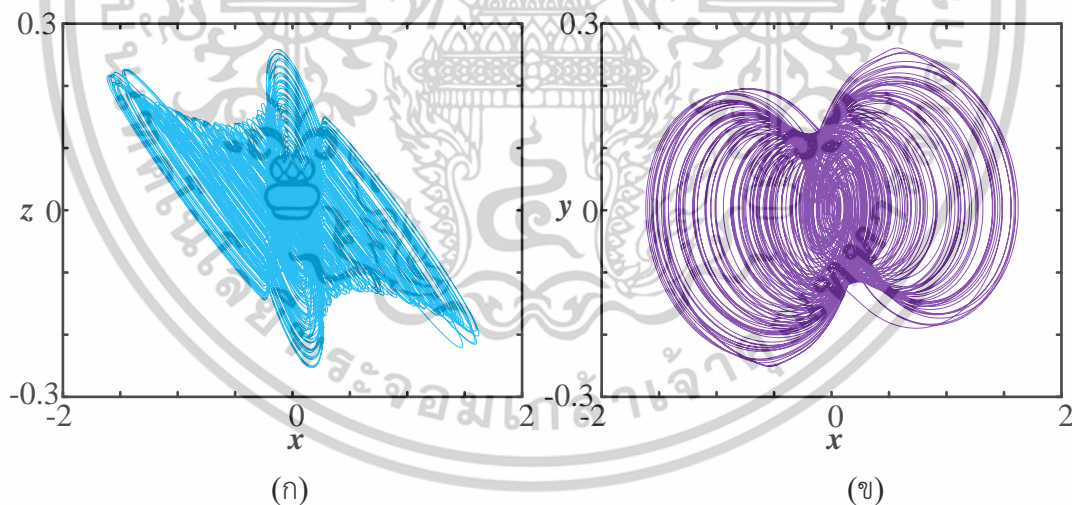
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกออกไปสองทิศทางและตั้งดึงดูดแบบ 2 วงม้วน ของระบบลอเรนรูปแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

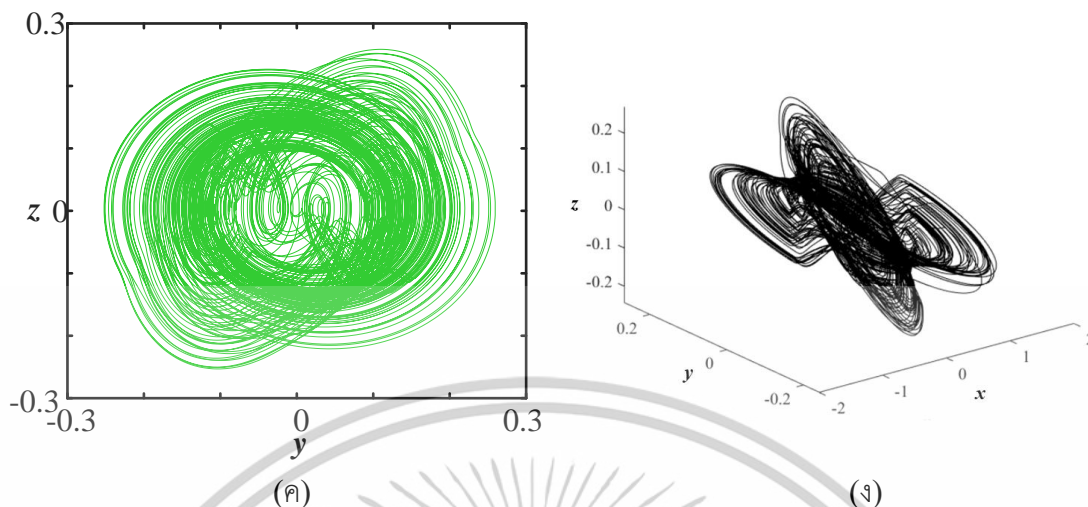
จากรูปที่ 4.27 แสดงแผนภาพการแยกออกไปสองทิศทางของตัวดึงดูดแบบ 4 วงม้วน แสดงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ k ช่วง 0 ถึง 0.25 ช่วงที่มีการแตกตัวของระดับสัญญาณมากที่สุดคือช่วง 0.1 ถึง 0.22 โดยตัวดึงดูดรูปแบบ 4 วงม้วนเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ $k=0.16$ โดยแสดงเอาต์พุตบนแกนเวลาและตัวดึงดูดรูปแบบ 4 วงม้วน ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.28 สัญญาณเอาต์พุตบนแกนเวลาของระบบลอจิสติกส์แบบที่ 2 ลักษณะ 4 วงม้วน



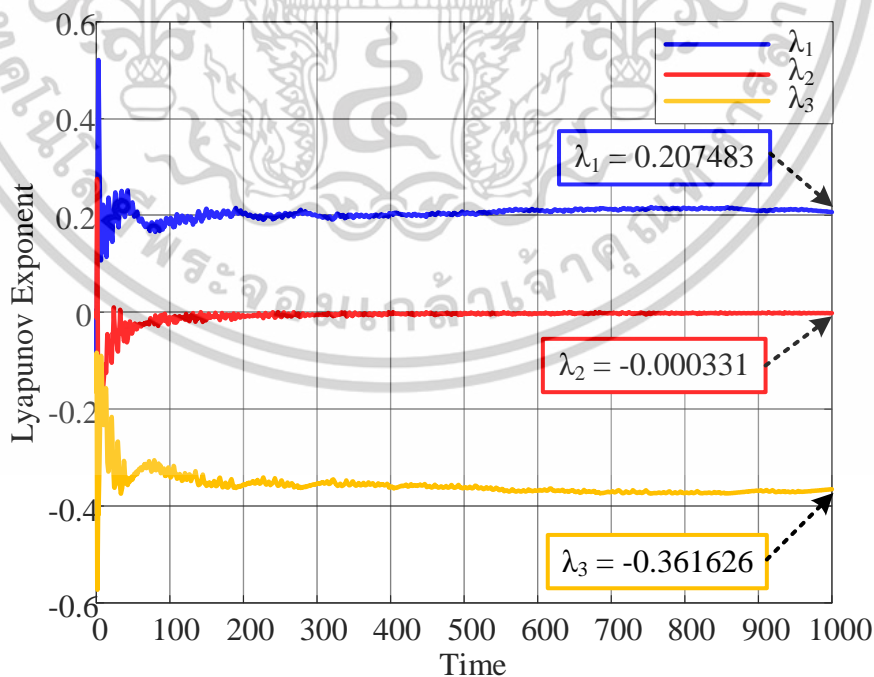
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 เอตต์พุดตัวดึงดูด 4 วงม้วน ของระบบอลวนรูปแบบที่ 2
 (ก) ตัวดึงดูด ระนาบ x - y (ข) ตัวดึงดูด ระนาบ x - z (ค) ตัวดึงดูด ระนาบ y - z
 (ง) ตัวดึงดูดรูปแบบ 3 มิติ

การวิเคราะห์ระบบด้วยเลขชี้กำลัง Lyapunov (Lyapunov Exponent)

ในระบบที่ 2 แสดงค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของตัวดึงดูด 4 วงม้วน โดยกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น เริ่มต้น $x_0=0.1, y_0=0.1, z_0=0.01$ กำหนดค่าพารามิเตอร์ $A=0.6, B=0.3, C=1, D=2$ และ $k=0.15$ แสดงค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.30 เลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบอลวนรูปแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.30 มีค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ทั้งหมด 3 ค่า คือ $\lambda_1=0.207483$, $\lambda_2=-0.000331$, $\lambda_3=-0.361626$ ซึ่งมีผลรวมของค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov เท่ากับ -0.154474 ซึ่งแสดงถึงความเป็นอววน ณ ค่าพารามิเตอร์และเงื่อนไขเริ่มต้นที่กำหนด

ตารางที่ 4.8 ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบรูปแบบที่ 2

ลักษณะตัวตั้งจุด	เลขชี้กำลัง Lyapunov	ผลรวมเลขชี้กำลัง Lyapunov
2-วงม้วน	$\lambda_1=0.101344$ $\lambda_2=0.000085$ $\lambda_3=-0.451429$	-0.35
3-วงม้วน	$\lambda_1=0.105104$ $\lambda_2=0.001383$ $\lambda_3=-0.456487$	-0.35
4-วงม้วน	$\lambda_1=0.207483$ $\lambda_2=-0.000331$ $\lambda_3=-0.361626$	-0.15

การวิเคราะห์ระบบด้วยทฤษฎีการคาดเดาของ Kaplan และ Yorke (Kaplan Yorke Conjunction)

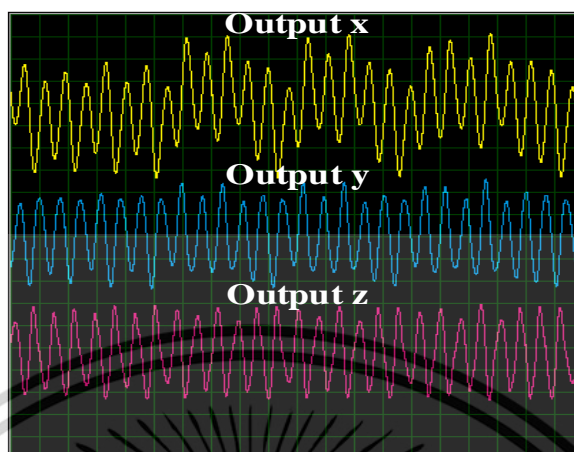
ตารางที่ 4.9 ค่าการคาดเดาของ Kaplan และ Yorke (D_{KY}) ของระบบรูปแบบที่ 2

ลักษณะตัวตั้งจุด	D_{KY}
2-วงม้วน	2.20
3-วงม้วน	2.23
4-วงม้วน	2.57

ผลการทดสอบวงจรกิจกำเนิดสัญญาณอววนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์จากโปรแกรม Proteus

จากการออกแบบวงจรกิจกำเนิดสัญญาณด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ของระบบอววนรูปแบบที่ 2 ในหัวข้อที่ 4.4.2 โดยแสดงเอาต์พุตสัญญาณบนแกนเวลาและตัวตั้งจุดรูปแบบ 2, 3 และ 4 วงม้วน ดังรูปต่อไปนี้

ตัวดึงคุณลักษณะ 2 วงม้วน

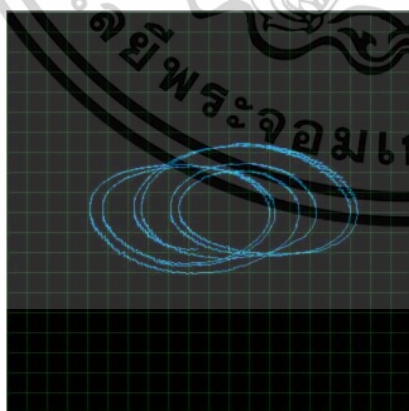


รูปที่ 4.31 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน จากโปรแกรม

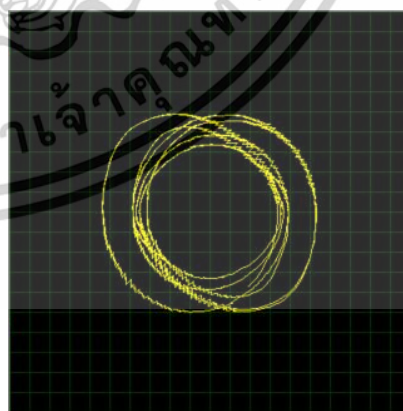
Proteus



(ก)



(ข)



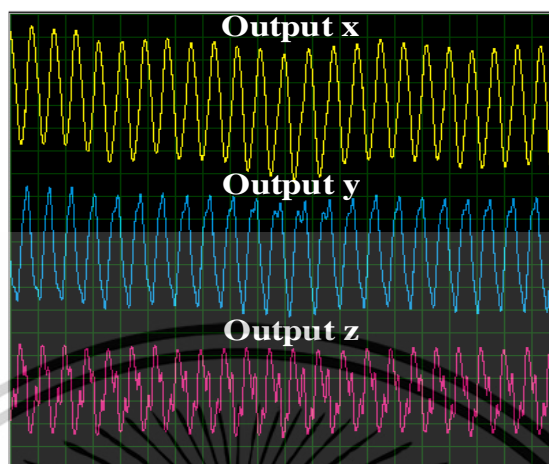
(ค)

รูปที่ 4.32 เอาต์พุตตัวดึงคุณลักษณะของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus

(ก) ตัวดึงคุณลักษณะ $x-z$ (ข) ตัวดึงคุณลักษณะ $x-y$ (ค) ตัวดึงคุณลักษณะ $y-z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

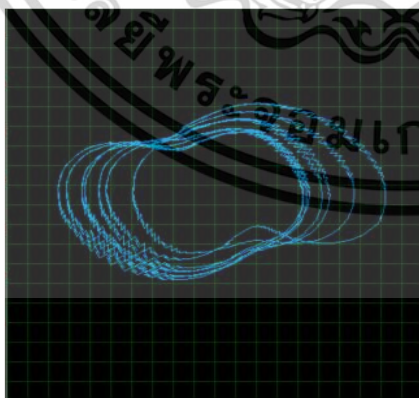
ตัวดึงคุณลักษณะ 3 วงม้วน



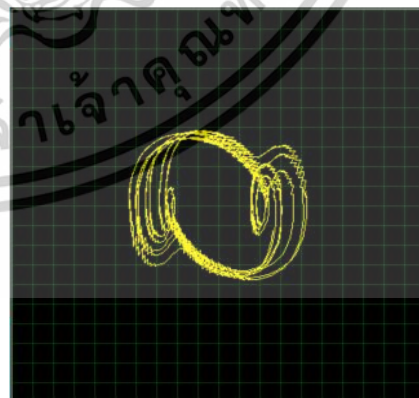
รูปที่ 4.33 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus



(ก)



(ข)



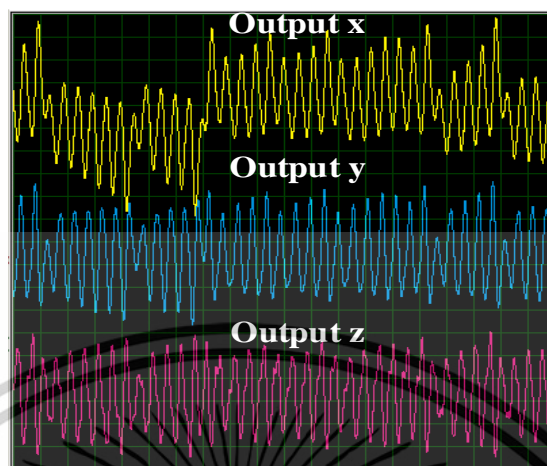
(ค)

รูปที่ 4.34 เอาต์พุตตัวดึงคุณลักษณะของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus

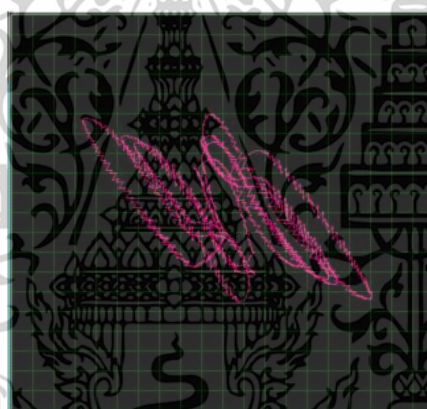
(ก) ตัวดึงคุณลักษณะ $x-z$ (ข) ตัวดึงคุณลักษณะ $x-y$ (ค) ตัวดึงคุณลักษณะ $y-z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

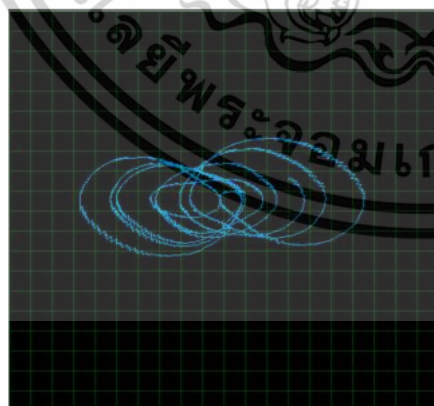
ตัวดึงตุลลักษณะ 4 วงม้วน



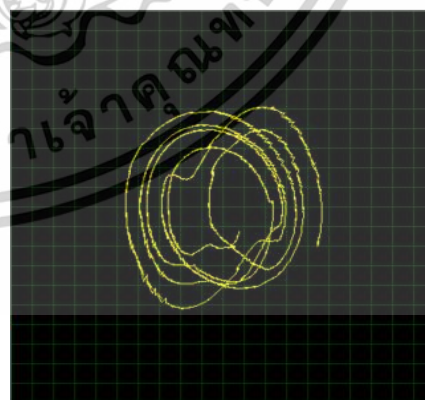
รูปที่ 4.35 สัญญาณเอาต์พุต x , y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 4 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus



(ก)



(ข)



(ค)

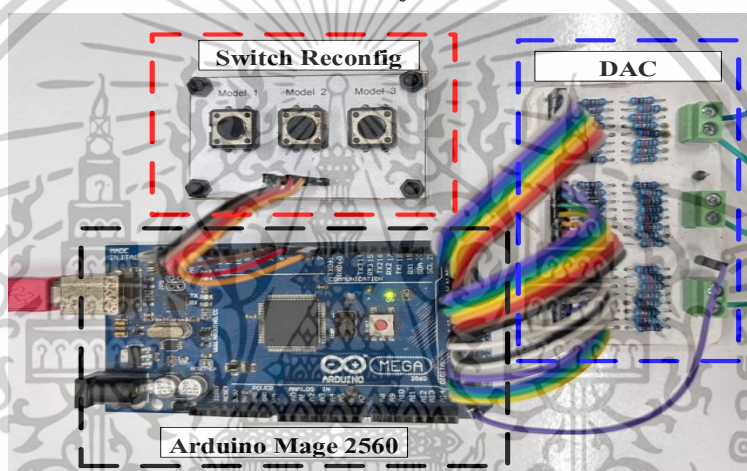
รูปที่ 4.36 เอาต์พุตตัวดึงตุลของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากโปรแกรม Proteus

(ก) ตัวดึงตุลระนาบ $x-z$ (ข) ตัวดึงตุลระนาบ $x-y$ (ค) ตัวดึงตุลระนาบ $y-z$

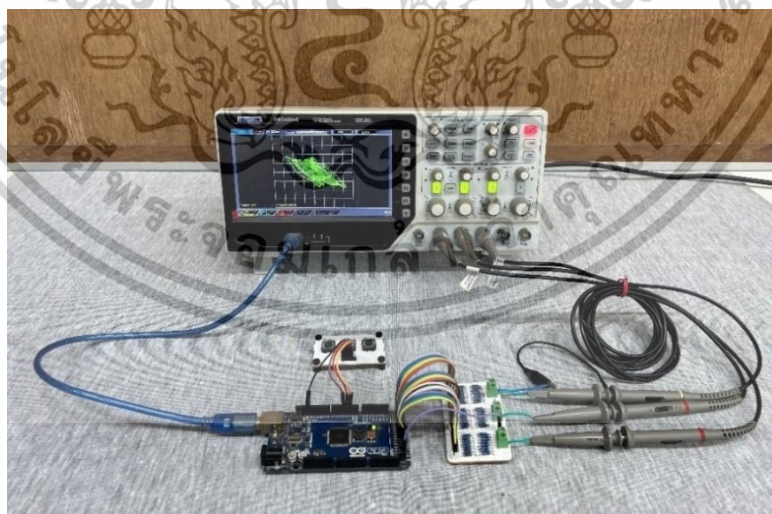
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการทดสอบผลของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสร้างสัญญาณอลวนของระบบที่นำเสนอรูปแบบที่ 2 โดยใช้บอร์ด Arduino Mega 2560 และสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะของตัวดึงดูด 3 รูปแบบจากปุ่ม (Button Switch) ทั้ง 3 ปุ่ม คือตัวดึงดูด 2, 3 และ 4 วงม้วน ในปุ่มที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ สำหรับตัวดึงดูดลักษณะ 2 วงม้วน ปุ่มที่ 2 กำหนดพารามิเตอร์ สำหรับตัวดึงดูดลักษณะ 3 วง และ ปุ่มที่ 3 กำหนดพารามิเตอร์สำหรับตัวดึงดูดลักษณะ 4 วงม้วน ซึ่งเป็นตัวดึงดูดหลักที่นำเสนอในระบบอลวนรูปแบบที่ 2 โดยมีความซับซ้อนของระบบสูงที่สุด ในการเริ่มต้นการทำงานของวงจรสามารถจ่ายไฟเลี้ยงให้กับบอร์ดได้ 2 รูปแบบคือ 5 โวลต์ (USB Port) และ 7-12 โวลต์ (Power Port) แสดงผลการทดสอบจากวงจรจริง ดังรูปต่อไปนี้



(ก)



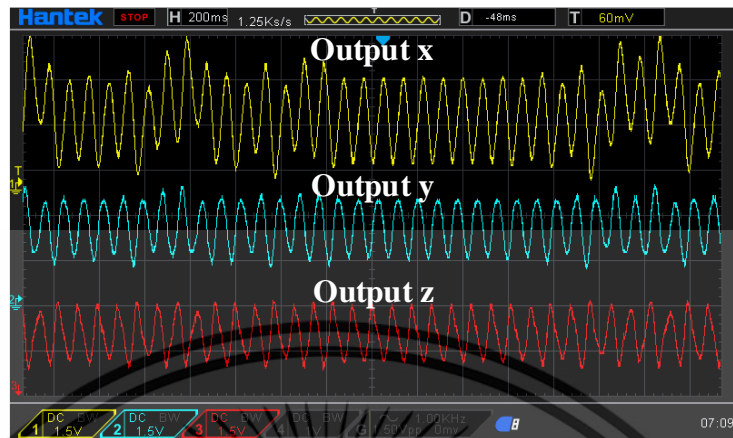
(ข)

รูปที่ 4.37 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

(ก) วงจรกำเนิดสัญญาณทั้ง 3 ส่วน (ข) ภาพรวมการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดึงดูดลักษณะ 2 วงม้วน



รูปที่ 4.38 สัญญาณเอาต์พุต x, y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน จากวงจรจริง



(ก)



(ข)

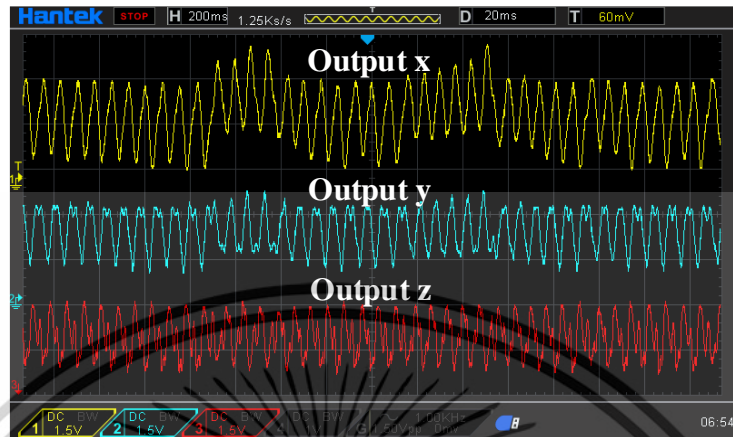
(ค)

รูปที่ 4.39 เอาต์พุตตัวดึงดูดของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 2 วงม้วน จากวงจรจริง

(ก) ตัวดึงดูดระนาบ $x-z$ (ข) ตัวดึงดูดระนาบ $x-y$ (ค) ตัวดึงดูดระนาบ $y-z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดึงตุลลักษณะ 3 วงม้วน



รูปที่ 4.40 สัญญาณเอาต์พุต x, y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากวงจรจริง



(ก)



(ข)

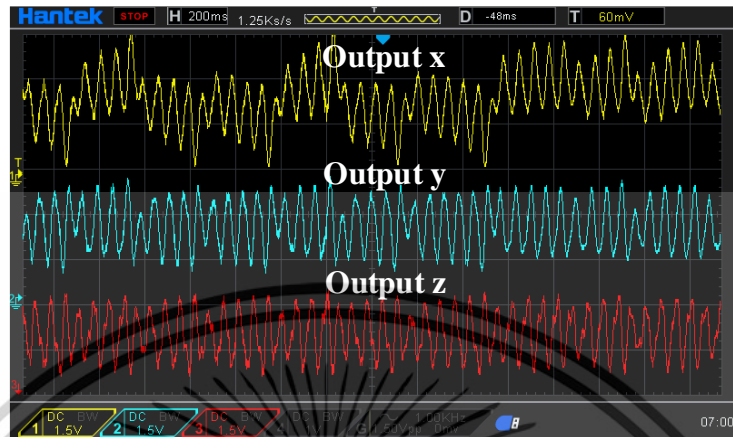
(ค)

รูปที่ 4.41 เอาต์พุตตัวดึงตุลของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากวงจรจริง

(ก) ตัวดึงตุลระนาบ $x-z$ (ข) ตัวดึงตุลระนาบ $x-y$ (ค) ตัวดึงตุลระนาบ $y-z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดึงตุลลักษณะ 4 วงม้วน



รูปที่ 4.42 สัญญาณเอาต์พุต x, y และ z บนแกนเวลา รูปแบบที่ 2 ลักษณะ 4 วงม้วน จากวงจรจริง



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.43 เอาต์พุตตัวดึงตุลของระบบรูปแบบที่ 2 ลักษณะ 3 วงม้วน จากวงจรจริง

(ก) ตัวดึงตุลระนาบ $x-z$ (ข) ตัวดึงตุลระนาบ $x-y$ (ค) ตัวดึงตุลระนาบ $y-z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 บทสรุป

ในบทนี้กล่าวถึง ผลการทดสอบระบบออลนรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนสูงที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ ในด้านของระบบสมการออลนที่นำเสนอมีความแตกต่างกันในด้านของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นและอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยสมการของระบบออลนรูปแบบที่ 1 แสดงสมการของระบบดังสมการที่ 4.8 แสดงการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณออลนด้วยออปแอมป์และอุปกรณ์พาสซีฟ RC แสดงวงจรที่นำเสนอ ดังรูปที่ 4.6 และระบบออลนรูปแบบที่ 2 แสดงดังสมการที่ 4.9 ส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณมีการนำอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 มาประยุกต์ใช้ในการสร้างสัญญาณออลนจากสมการทางคณิตศาสตร์ ที่โปรแกรมให้กับบอร์ด Arduino Mega 2560 ควบคุมกับวงจร DAC R2R Ladder ในการแปลงค่าสัญญาณออลนในรูปแบบดิจิทัลเป็นสัญญาณออลนรูปแบบอนาล็อกเพื่อแสดงผลตัวตึงดูดบน ออสซิลอสโคป แสดงวงจรที่นำเสนอ ดังรูปที่ 4.22

โดยมีการแสดงผลการทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาเปรียบเทียบและยืนยันผลการทดลองออกเป็น 3 รูปแบบ คือ ผลการทดสอบระบบออลนบนโปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์ช่วงพารามิเตอร์ที่ก่อให้เกิดความเป็นออลนของระบบ พิสูจน์ความเป็นออลน และแสดงตัวอย่างลักษณะของตัวตึงดูดที่ต้องการจะสร้าง ต่อมาเป็นการทดสอบผลของวงจรที่ออกแบบ ด้วยโปรแกรม Proteus ที่มีความสามารถในการทดสอบวงจรที่ออกแบบทั้ง 2 รูปแบบ คือ การทดสอบวงจรที่ออกแบบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการทดสอบวงจรที่ออกแบบด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ซึ่งสามารถโปรแกรมและแสดงเอาต์พุตของวงจรเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเป็นแนวทางในการทดสอบกับวงจรจริง พร้อมทั้งออกแบบ Printed Circuit Board (PCB) ได้ในโปรแกรมโปรแกรมเดียว ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีการนำวงจรที่ออกแบบ ทั้ง 2 รูปแบบ มาสร้างเป็นวงจร PCB เพื่อความสวยงามและความแม่นยำในการทดสอบวงจรจริง และส่วนสุดท้ายแสดงผลการทดสอบของวงจรจริง โดยอ้างอิงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับทดสอบด้วย โปรแกรม MATLAB และ โปรแกรม Proteus

จากการทดสอบวงจรจริงพบว่า สามารถสร้างสัญญาณออลนตามที่ออกแบบได้จริง ผลที่ได้มีความสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบบนโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม Proteus โดยมีความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และความละเอียดของการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกเล็กน้อย ซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมรับได้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนสูง ที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบที่มีฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน 2 รูปแบบ คือ ฟังก์ชันดัดแปลง Signum และฟังก์ชันดัดแปลงสี่เหลี่ยม มีการนำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ คือวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยออปแอมป์ที่สามารถปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณจากการปรับค่าพารามิเตอร์ k หรือ Quality factor ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน และอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของตัวตั้งตูดหลายรูปแบบจากการสั่งการจากสวิตช์ โดยระบบทั้ง 2 รูปแบบที่นำเสนอสามารถสร้างตัวตั้งตูดลักษณะแบบหลายวงม้วนได้ เมื่อนำงานวิจัยที่งานวิจัยที่ถูกกล่าวในหัวข้อที่ 3.2, 3.3, 3.4 และ 3.5 โดยแบ่งการเปรียบเทียบ ออกเป็น 2 รูปแบบตามลักษณะของวงจรที่นำเสนอ คือ วงจรที่ออกแบบด้วยอุปกรณ์ที่ไม่สามารถตั้งค่าได้จากออปแอมป์ และอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้ โดยแสดงการเปรียบเทียบดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบที่ 1 ด้วยอุปกรณ์ออปแอมป์

งานวิจัย	แบบจำลอง	จำนวน multiplier	อุปกรณ์	ความซับซ้อนของตัวตั้งตูด (D_{ky})	ความสามารถในการตัดแปลงพจน์ไม่เป็นเชิงเส้น
3.2[54]	Rossler	1	OPAMP	2.01	×
3.3[55]	Jerk	-	OPAMP	2.36	✓
[58]	Lorenz	2	OPAMP	2.06	×
[59]	Rikitake	3	OPAMP	2.08	×
[60]	Jerk	-	OPAMP	2.29	✓
[61]	Qiang Lai	4	OPAMP	2.23	×
[62]	Jerk	-	OPAMP	2.17	✓
[63]	Paul Didier Kamdem Kuate	-	OPAMP	2.18	×
[64]	Jerk	1	OPAMP	2.02	✓
งานวิจัยที่นำเสนอ	Jerk	-	OPAMP	2.52	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะของวงจรถ่ายสัญญาณออสซิลโลสโคปแบบที่ 2 ด้วยอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้

งานวิจัย	แบบจำลอง	อุปกรณ์	ความซับซ้อนของตัวตั้งจุด (D_{ky})	ความสามารถในการตัดแปลงพจน์ไม่เป็นเชิงเส้น	ราคา (บาท)	ความซับซ้อนในการออกแบบ	การใช้พลังงาน
3.4[56]	Sprott N	FPAА	2.04	×	7000-12000	สูง	สูง
3.5[57]	Chua	FPGA	2.02	✓	10000 -15000	สูง	สูง
[65]	Lorenz	PIC	2.06	×	1000	ต่ำ	ต่ำ
[66]	Murat Tuna	FPGA	2.18	×	10000 -15000	สูง	สูง
[67]	Mohamed Salah Azzaz	FPGA	2.07	×	10000 -15000	สูง	สูง
[68]	Lü-Chen	FPGA	2.22	×	10000 -15000	สูง	สูง
[69]	Lorenz	FPAА	2.06	×	7000-12000	สูง	สูง
[70]	Jerk	FPAА	2.03	✓	7000-12000	สูง	สูง
[71]	Jerk	FPAА	2.45	✓	7000-12000	สูง	สูง
งานวิจัยที่นำเสนอ	Jerk	Arduino Mega 2560	2.57	✓	500-1000	ต่ำ	ต่ำ

จากตารางที่ 5.1 วงจรถ่ายสัญญาณออสซิลโลสโคปแบบที่ 1 ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้อุปกรณ์เป็นอุปกรณ์หลักในการออกแบบวงจรถ่ายสัญญาณให้มีช่วงการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณที่สูงและไม่มีการใช้ตัวคูณอนาล็อกภายในวงจรถ่ายสัญญาณให้ลดต้นทุนและขนาดวงจรถ่ายสัญญาณที่นำเสนอมีการสร้างวงจรถ่ายสัญญาณ PCB ที่สามารถกำเนิดสัญญาณออสซิลโลสโคปแบบหลายวงม้วน พร้อมทั้งมีความซับซ้อนของระบบสูงถึง 2.52 ซึ่งเป็นค่าความซับซ้อนที่สูงกว่างานวิจัยที่นำเสนอในอดีต

จากตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบวงจรถ่ายสัญญาณออสซิลโลสโคปแบบที่ 2 ที่ใช้อุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้ในการออกแบบวงจรถ่ายสัญญาณ โดยวงจรถ่ายสัญญาณที่นำเสนอมีการนำบอร์ด Arduino Mega 2560 มาใช้ในการสร้างวงจรถ่ายสัญญาณออสซิลโลสโคป เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่สามารถตั้งค่าได้รูปแบบที่นำเสนอในอดีตนั้นมีต้นทุนที่ต่ำ ประมาณ 1000 บาท ใช้พลังงานต่ำ มีความง่ายตายในการออกแบบเนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของระบบได้จากการปรับเปลี่ยนสมการทางคณิตศาสตร์ ต่างจากอุปกรณ์ FPGA และ FPAА ที่ใช้ในการออกแบบระบบในลักษณะบล็อกไดอะแกรมประกอบกับการตั้งค่าเฉพาะตัวของบล็อกไดอะแกรมที่ซับซ้อน ในระบบรูปแบบที่ 2 มีความซับซ้อนสูงถึง 2.57 ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่างานวิจัยที่ถูกนำเสนอในอดีตเช่นเดียวกับกับระบบรูปแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนทั้ง 2 รูปแบบ สามารถกำเนิดสัญญาณอลวนแบบหลายวงม้วนได้อย่างถูกต้อง เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ ระบบมีความซับซ้อนของตัวดึงดูดหลักที่นำเสนอ สูงถึง 2.52 และ 2.57 พร้อมทั้งสามารถแก้ไขความผิดพลาดของการปรับค่าพารามิเตอร์ได้จากการทำอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบที่ 1 เป็นการออกแบบระบบอลวนด้วยออปแอมป์และอุปกรณ์ RC ที่มีฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น 2 ฟังก์ชัน ทำให้มีจำนวนอุปกรณ์ภายในวงจรค่อนข้างสูง ควรปรับเปลี่ยนการออกแบบวงจรเป็นรูปแบบอื่นๆ อาทิเช่น OTA เพื่อลดอุปกรณ์ภายในวงจร จากวงจรที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวน 5 ตัว ซึ่งจากคุณสมบัติอ่อนไหวต่อเงื่อนไขเริ่มต้นและความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งส่งผลต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ก่อให้เกิดสภาวะอลวน จึงควรลดพารามิเตอร์ลงเพื่อง่ายต่อการปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนของวงจรที่ 2 มีการนำอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ในการสร้างสัญญาณอลวน โดยการประมาณค่าด้วยวิธีการออยเลอร์และขนาด 8 บิต มีระดับสัญญาณ 256 ระดับ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าทางคณิตศาสตร์ จึงควรเพิ่มความละเอียดของระดับสัญญาณ และปริมาณอุปกรณ์ของของอุปกรณ์ตัวต้านทานที่มีจำนวนมากจากการใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อก R2R Ladder จึงควรปรับเปลี่ยนเป็น IC DAC สำเร็จรูปเพื่อลดปริมาณของอุปกรณ์ภายในวงจร

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.Paul. "An Introduction to Chaos Theory." Physics, (2016).
- [2] O.Christian, "A history of chaos theory." Dialogues in clinical neuroscience vol. 9,No.3, pp.279-89, 2007
- [3] H.R.Biswas, "CHAOS THEORY AND ITS APPLICATIONS IN OUR REAL LIFE." Mathematics, Physics 2020.
- [4] E N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow," J. Atmos. Sci., vol.20, no.2, pp. 130-141, 1963.
- [5] E. Glasner. "Sensitive dependence on initial conditions. Nonlinearity", Vol.6,No.6, pp.1067-1075, 1993.
- [6] J.D.Kevin, "The Butterfly Effect of the "Butterfly Effect"" , Nonlinear Dynamics Psychology and Life Sciences Vol.13, No.3, pp.279-88, August 2009
- [7] O. E. Röessler, "An Equation for Continuous Chaos," Physics Letters, vol.57A, no. 5, pp. 397-398, 1976.
- [8] J.C. Sprott, "A New Class of Chaotic Circuit," Physics Letters A, vol. 266, pp.19-23, 2000.
- [9] L.O. Chua, "Chua's circuit: an overview ten years late," J. Circuits Syst. Comput., vol.4, no.2, pp.117-159, 1994.
- [10] L.B. Bayar, "Chaos Theory and its Importance and Applications in Economics", T.C. MARMARA UNIVERSITY INTITUTE OF SOCIAL SCIENCES DEPARTMENT OF ECONOMICS, June-2005
- [11] X. Zang, "Applications of Chaotic Dynamics in Robotics", International Journal of Advanced Robotic Systems, May 2017
- [12] B.Zhang, and L.Liu, "Chaos-Based Image Encryption: Review, Application, and Challenges", Mathematics 2023
- [13] X. Zeng, "Chaos Theory and Its Applications to the Atmosphere". Bulletin of the American Meteorological Society Vol.74 ,No. 4, pp. 631-644 ,1993
- [14] G. Étienne "THE BUTTERFLY EFFECT", The Proceedings of the 12th International Congress on Mathematical Education, pp.19-39, January 2015
- [15] O.A. Joshua "Analysis of Logistic Maps" BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022
- [16] I. Sajid "STUDY OF NONLINEAR DYNAMICS USING LOGISTIC MAP" ,International Conference on Mathematics and its Applications in Information Technology, March 2008
- [17] O.G.Clark "THE STUDY OF ECOSYSTEM DYNAMICS USING SIMULATION", CANADIAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING at the Agricultural Institute of Canada Annual Conference, Vol.95, No.606, July 1995
- [18] N. Stergiou, "A Perspective on Human Movement Variability With Applications in Infancy Motor Development", Kinesiology Review, Vol.2 ,No.1,pp.93-102, 2013
- [19] R. N. Valani, "Attractor-driven matter", Chaos, Vol.33, No.4, FEBRUARY 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] S.C.Hill, “Toward Conceptualizing Race and Racial Identity Development Within an Attractor Landscape”, SAGE Open, July 2017
- [21] G.Chen, “An overview of bifurcation, chaos and nonlinear dynamics in control systems”, Journal of the Franklin Institute, Vol.331,No.6,pp.819-858, November 1994
- [22] N.A.Magnitskii.”Universal Bifurcation Chaos Theory and Its New Applications”,Mathematics ,2023
- [23] A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney and J.A. Vastano, “Determining Lyapunov exponents from a time series,” Phys. D., vol.16, pp.285–317, 1985.
- [24] M.Bask,” Testing chaotic dynamics via Lyapunov exponents”, University of Las Palmas de Gran Canaria, February 2000
- [25] A. M. López “Effect of parameter calculation in direct estimation of the Lyapunov exponent in short time series”, Discrete Dynamics in Nature and Society, Vol.7,No.1,pp.41-52,2002
- [26] D.A. Bromley,” Systems of Particles and Hamiltonian Dynamics”, Classical Mechanics, November 2009
- [27] A.S. Oke,” Validation of Kaplan-Yorke Dimension for some Attractors” Adekunle Ajasin University, November 2014
- [28] J. M. Nichols,” Controlling system dimension: A class of real systems that obey the Kaplan–Yorke Dimension ”, APPLIED PHYSICAL SCIENCES, Vol.100,No.26, pp.15299-15303, December 2003
- [29] J. Kaplan, “Chaotic behavior of multidimensional difference equations”, Functional Differential Equations and Approximations of Fixed Points, Lecture Notes in Mathematics, vol. 730, pp. 228–237 , 1979
- [30] A.S.Juarez,” Optimizing the Kaplan–Yorke Dimension of Chaotic Oscillators Applying DE and PSO” Technologies, Vol.7, No.2, March 2019
- [31] C.J. Yang,” Approximate and efficient calculation of dominant Lyapunov exponents of high-dimensional nonlinear dynamic systems” , Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 18, No. 12, pp. 3271-3277,December 2013,
- [32] wikipedia,”ไมโครคอนโทรลเลอร์”, 2023, [Online] Available:
<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%82%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%84%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%97%E0%B8%A3%E0%B8%A5%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C>
- [33] ARDUINO.CC, “Arduino – Introduction”, 2015 [Online] Available:
<http://arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
- [34] espressif,” ESP32”, [Online] Available:
<https://www.espressif.com/en/products/devkits/esp32-devkit>
- [35] raspberrypi, “Raspberry Pi Pico series”, [Online] Available:
https://www.raspberrypi.com/documentation/pico-sdk/index_doxygen.html

- [36] st, “STM32 32-bit Arm Cortex MCUs”, [Online] Available:
<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>
- [37] arduino.cc,” Arduino Mega 2560 Rev3”, [Online] Available:
<https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- [38] arduino.cc,”Language Reference”, [Online] Available:
<https://www.arduino.cc/reference/en/>
- [39] Md. Nurujjaman,” Enhanced Euler’s Method to Solve First Order Ordinary Differential Equations with Better Accuracy”, Journal of Engineering Mathematics & Statistics, Vol.4, No.1, March 2020
- [40] B. N. BISWAS,” A DISCUSSION ON EULER METHOD: A REVIEW”, Electronic Journal of Mathematical Analysis and Applications, Vol.1, No.2, pp.294-317, July 2013
- [41] C.B.Li,” Linear synchronization and circuit implementation of chaotic system with complete amplitude control” Chin. Phys. B, Vol.26, No.12, 2017
- [42] Li, C., Sprott J.C., Yuan, Z.Y., Li, H. Constructing chaotic systems with Total amplitude control. Int. J. Bifurcation Chaos, Vol.25, No.10, 2015
- [43] Wikipedia,” Serial communication”, [Online] Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_communication , August 2019
- [44] Advantech,” Parallel Communications Overview” [Online] Available:
<https://www.advantech.com/th-th/resources/white-papers/177478cf-b5c2-4871-b422-8bfc8a15ca41>, 2018
- [45] S.Engelberg,” The R-2R Ladder DAC” ,Digital Signal Processing, pp.85-88, 2008
- [46] R.Mancini ,“Op Amp For Everyone”, Texas Instruments Incorporated,2002
- [47] J.Karki, “Understanding Operational Amplifier Specifications”, Texas Instruments Incorporated, 2021
- [48] S.Pandey, “BASICS OF OPAMP (OPERATIONAL AMPLIFIER)”, Analog Electronics, January 2024
- [49] P.Tapashetti, “Design and Simulation of Op Amp Integrator and Its Applications”, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), Vol.1, No.3, February 2012
- [50] Chaniotakis and Cory, “Operational Amplifier Circuits”, American University of Beirut, 2016
- [51] J.M.Fiore, “Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits: Theory and Application / 3E”, Electrical Engineering Technology Mohawk Valley Community College, May 2021
- [52] M.F.Unlarsen, “Field Programmable Gate Array (FPGA)”, Programmable Smart Microcontroller Cards, pp.179-207, 2021
- [53] P.G. Gula, “FIELD-PROGRAMMABLE ANALOG ARRAYS:PAST, PRESENT AND FUTURE PERSPECTIVES”, IEEE Region 10 International Conference on Microelectronics and VLSI, pp.123-126, 1995

- [54] A.Karimov, A.Tutueva and D.Butusov, “Adaptive Generalized Synchronization between Circuit and Computer Implementations of the Rössler System”, Applied Sciences, Vol.11, no.1, 2021
- [55] X.Hu, B.Sang and N.Wang, “The chaotic mechanisms in some jerk systems”, AIMS Mathematics, Vol.7, No.9, 2022
- [56] S.Çiçek, “FPAA BASED DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SPROTT N CHAOTIC SYSTEM”, International Scientific and Vocational Studies Congress – Engineering, December 2019
- [57] W.A.Al-Musawi, W.A. Wali and M.A.Al-Ibadi, “Implementation of Chaotic System using FPGA”, 6th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), pp. 1-6, 2021
- [58] K. M. Cuomo, et al., “Circuit Implementation of Synchronized Chaos with Applications to Communications,” Physical Review Letters, vol. 71, no. 1, pp. 65-68, August 1993.
- [59] Y. Y. Hou, et al., “Rikitake Dynamo System, Its Circuit Simulation and Chaotic Synchronization via Quasi-Sliding Mode Control,” TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics, and Control, vol. 19, no. 4, pp. 1428-1438, August 2021.
- [60] S. Vaidyanathan, et al., “Analysis, Adaptive Control and Anti-Synchronization of a Six-Term Novel Jerk Chaotic System with two Exponential Nonlinearities and its Circuit Simulation” Engineering Science and Technology Review, Vol.8, No.2, pp.24-36, 2015
- [61] Q. Lai, et al., “A New Chaotic System with Multiple Attractors: Dynamic Analysis, Circuit Realization and S-Box Design”, Entropy, Vol.20, No.12, 2018
- [62] C.Volos, et al., “A simple chaotic circuit with a hyperbolic sine function and its use in a sound encryption scheme” Nonlinear Dynamics, Vol.89, pp.1047-1061, 2017
- [63] P.D.K.Kuate, and F.Hilaire . “Complex dynamics induced by a sine nonlinearity in a five-term chaotic system: FPGA hardware design and synchronization.” Chaos (Woodbury, N.Y.) vol. 30, No.12, 2020
- [64] C.Li, et al., “A chaotic jerk oscillator with interlocked offset boosting” The European Physical Journal Plus, Vol.139, No.242, 2024
- [65] R. Chiu, et al., “Implementation of a Chaotic Oscillator into a Simple Microcontroller” IERI Procedia, Vol.4, pp.247-252, 2013
- [66] M.Tunaa, and C.B.Fidanb, “Electronic circuit design, implementation and FPGA-based realization of a new 3D chaotic system with single equilibrium point”, Optik, Vol.127, pp.11786-11799, 2016
- [67] M.S.Azzaz, et al., “A new auto-switched chaotic system and its FPGA implementation” Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol.18, No.7, pp.1792-1804, 2013
- [68] M.Tuna, et al., “High speed FPGA-based chaotic oscillator design” Microprocessors and Microsystems, Vol.66, pp.72-80, 2019
- [69] F.Rahma, et al., “ANALOG PROGRAMMABLE ELECTRONIC CIRCUIT

- BASED CHAOTIC LORENZ SYSTEM” Basrah Journal for Engineering Sciences, Vol.14, No.1, pp.39-47, 2014
- [70] N.Korkmaz ,and I.E.SACU, “An Efficient Design Procedure to Implement the Fractional-Order Chaotic Jerk Systems with the Programmable Analog Platform”, Vol.3 / No.2, pp.59-66, 2021
- [71] K.Karawanich, et al., “Image cryptography communication using FPAA-based multi-scroll chaotic system”, Nonlinear Dynamics, Vol.112, pp. 4951–4976, 2024



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมจำลองผลตัวดึงดูด (Attractor) สำหรับโปรแกรม MATLAB

ส่วนของการกำหนดสมการระบบและฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

```
function f=Chaos_AEU(t,y)

global k A B C D
m=100;
n=50;
o=1000;

% ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นของระบบลอจิสติกแบบที่ 1
% a=C*y(1).*(-((tanh(100*y(1)+50/D)).*(tanh(100*y(1)-50/D)))/2)+0.5);
% b=(A*y(2)-B*tanh(1000*y(2)));

% ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นของระบบลอจิสติกแบบที่ 2
a=C*y(1).*(-((tanh(100*y(1)+50/D)).*(tanh(100*y(1)-50/D)))/2)+0.5);
b=A*y(2).*(-((tanh(100*y(2)+50/B)).*(tanh(100*y(2)-50/B)))/2)+0.5);

f=zeros(3,1);

% สมการระบบลอจิสติกการกระตุกรูปแบบใหม่
f(1)=y(2) + b;
f(2)=y(3);
f(3)= - k*y(3) - y(2) - a;
```

ส่วนของการพล็อตกราฟตัวดึงดูด

```
clc
clear
global k A B C D

%พารามิเตอร์ของระบบ
A=0.6;
B=0.2;
C=1;
D=2.5;
k=0.2;

[T,Y]=ode45(@Chaos_AEU,0:0.01:1000,[0.1 0.1 0.01]);
figure(5);

plot(T(1000:end),-Y(1000:end,1),'b','linewidth',1)
xlabel('\itx')
ylabel('\ity')
zlabel('\itz')
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
set(gca,'FontSize',12,'FontName','Times New Roman')
hold on;
```

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมจำลองการแยกออกไปสองทิศทาง (Bifurcation) สำหรับโปรแกรม MATLAB

```
clc
clear
global k A B C D
global k A B C D
A=2;
B=1;
C=2;
D=1;
% k=0.16;
figure();

K=0:0.1:1;
L=length(K);
for i=1:L
k=K(i);
options = odeset('RelTol',1e-6,'AbsTol',1e-8);
[T,Y]=ode45(@Chaos_AEU,0:0.1:1000,[0.1 0.1 0.01],options);
data=Y(10000:end,1);
for j=2:(length(data)-1)
if data(j)>data(j-1)&&data(j)>data(j+1)
plot(k,data(j),'k.','markersize',3);

hold on;
if j==20
break;
end
end
end
end
xlim([0 1])
ylim([-1 3])
xlabel('\itk')
ylabel('\itxmax')
set(gca,'FontSize',12,'FontName','Times New Roman')

title('The Bifurcation')
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

โปรแกรมจำลองเลขชี้กำลัง Lyapunov (Lyapunov Exponent) สำหรับโปรแกรม
MATLAB

ส่วนของการกำหนดสมการระบบฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นและเมตริกซ์จาโคเบียน(Jacobian Matrix)

```
function f=Jerk_AEU(t,X)
% Values of parameters
global k A B C D

x=X(1); y=X(2); z=X(3);

Y= [X(4), X(7), X(10);
     X(5), X(8), X(11);
     X(6), X(9), X(12)];

f=zeros(9,1);
m=100;
n=50;
o=1000;
A=1;
B=0.3;
k=0.5;
D=2.35;
C=1;
% ระบบอลวนที่นำเสนอรูปแบบที่ 1
f(1)=y+C*y.*(-( ((tanh(m*y+n/D)).*(tanh(m*y-n/D)))/2)+0.5);
f(2)=z;
f(3)=-k*z-y-(A*x-B*tanh(m*x));
% ระบบอลวนที่นำเสนอรูปแบบที่ 2
% f(1)=y+(A*y.*0.5*(tanh(100*y+50/B)-tanh(100*y-50/B)));
% f(2)=z;
% f(3)=-k*z-y-(C*x.*0.5*(tanh(100*x+50/D)-tanh(100*x-50/D)));

%Linearized system
% thesis1
Jac=[0, A + B*(1000*tanh(1000*y).^2 - 1000) + 1, 0;
     0,0, 1;
     (C*(tanh(100*x - 50/D) - tanh(100*x + 50/D)))/2 - (C*x*(100*tanh(100*x
- 50/D).^2 - 100*tanh(100*x + 50/D).^2))/2,-1, -k];

% thesis 2
% Jac=[ 0, 1+(A*y.*(100*tanh(100*y - 50/B).^2 - 100*tanh(100*y +
50/B).^2))./2 - (A*(tanh(100*y - 50/B) - tanh(100*y + 50/B)))./2, 0;
% 0, 0, 1;
% -(C*x.*(100*tanh(100*x - 50/D).^2 - 100*tanh(100*x +
50/D).^2))./2 - (C*(tanh(100*x - 50/D) - tanh(100*x + 50/D)))./2,
-1, -k];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%Variational equation
f(4:12)=Jac*Y;
```

ส่วนของการพล็อตกราฟเลขชี้กำลัง Lyapunov

```
clc
clear
global k A B C D

A=0.6;
B=0.3;
C=1;
D=2;
k=0.15;

[T,Res]=lyapunov(3,@Jerk_AEU,@code45,0,0.1,1000,[0.1 0.1 0.1],10);
figure
plot(T,Res,'linewidth',2);
ylim([-2 2]);
xlim([0 1000]);
XL(1)=xlabel('Time'); XL(2)=ylabel('Lyapunov exponent');
legend('L1','L2','L3');
set(XL,'FontSize',14,'Fontname','Times new Roman');
hold on;
grid on;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

โปรแกรมสำหรับบอร์ด Arduino เพื่อกำเนิดสัญญาณอลวน

```

// Pin Definitions

const int buttonPin1 = 2; // Button for mode 1
const int buttonPin2 = 3; // Button for mode 2
const int buttonPin3 = 4; // Button for mode 3

const int r2rOutputPinX[] = {22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29}; //
Digital output pins connected to R2R ladder

const int r2rOutputPinY[] = {30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37};
const int r2rOutputPinZ[] = {38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45};

// Variables
int mode = 0; // Current mode selected
int previousMode = 1; // Previous mode selected
bool modeSelected = false; // Flag to indicate if a mode has been
selected

////////////////////////////////////model1////////////////////////////////////

const float m = 100;
const float n = 50;
const float o = 1000;
const float A = 0.5 , B = 1.5 , C = 0.5, D = 1.5 , k = 0.43;
const float G = 1;
const float G3 = 1.2;
const float G2 = 1.1;

float x1 = 0.1; // Initial condition for x-coordinate
float y1 = 0.1; // Initial condition for y-coordinate
float z1 = 0.01; // Initial condition for z-coordinate
float dt1 = 0.1; // Time step

////////////////////////////////////

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

////////////////////////////////////model2////////////////////////////////////
const float m2 = 100;
const float n2 = 50;
const float o2 = 1000;
const float a2 = 2 , b2 = 1 , c2 = 2, d2 = 1 , k2 = 0.45;
float x2 = 0.1; // Initial condition for x-coordinate
float y2 = 0.1; // Initial condition for y-coordinate
float z2 = 0.01; // Initial condition for z-coordinate
float dt2 = 0.1; // Time step
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////model3////////////////////////////////////
const float m3 = 100;
const float n3 = 50;
const float o3 = 1000;
const float a3 = 1 , b3 = 2 , c3 = 3, d3 = 2 , k3 = 0.3;

float x3 = 0.1; // Initial condition for x-coordinate
float y3 = 0.1; // Initial condition for y-coordinate
float z3 = 0.01; // Initial condition for z-coordinate
float dt3 = 0.1; // Time step

void setup() {
    // Set button pins as input with internal pull-up resistors
    pinMode(buttonPin1, INPUT_PULLUP);
    pinMode(buttonPin2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(buttonPin3, INPUT_PULLUP);
    // Serial.begin(2000000);
    for (int i = 0; i < 8; i++)
    {
        pinMode(r2rOutputPinX[i], OUTPUT);
        pinMode(r2rOutputPinY[i], OUTPUT);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        pinMode(r2rOutputPinZ[i], OUTPUT);
    }
}

void loop() {
    // Read the state of each button
    int buttonState1 = digitalRead(buttonPin1);
    int buttonState2 = digitalRead(buttonPin2);
    int buttonState3 = digitalRead(buttonPin3);

    // Check if button 1 is pressed
    if (buttonState1 == LOW && mode != 1 && !modeSelected) {
        modeSelected = true;
        previousMode = mode;
        mode = 1;
        Serial.println("Mode 1 selected");
        // Add your mode 1 code here
    }
    // Check if button 2 is pressed
    if (buttonState2 == LOW && mode != 2 && !modeSelected) {
        modeSelected = true;
        previousMode = mode;
        mode = 2;
        Serial.println("Mode 2 selected");
        // Add your mode 2 code here
    }
    // Check if button 3 is pressed
    if (buttonState3 == LOW && mode != 3 && !modeSelected) {
        modeSelected = true;
        previousMode = mode;
        mode = 3;
        Serial.println("Mode 3 selected");
        // Add your mode 3 code here
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

// Check if any other button is pressed to reset the mode selection
if ((buttonState1 == LOW || buttonState2 == LOW || buttonState3 ==
LOW) && modeSelected) {
    modeSelected = false;

    Serial.print("Previous mode ");
    Serial.print(previousMode);

    Serial.println(" restored");
}

// Other code based on the selected mode
switch (mode) {
    case 1:
        {
            float dx = (y1 * G) + (((A * (y1 * G)) * (- (tanh(m * (y1 * G) +
(n / B)) * (tanh(m * (y1 * G) - (n / B)))) + 1))) / 2);
            float dy = (z1 * G);
            float dz = -(k * (z1 * G)) - (y1 * G) - (((C * (x1 * G)) * (-
(tanh(m * (x1 * G) + (n / D)) * (tanh(m * (x1 * G) - (n / D)))) + 1)) /
2);

            x1 += (dx * dt1);
            y1 += (dy * dt1);
            z1 += (dz * dt1);

            int digitalValueX = ((x1 - (0.6)) / (0.6 - (-0.6))) * 255;
            int digitalValueY = ((y1 - (0.6)) / (0.6 - (-0.6))) * 255;
            int digitalValueZ = ((z1 - (0.6)) / (0.6 - (-0.6))) * 255;

            for (int i = 0; i < 8; i++)
            {
                digitalWrite(r2rOutputPinX[i], bitRead(digitalValueX, i));

                digitalWrite(r2rOutputPinY[i], bitRead(digitalValueY, i));
            }
        }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        digitalWrite(r2rOutputPinZ[i], bitRead(digitalValueZ, i));
    }
}

break;

case 2:
{
    float dx = (y2 * G2) + (((a2 * (y2 * G2)) * (-tanh(m * (y2 * G2) + (n / b2)) * (tanh(m * (y2 * G2) - (n / b2)))) + 1)) / 2);
    float dy = (z2 * G2);
    float dz = -(k2 * (z2 * G2)) - (y2 * G2) - (((c2 * (x2 * G2)) * (-tanh(m * (x2 * G2) + (n / d2)) * (tanh(m * (x2 * G2) - (n / d2)))) + 1)) / 2);

    x2 += (dx * dt2);
    y2 += (dy * dt2);
    z2 += (dz * dt2);

    int digitalValueX = ((x2 - (2.2)) / (2.2 - (-2.2))) * 255;
    int digitalValueY = ((y2 - (0.8)) / (0.8 - (-0.8))) * 255;
    int digitalValueZ = ((z2 - (0.8)) / (0.8 - (-0.8))) * 255;
    for (int i = 0; i < 8; i++)
    {
        digitalWrite(r2rOutputPinX[i], bitRead(digitalValueX, i));

        digitalWrite(r2rOutputPinY[i], bitRead(digitalValueY, i));

        digitalWrite(r2rOutputPinZ[i], bitRead(digitalValueZ, i));
    }
}

break;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

case 3:

```

{

    float dx = (y3 * G3) + (((a3 * (y3 * G3)) * (-(tanh(m * (y3 *
G3) + (n / b3)) * (tanh(m * (y3 * G3) - (n / b3)))) + 1)) / 2);

    float dy = (z3 * G3);

    float dz = -(k3 * (z3 * G3)) - (y3 * G3) - ((c3 * (x3 * G3)) *
(-(tanh(m * (x3 * G3) + (n / d3)) * (tanh(m * (x3 * G3) - (n / d3)))) +
1)) / 2);

    x3 += (dx * dt3);
    y3 += (dy * dt3);
    z3 += (dz * dt3);

    int digitalValueX = ((x3 - (1.2)) / (1.2 - (-1.2))) * 255;
    int digitalValueY = ((y3 - (1)) / (1 - (-1))) * 255;
    int digitalValueZ = ((z3 - (1)) / (1 - (-1))) * 255;
    for (int i = 0; i < 8; i++)
    {
        digitalWrite(r2rOutputPinX[i], bitRead(digitalValueX, i));
        digitalWrite(r2rOutputPinY[i], bitRead(digitalValueY, i));
        digitalWrite(r2rOutputPinZ[i], bitRead(digitalValueZ, i));
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ระหว่างการศึกษา

การประชุมวิชาการครั้งที่ 1

**การประชุมวิชาการ
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45**
The 45th Electrical Engineering Conference (EECON-45)
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
Srinakharinwirot University

วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2565
ณ ภูสักธารรีสอร์ท อำเภอเมือง
จังหวัดนครนายก

Logos of sponsors and partners: PEA, IRCT, INTERLINK, ROHDE & SCHWARZ, ABEX, FES, HITACHI, YOKOGAWA, 3XL SOLUTION, PPTS, LDRA, SIGMA SOLUTIONS, Hitachi Energy, MTRD, Telesony, PULIN, MTE, genetron, LITHIUM BALANCE, P.G. Intergroup Co., Ltd., dSPACE, IEEE Photonics Society Thailand Chapter, EEFAAT, IEEE PES, and มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45
The 45th Electrical Engineering Conference (EECON-45)
วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2565 ณ ศูนย์ราชการ วังท่าพระ กรุงเทพมหานคร



วงจรถ่ายสัญญาณอลวนซับซ้อนสูงด้วยสมการการกระตุ้นร่วมกับฟังก์ชันคดแปลงสี่เหลี่ยมและสัญญาณขั้น

Jerk-based High Complex Chaotic Generator with Modified Rectangular and Signum Functions

จิรภูมิ ฉิมน้อย¹, วัชรพงศ์ วงศ์พร้อมมูล² และ ทิพนัน พรหมมี³

¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

pipat.pr@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวงจรถ่ายสัญญาณอลวนซับซ้อนสูงรูปแบบใหม่ จากหลักการแบบจำลอง Jerk โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่แตกต่างกันสองฟังก์ชัน ฟังก์ชันแรกเป็นฟังก์ชันสัญญาณคดแปลง ฟังก์ชันสองคือฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นใหม่คดแปลงจากฟังก์ชันสี่เหลี่ยม ระบบสามารถกำเนิดสัญญาณได้ด้วยค่าปรับสัมประสิทธิ์ (k) เพียงหนึ่งค่า และสามารถกำเนิดสัญญาณอลวนลักษณะสี่ลวดลวดสามม้วนได้ พร้อมด้วยพิสูจน์ทฤษฎีความซับซ้อนสูงของระบบด้วยค่า $D_{inf} = 2.45$ ระบบที่นำเสนอนี้วิเคราะห์ระบบเชิงทฤษฎีด้วยวิธีกำลัง Lyapunov และตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ด้วย The Bifurcation ในผลการทำงานจะจำลองการวิ่งบนรูปแบบเชิงตัวเลข และ ขึ้นกับการมีงานลวดวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบอนแอนะล็อก ตัวอย่างเช่น LF347, 54HC4066 โดยผลที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบกับผลเชิงตัวเลข พบว่าสอดคล้องกันตามทฤษฎีทุกประการ

คำสำคัญ: สัญญาณอลวน, ความซับซ้อนสูง, แบบจำลอง Jerk, ออปแอมป์, ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นใหม่, คิวคิงดูลีสี่ม้วน

Abstract

This work presents a new, highly complex chaotic generator from the conventional jerk model with two different nonlinear functions. The first function is the traditional signum function, and the second is the new modified rectangular function. The system can be generated the strange four-scroll attractor by adjusting only one coefficient (k). The Lyapunov exponent and the bifurcation investigate the fundamental dynamics theories of the system. The Kaplan-Yorke dimension (D_{inf}) is 2.45 also proves the high complexity of the system. In this work, the numerical simulations have confirmed the workability. The results from the circuit realization based on the low-cost commercially available components (LF347 and 54HC4066) are also demonstrated, which is agreeable to the theoretical and numerical results.

Keywords: Highly chaotic signal, Jerk model, OPAMP, New nonlinear function, Four-scroll attractor

1. บทนำ

ความอลวน (Chaotic) เป็นการศึกษาที่น่าสนใจในสาขาระบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear dynamic) เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ในสาขาที่ซับซ้อนได้ เช่น ธรณีศาสตร์ ชีววิทยา การเข้ารหัสด้านการสื่อสาร เป็นต้น แบบจำลองระบบอลวนแรกๆของ Lorenz สามารถแสดงลักษณะ

“ปีกผีเสื้อ (Butterfly effect)” ในปี ค.ศ. 1963 [1] เป็นแบบจำลองที่สำคัญในการศึกษาทฤษฎีความอลวน อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์อันดับสาม อีกหนึ่งรูปแบบการศึกษาระบบอลวนที่สำคัญคือ วงจรออสซิลเลทริกของ Chua ในปี ค.ศ. 1985 เป็นวงจรแรกที่พิสูจน์ว่าวงจรที่มีองค์ประกอบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเกิดสัญญาณอลวนสองวงม้วน (Double-scroll) ได้ [2] จากนั้นจึงมีการออกแบบวงจรออสซิลเลทริกที่กำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบใหม่มาเรื่อยๆโดยคดแปลงใช้อุปกรณ์อื่นๆ เช่น CFOA [3], OA [4], OTA [5] เป็นต้น รูปแบบของระบบอลวนทางคณิตศาสตร์ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดความซับซ้อนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ระบบอลวนอันดับสามที่แบบจำลองแรกเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1979 เรียกว่า “ไฮเปอร์อลวน (Hyperchaotic)” คิวคิงดูลีสี่ม้วน Rossler [6] สามารถแสดงสัญญาณอลวนได้มากกว่าสามมิติ (Dimension) ต่อมามีการพัฒนาระบบอลวนที่ซับซ้อนอีกหนึ่งรูปแบบ คือ คิวคิงดูลีสี่ลวดลวดสามม้วน (Multi-scroll attractor) ออกแบบโดยเพิ่มจุดหัก (Breakpoint) ของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นในระบบ

พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระบบอลวน มีความซับซ้อนสูงและมีพฤติกรรมที่หลากหลาย จำเป็นต้องพิสูจน์ด้วยทฤษฎีหลายประการ ทฤษฎีเลขชี้กำลัง Lyapunov [7] เป็นทฤษฎีหนึ่งที่สามารถระบุความถูกต้องของระบบอลวนได้ ด้วยเลขชี้กำลังที่เป็นบวกหนึ่งตัวในระบบหรือด้วยระบบความซับซ้อนของระบบด้วยสูตรของ Kaplan-Yorke (D_{inf}) [8] จากกรณีเลขชี้กำลัง Lyapunov มีค่าบวก วิธีที่กล่าวมาเป็นวิธีสากลที่ผลงานวิจัยนำไปประยุกต์ใช้ในการยืนยันการออกแบบระบบอลวน [9] โดยระบบอลวนหนึ่งระบบสามารถแสดงพฤติกรรมที่หลากหลายด้วยการปรับค่าแปร (Parameters) เช่น วงจรรอบคงที่ (limit cycle) ช่วงสองคาบ (2-period) ช่วงคาบไม่เป็นเชิงเส้น (non-periodic) พฤติกรรมอลวน (Chaotic behavior) เป็นต้น การพิสูจน์ค่าแปรที่ละเอียดสามารถแสดงได้ด้วยทฤษฎี Bifurcation [10]

ด้วยการศึกษาและค้นคว้า ในงานวิจัยนี้พยายามออกแบบระบบอลวนที่มีความซับซ้อนสูงด้วยลักษณะคิวคิงดูลีสี่ลวดลวดสามม้วน และเลือกใช้แบบจำลองการกระตุ้น (Jerk model) ค้นคิดโดย J.C. Sporin ในปี ค.ศ. 2000 [11] เป็นระบบสมการอนุพันธ์อันดับสาม หนึ่งในสมการ $\dot{x} = F(x, \dot{x}, \ddot{x})$ ประกอบด้วย x คือ ตำแหน่ง \dot{x} คือ ความเร็ว \ddot{x} คือ ความเร่ง และ \ddot{x} คือการกระตุ้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีโครงสร้างไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



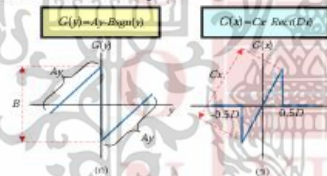
ซับซ้อน เป็นอิสระต่อกรอกแบบความไม่เป็นเชิงเส้น และเหมาะสำหรับนำไปออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้ในลักษณะต่างๆ เช่น ความปลอดภัยด้านการสื่อสาร

งานวิจัยนำเสนอลักษณะสัญญาณคลื่นซับซ้อนสูงแบบตัวดึงดูดสี่วงม้วน (Four-Scroll attractor) จากหลักการของแบบจำลองการกระตุ้นโดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นสองลักษณะ ฟังก์ชันตัดแปลง Signum และฟังก์ชันตัดแปลงที่เหลื่อม ทำให้ได้สัญญาณคลื่นรูปแบบใหม่ที่ซับซ้อนสูง พิสูจน์ด้วยค่า $D_{Ly} = 2.45$ ในระบอบความถี่ออกแบบมีการวิเคราะห์เลขชี้กำลัง Lyapunov และพลวัตภูมิ Bifurcation รวมถึงมีการสร้างเป็นวงจรเพื่ออินทิเกรตทางทฤษฎี โดยใช้ OPAMP (LF347) ร่วมกับ 54HC4066 และอุปกรณ์พาสซีฟ จำลองด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งลักษณะสัญญาณซับซ้อนสูงที่ได้ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการเข้ารหัส-ถอดรหัสความปลอดภัยด้านการสื่อสาร ทั้งรูปแบบดิจิทัล (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์) และแบบแอนะล็อก (วงจร)

2. การวิเคราะห์และออกแบบระบบลอจิกที่นำเสนอ

2.1 หลักการออกแบบ

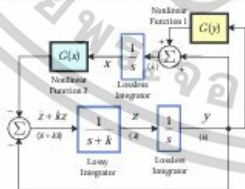
งานวิจัยนี้ดัดแปลงแบบจำลองการกระตุ้นเดิม (11) โดยทำงานร่วมกับฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นสองฟังก์ชัน $G(x)$ และ $G(y)$ [12] โดยฟังก์ชัน $G(x)$ เป็นฟังก์ชันตัดแปลง Signum ที่เป็นฟังก์ชันพื้นฐานของแบบจำลองการกระตุ้น นำมาประยุกต์ใช้กับฟังก์ชัน $G(x)$ เป็นฟังก์ชันรูปแบบใหม่ที่ดัดแปลงจากฟังก์ชันที่เหลื่อม (Rectangular) [5] มีลักษณะตัวอย่างและค่าคงที่ของฟังก์ชันดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น (ก) ฟังก์ชันตัดแปลง Signum (ข) ฟังก์ชันตัดแปลงที่เหลื่อม

2.2 ระบบลอจิกอนุพันธ์อันดับสามที่นำเสนอ

ระบบลอจิกที่ดัดแปลงจากระบบการกระตุ้น โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นสองฟังก์ชัน แสดงตัวอย่างบล็อก ไดอะแกรมได้ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่นำเสนอ สมการอนุพันธ์อันดับสาม เขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$\ddot{x} + k\dot{x} - (\dot{x} - G(\dot{x})) + G(x) = 0 \quad (1)$$

โดยที่ $\dot{x} = G(x) + x$

สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง สามสมการ เขียนได้ดังสมการที่ (2)

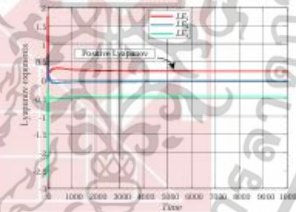
$$\begin{cases} \dot{x} = y + G(y), \\ \dot{y} = z, \\ \dot{z} = -kz - y - G(x). \end{cases} \quad (2)$$

กำหนด $G(x) = Cx - \text{Rect}(Dx)$, $G(y) = Ay - B\text{sgn}(y)$, และตัวแปร A, B, C, D และ k เป็นค่าคงที่บวก

ระบบสมการ (1) ที่นำเสนอ สามารถกำหนดพฤติกรรมพลวัตได้หลากหลายจากการปรับตัวแปร k เพียงหนึ่งค่า เช่น จุดคงที่ (Stable point) ความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-periodic) ตัวดึงดูดวงม้วนเดี่ยว (Single-scroll attractor) ตัวดึงดูดสองวงม้วน (Double-scroll attractor) รวมถึงสามารถสร้างลักษณะสัญญาณซับซ้อนสูง คือ ตัวดึงดูดสี่วงม้วน จากการกำหนดตัวแปร $A=0.6, B=0.3, C=1, D=2.5, k=0.4$ และเงื่อนไขเริ่มต้นของตัวแปรสถานะ $(x_0, y_0, z_0) = (0.1, 0.1, 0.1)$.

2.3 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระบบ

ทฤษฎีเลขชี้กำลัง Lyapunov สามารถบ่งบอกอัตราการแยกตัวของวิถีวิถีในระบบที่เฟส (Phase space) เป็นค่าเชิงปริมาณได้ [7] เพื่อบ่งบอกว่ามีพฤติกรรมเป็นลอจิก วิธีสากลที่ใช้ในการคำนวณค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov คือ อัลกอริทึมของ Wolf [8] บนโปรแกรม MATLAB โดยระบบที่มีเลขชี้กำลังลบในบริเวณเริ่มต้นแปรสเถียร $(x_0, y_0, z_0) = (0.1, 0.1, 0.1)$ และตัวแปรสำหรับคำนวณลักษณะตัวดึงดูดสี่วงม้วน คือ $A=0.6, B=0.2, C=1, D=2.5$ และ $k=0.4$ ทำการหาค่า Lyapunov (LE) ที่ได้ของระบบ คือ $LE_1 = -0.241701, LE_2 = -0.04$ และ $LE_3 = -0.448254$ ดังรูปที่ 3 ระบบอินทิเกรตพฤติกรรมความเป็นลอจิกของระบบด้วยค่า LE ที่เป็นบวก



รูปที่ 3 ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov ของระบบที่นำเสนอ จากนั้นจะนำค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov มาคำนวณพิสูจน์ความซับซ้อนของระบบด้วยสูตร Kaplan-Yorke (D_{KY}) ดังนี้

$$D_{KY} = j + \frac{1}{|LE_{j+1}|} \sum_{i=1}^j LE_i = 2 + \frac{LE_1 + LE_2}{|LE_3|} = 2 + \frac{-0.241701 - 0.04}{|-0.448254|} = 2.45 \quad (3)$$

โดยที่ j คือ ค่าจำนวนเต็มสูงสุด เมื่อ $\sum_{i=1}^j LE_i \geq 0$ และ $LE_{j+1} < 0$ ดังนั้นค่า D_{KY} จะถูกกำหนดอยู่ในช่วง $j \leq D_{KY} < j+1$, ค่า D_{KY} สามารถระบุความซับซ้อนและชนิดของระบบลอจิกได้ [10]

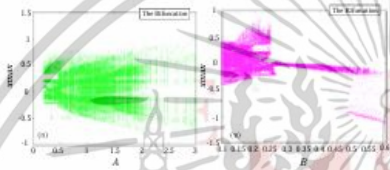
3. พฤติกรรมพลวัตตัวแปรต่างๆ ของระบบ

บทนี้จะแสดงตัวแปร (Parameter) ทั้งหมดในระบบที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมพลวัตจนถึงความเป็นลอจิกของระบบที่ออกแบบ



โดยจำลองผลบนโปรแกรม MATLAB ด้วยทฤษฎี Bifurcation ซึ่งสามารถแสดงผลด้วยกราฟกระจายตัวของตัวแปรสเกลเพื่อบ่งบอกพฤติกรรมจากค่าตัวแปรในแต่ละช่วง ในงานนี้จะแสดงผลด้วยเอาต์พุตตัวแปร x_{max}

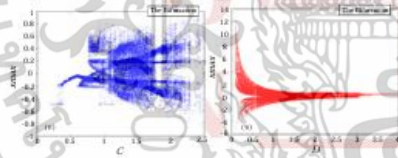
รูปที่ 4 แสดงตัวแปร A และ B จากฟังก์ชัน $G(x)$ โดยรูปที่ 4(ก) แสดงตัวแปร A ถูกกำหนดอยู่ในช่วง 0 ถึง 3 แสดงช่วงพฤติกรรมของเวลาที่ชัดเจนได้ในช่วง 2.2 ถึง 0.42 จากนั้นรูปที่ 4(ข) แสดงตัวแปร B ในช่วง 0.1 ถึง 0.6 ที่ตัวแปร B สามารถแสดงช่วงพฤติกรรมของเวลาที่ชัดเจนได้ในช่วง 0.1 ถึง 0.23 โดยช่วงที่ระบุความเป็นอนันต์ที่ชัดเจนจาก Bifurcation ก็คือช่วงที่มีการกระจายตัวของค่าตัวแปรที่ไม่เป็นระเบียบของตัวแปรสเกล $x(x_{max})$ [10]



รูปที่ 4 The bifurcation ของตัวแปรจากฟังก์ชัน $G(x)$

- (ก) เอาต์พุต x_{max} กับตัวแปร A ($B=0.2, C=1, D=2.5, k=0.4$)
- (ข) เอาต์พุต x_{max} กับตัวแปร B ($A=0.6, C=1, D=2.5, k=0.4$)

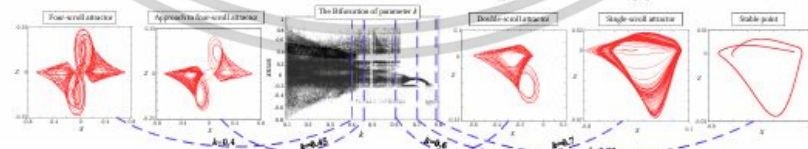
รูปที่ 5 แสดงตัวแปร C และ D จากฟังก์ชัน $G(x)$ โดยรูปที่ 5(ก) แสดงตัวแปร C กำหนดอยู่ในช่วง 0 ถึง 2.5 แสดงช่วงพฤติกรรมของเวลาที่ชัดเจนได้สองช่วง ช่วงแรกคือ 0.78 ถึง 1.75 และช่วงที่สองคือ 1.88 ถึง 2.36 จากนั้นรูปที่ 5(ข) แสดงตัวแปร D ในช่วง 0 ถึง 4 สำหรับตัวแปร D สามารถแสดงพฤติกรรมของเวลาที่ค่อนข้างกว้าง ตั้งแต่ช่วง 0 ถึง 5.38 โดยตัวแปร D มีผลสำคัญในการปรับขนาด (Amplitude) ของตัวส่งสัญญาณ



รูปที่ 5 The bifurcation ของตัวแปรจากฟังก์ชัน $G(x)$

- (ก) เอาต์พุต x_{max} กับตัวแปร C ($A=0.6, B=0.2, D=2.5, k=0.4$)
- (ข) เอาต์พุต x_{max} กับตัวแปร D ($A=0.6, B=0.2, C=1, k=0.4$)

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวแปร k สหรัยแสดงพฤติกรรมพลวัตที่หลากหลายของระบบที่นำเสนอบน โดยรูปที่ 6 แสดง The Bifurcation ของตัวแปร k ในช่วง 0.1 ถึง 0.8 กำหนดตัวแปรอื่นคือ $A=0.6, B=0.2, C=1$ และ $D=2.5$

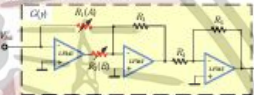


รูปที่ 6 วิวัฒนาการของตัวส่งสัญญาณเปรียบเทียบกับตัวแปร k จาก The bifurcation

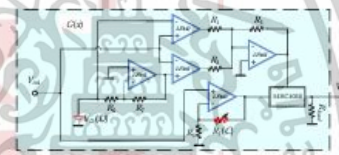
เปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงลักษณะตัวส่งสัญญาณที่เฟส โดยเริ่มจากลักษณะจุดคงที่ แสดงที่ $k=0.78$ ลักษณะตัวส่งสัญญาณเดียว แสดงที่ $k=0.7$ ลักษณะตัวส่งสัญญาณสองวงมัน แสดงที่ $k=0.6$ และช่วงเข้าใกล้ตัวส่งสัญญาณวงมัน แสดงที่ $k=0.45$ โดยลักษณะสัญญาณของเวลาที่ซับซ้อนสูง ลักษณะตัวส่งสัญญาณสองวงมันสามารถแสดงได้ตั้งแต่ $k=0.4$ ผลของลักษณะตัวส่งสัญญาณแสดงบนระนาบ $z-x$ โดยจะมีการอินทรีย์ผลเปรียบเทียบกับวงจรในหัวข้อที่ 5

4. การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณ

ในส่วนการออกแบบวงจร ดูออกแบบเพื่ออินทรีย์หลักการสร้างจากรูปที่ 2 โดยวงจรย่อยสองส่วนแรก คือ วงจรฟังก์ชันคัดแปลง $\text{signum}(G(x))$ และ วงจรฟังก์ชันคัดแปลงที่เลื่อน $G(x)$ แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ ออกแบบโดยใช้อุปกรณ์ต่อไปนี้ LF347 ร่วมกับสวิตช์ 54HC4066 และอุปกรณ์พาสซีฟ RC

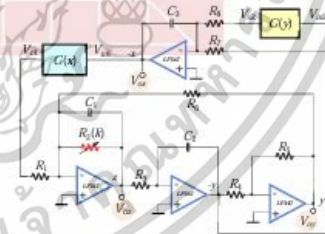


รูปที่ 7 วงจรฟังก์ชันคัดแปลง Signum โดยใช้ OPAMP



รูปที่ 8 วงจรฟังก์ชันคัดแปลงที่เลื่อน โดยใช้ OPAMP

สำหรับวงจรรูปที่ 7 ฟังก์ชันคัดแปลง Signum สามารถปรับค่าที่ A และ B ด้วยตัวคานทานปรับค่าได้ (POT) ที่ $R_1(A)$ และ $R_2(B)$ ส่วนรูปที่ 8 ฟังก์ชันคัดแปลงที่เลื่อน สามารถปรับค่าที่ C และ D ได้จาก ตัวคานทานปรับค่าได้ $R_3(C)$ และแรงดันพรหซโอสต์ ($V_{ref}(D)$) ตามลำดับ จากนั้นนำไปออกแบบเป็นวงจรรวมหลักการรูปที่ 2 ได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 วงจรกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ OPAMP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45
 The 45th Electrical Engineering Conference (EECON-45)
 วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2565 ณ ศูนย์ราชการ 3 สอาร์ท อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก

รูปที่ 9 คือวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลเตอร์ที่สามารถปรับเฟสอินพุท
 การกำเนิดสัญญาณได้ด้วยสัมประสิทธิ์ k (R_2) หรือ Quality factor ของ
 คุณสมบัติตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ดังสมการที่ (4)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{1}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}\right)} \quad (4)$$

กำหนด $R_1=R_3=R_4=R_5=R_6=R_7=R_8=R$ และ $C_1=C_2=C_3=C$ โดยวงจร
 สามารถแสดงสัญญาณออสซิลเลชันที่เอาต์พุตแรงดัน V_{ox} , V_{oy} และ V_{oz}

5. ผลจำลองการทำงานของวงจร

ในการแสดงผลจำลองการทำงานของวงจร จำลองผลด้วยโปรแกรม
 PSpice โดยเปรียบเทียบกับผลเชิงตัวเลขที่จำลองด้วยโปรแกรม
 MATLAB เพื่อยืนยันหลักการสร้างแบบจำลองที่นำเสนอ



รูปที่ 10 แสดงองค์พืดสัญญาณออสซิลเลชันของวงจรพร้อมลักษณะตัวตั้งจุด
 (ก) ลักษณะจุดคงที่ ที่ $R_2 = 305\Omega$ (ข) ลักษณะตัวตั้งจุดสองวงมัน ที่ $R_2 = 800\Omega$ (ค) ลักษณะเริ่มต้นตัวตั้งจุดตั้งวงมัน ที่ $R_2 = 875\Omega$ (ง) ลักษณะตัว
 ตั้งจุดตั้งวงมัน ที่ $R_2 = 1.25k\Omega$

วงจรถูกกำหนดแรงดัน $\pm 5V$ กำหนดตัวต้านทาน $R=1k\Omega$ และตัวเก็บ
 ประจุ $C=0.1\mu F$ ซึ่งได้ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน
 เท่ากับ 2kHz โดยตัวต้านทานสำหรับกำหนดค่าทั้งที่ $A=0.6$, $B=0.2$, $C=1$
 และ $D=2.5$ ถูกกำหนดโดย $R_1(A) = 4.1k\Omega$, $R_2(B) = 13.5k\Omega$, $R_3(C) =$

$2.5k\Omega$ และแรงดันทรานซิสต์ $V_{ce}(D)=0.19V$ ตามลำดับ วงจรสามารถ
 กำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน โดยแสดงสัญญาณที่เอาต์พุตแรงดัน V_{ox} พร้อมกับ
 ลักษณะตัวตั้งจุดโดยอิมพัลส์แอมพลิจูดแรงดัน $V_{in}-V_{out}$ และปรับตัวต้านทาน
 $R_2(k)$ เพื่อแสดงพฤติกรรมพลวัตจนถึงลักษณะออสซิลเลชัน แสดงดังรูปที่ 10

6.บทสรุป

บทความนี้นำเสนอสัญญาณออสซิลเลชันซับซ้อนสูงรูปแบบใหม่ จาก
 หลักการแบบจำลอง Jerk โดยใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่แตกต่งกันสอง
 ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันคัตแปลง Signum และฟังก์ชันใหม่คิดแปลงจาก
 ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม ระบบที่ออกแบบสามารถกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันที่
 ซับซ้อนสูงด้วยลักษณะตัวตั้งจุดตั้งวงมัน พร้อมทั้งสามารถแสดง
 พฤติกรรมพลวัตที่หลากหลายจากการปรับค่าสัมประสิทธิ์ (k) เพียงหนึ่ง
 ค่า ระบบที่สุ่มความซับซ้อนสูงด้วยค่า Kaplan-Yorke Dimension (D_{KY})
 เท่ากับ 2.48 พร้อมทั้งตรวจสอบทฤษฎีคุณสมบัติพื้นฐานทางพลวัตด้วย
 The bifurcation และเลขชี้กำลัง Lyapunov งานวิจัยนี้มีการออกแบบวงจร
 เพื่อยืนยันหลักการสร้างเชิงตัวเลขด้วยอุปกรณ์พื้นฐานออปแอมป์
 (LF347) ร่วมกับตัวจูน 54HC4066 จำลองผลด้วยโปรแกรม PSpice
 และพบว่าผลที่ได้จากวงจรสอดคล้องกับผลเชิงตัวเลขตามทฤษฎีทุก
 ประการ ซึ่งลักษณะสัญญาณซับซ้อนสูงที่ได้ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้
 ในการเข้ารหัส-ถอดรหัสที่ก้าวข้ามปลอดภัยด้านการสื่อสาร ทั้งรูปแบบ
 ดิจิตอล (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์) และแบบแอนะล็อก (วงจร)

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow," *J. Atmos. Sci.*, vol.20, no.2, pp. 130-141, 1963.
- [2] T. Matsumoto, "A Chaotic Attractor from chua's Circuit," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-31, no.12, pp.1056-1058, DEC. 1984.
- [3] J.C. Sprott, "A New Class of Chaotic Circuit," *Physics Letters A*, vol. 266, pp.19-23, 2000.
- [4] V. Christos and et.al., "A simple chaotic circuit with a hyperbolic sine function and its use in a sound encryption scheme," *Nonlinear Dyn.*, vol.89, no.13, 2017.
- [5] กุณานันต์ ละระวัช และ พิทักษ์ ทรมานมี "วงจรถูกเบี่ยงสัญญาณออสซิลเลชันด้วยลักษณะตัวตั้งจุดแปลงในรูปแบบการกระทำ" งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 44, โรงแรม ดิ อิมเพรส จังหวัดน่าน, หน้า 574-577, 17-19 พฤศจิกายน, ปี 2565.
- [6] O. E. Rössler, "An Equation for Continuous Chaos," *Physics Letters*, vol.57A, no. 5, pp. 397-398, 1976.
- [7] J. Argyris, G. Faust and M. Haïse "An Exploration of Chaos," Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.
- [8] A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney and J.A. Vastano, "Determining Lyapunov exponents from a time series," *Phys. D.*, vol.16, pp.285-317, 1985.
- [9] K.E. Chlouverakis and J.C. Sprott, "A comparison of correlation and Lyapunov dimensions," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol.200, no.1-2, pp. 156-164, Jan. 2005.
- [10] R.O. Medrano-T, M.S. Baptista and L.L. Caldas, "Basic structures of the Shilnikov homoclinic bifurcation scenario," *CHAOS*, vol.15, ID:033112, 2005
- [11] J. C. Sprott, "Some simple chaotic flows," *American J. Phys.*, vol.50, no.2, pp.647-650, Jan. 1994.
- [12] K. Karawanich and P. Prommee, "A Four-Scroll Chaotic Generator based on Two Nonlinear Functions," 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2022).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการครั้งที่ 2



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๖
The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)





จัดการประชุมโดย
สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ระหว่างวันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566
 ณ โรงแรมดิwana พลาซ่า กระบี่ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่

(PW) ไฟฟ้ากำลัง	(DS) การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	(PE) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
(PH) โฟโตนิกส์	(CT) ระบบควบคุมและการวัดคุม	(EL) อิเล็กทรอนิกส์
(CM) ไฟฟ้าสื่อสาร	(CP) คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ	(RE) พลังงานหมุนเวียน
(BE) วิศวกรรมชีวการแพทย์	(GN) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า	(HS) ระดับมัธยมศึกษา
(ETC) นวัตกรรมอัจฉริยะ		

สนับสนุนโดย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระบบอลวนซับซ้อนสูงต้นทุนต่ำปรับรูปแบบได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Low-cost Microcontroller-based Reconfigurable High-complex Chaotic Generator

จิรัชฎ์ ฉิมน้อย คุณานนต์ คณะราชนิเทศศาสตร์ และ พิพัฒน์ พรหมมี*

ภาควิชาวิศวกรรม โทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: plpat.pr@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอตัวกำเนิดสัญญาณอลวนซับซ้อนสูงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสามารถสร้างลักษณะตัวดึงดูดอลวนแตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ สองม้วน (2-Scrolls) สามม้วน (3-Scrolls) และสี่ม้วน (4-Scrolls) ที่มีความอลวนซับซ้อนสูง การออกแบบวงจรประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ R2R Ladder ร่วมกับสวิตช์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับออกแบบวงจรมีต้นทุนต่ำ การกำเนิดสัญญาณอลวนหลักจะใช้อัลกอริทึมสัญญาณกระดูกแบบคัสเคดลง โดยสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของระบบได้อย่างอิสระ ประสิทธิภาพของระบบสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ ผลการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม MATLAB มีการเปรียบเทียบ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกันเป็นอย่างดี ระบบที่ออกแบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสิ่งต่าง ๆ เช่น เทคโนโลยีการเข้ารหัสลับ (Cryptography) สุ่มเส้นทางหุ่นยนต์ (Random Robotics) เป็นต้น

คำสำคัญ: ออสซิลเลเตอร์แบบอลวน ต้นทุนต่ำ ไมโครคอนโทรลเลอร์ กุณลักษณ์ใหม่ ออลวนซับซ้อนสูง

Abstract

This paper proposed a microcontroller-based high-complex chaotic generator. The proposed chaotic system can generate three different attractors, including 2-scroll, 3-scroll, and high-complex chaotic 4-scroll. The low-cost components include a microcontroller, R2R Ladder, and switches. In chaotic generator uses the modified jerk-based algorithm, which can independently reconfigure the parameters of the nonlinear functions. The experimental and numerical MATLAB simulation results are exhibited and compared, which are agreeable performances. Finally, the proposed system is conveniently applied in many engineering areas, such as cryptography, random robotics, etc.

Keywords: Chaotic generator, Low-cost, Microcontroller, Reconfigurable, High-Complex chaotic

1. บทนำ

ระบบอลวนระบบแรกถูกค้นพบโดย Edward Lorenz ในปี ค.ศ. 1963 มีชื่อว่า Lorenz model [1] หรือรู้จักกันในชื่อ โมเดลปีกผีเสื้อ (Butterfly model) และได้ค้นพบพฤติกรรมของระบบอลวนคือ การอ่อนไหวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น (Sensitive to initial condition) หรือเรียกว่า the butterfly effect นอกจาก Lorenz แล้ว ระบบอลวนระบบต่างๆ ถูกคิดค้นขึ้นมากอีกหลายระบบด้วยกันในปัจจุบัน โดยระบบที่รู้จักกันดีก็คือระบบ Rossler [2] และ ระบบ Jerk [3] ในปัจจุบันนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับ

พฤติกรรมอลวนในระบบไม่เชิงเส้นรูปแบบใหม่ และ การนำประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ [4] วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้รับความนิยมอย่างสูงมากในหมู่นักวิจัย โดยสร้างวงจรมีสัญญาณอลวนแบบแอนะล็อกด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ไดโอด ทรานซิสเตอร์ OTA [5-6] เป็นต้น ในการสร้างวงจรมีสัญญาณอลวนแบบแอนะล็อกนั้น จะมีข้อเสียคือหากมีความต้องการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสัญญาณเอาต์พุต จำเป็นต้องทำการปรับแต่งค่าอุปกรณ์ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย นอกจากนี้วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบแอนะล็อกมีความอ่อนไหวต่อความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเมื่อพิจารณาพฤติกรรมของระบบอลวนที่มีความไวต่อเงื่อนไขต่อเงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อนำไปประยุกต์ใช้จำเป็นต้องใช้ความแม่นยำและกระบวนการที่จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่สมบูรณ์แบบนั้นเป็นผลมาจากการเลือกพารามิเตอร์ของวงจรมีสัญญาณอลวนอย่างแม่นยำนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเรื่องที่ยากมากเนื่องจากความไม่สมบูรณ์โดยธรรมชาติของส่วนประกอบแอนะล็อกเหล่านี้ [7]

งานวิจัยนำเสนอออสซิลเลเตอร์แบบอลวนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้วงจร R2R Ladder ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณแอนะล็อก การออกแบบดิจิทัลมีข้อดีคือการออกแบบแอนะล็อก ได้แก่ คุณภาพที่ต่ำกว่าอุปกรณ์ความถี่สูงในการปรับ ขนบของอุปกรณ์ และการใช้พลังงาน โดยในงานนี้สร้างตัวดึงดูดอลวนที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบจากระบบเดียวกัน โดยลักษณะอลวนทั้ง 3 รูปแบบสามารถกำเนิดสัญญาณได้โดยง่ายจากการกดสวิทช์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งระบบที่ออกแบบสามารถสัญญาณอลวนที่ซับซ้อนสูงได้ถึง สี่ม้วน ด้วยค่าประสิทธิภาพความซับซ้อน (D_{inf}) เท่ากับ 2.57 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกตรวจสอบอย่างละเอียดด้วยการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากโปรแกรม MATLAB

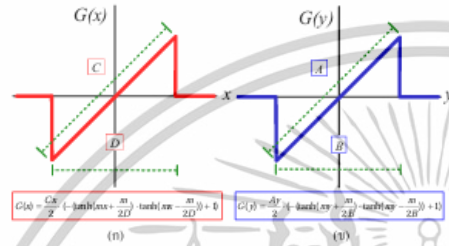
2. การวิเคราะห์และออกแบบ

2.1 หลักการออกแบบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงระบบอลวนจากระบบ Jerk ให้ได้ระบบรูปแบบใหม่ และมีความซับซ้อนสูง โดยการเพิ่มฟังก์ชันไม่เชิงเส้นจาก 1 ตำแหน่ง เป็น 2 ตำแหน่ง โดยใช้ฟังก์ชัน $G(x)$ และ $G(y)$ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมคัสเคดลง (Modified Rectangular function) [5] แต่ละฟังก์ชันมีพารามิเตอร์ 2 ตัว ในฟังก์ชัน $G(x)$ ใช้พารามิเตอร์ C, D และฟังก์ชัน $G(y)$ ใช้พารามิเตอร์ A, B แสดงตัวอย่าง



ฟังก์ชัน ดังรูปที่ 1 ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของฟังก์ชันโดย A, C เป็นพารามิเตอร์สำหรับปรับความสูงของรูปฟังก์ชัน B, D เป็นพารามิเตอร์สำหรับปรับความกว้างของรูปฟังก์ชัน จากคุณสมบัติของระบบอลวน คือ ความอ่อนไหวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เพียงตัวใดตัวหนึ่งเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างมาก



รูปที่ 1 รูปตัวอย่างฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องซิม (ก) ฟังก์ชัน $G(x)$ (ข) ฟังก์ชัน $G(y)$

2.2 การสร้างสัญญาณอลวนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

หัวข้อนี้แสดงการสร้างสัญญาณอลวน 3 รูปแบบ คือ ตัวดึงสัญญาณสองขั้ว สามขั้ว และสี่ขั้ว ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้สมการอนุพันธ์ระดับอันดับหนึ่ง สมการที่ปรับปรุงจากระบบ Jeck เขียนได้ดังสมการที่ (1) [5] ระบบอลวนที่นำเสนอในหัวข้อนี้ มีสมการดังนี้

$$\begin{cases} \dot{x} = y + G(x), \\ \dot{y} = z, \\ \dot{z} = -kz - y - G(x). \end{cases} \quad (1)$$

โดยฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น $G(x)$ และ $G(y)$ แสดงในสมการ ดังนี้

$$G(x) = \frac{Cx}{2} \left(-\tanh\left(\frac{mx}{2D}\right) + \tanh\left(\frac{mx}{2D}\right) + 1 \right) \quad (2)$$

$$G(y) = \frac{Ay}{2} \left(-\tanh\left(\frac{my}{2D}\right) + \tanh\left(\frac{my}{2D}\right) + 1 \right) \quad (3)$$

ฟังก์ชันในสมการที่ (2) - (3) เป็นฟังก์ชันรูปแบบเดียวกันดังกันที่ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกไว้ โดยประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ A, B, C, D, k และ m ($m=100$ คือค่าคงที่เสมอ)

เริ่มทำงานโดยการกำหนดพารามิเตอร์และสมการของระบบอลวนรูปแบบต่างๆ ค่าพารามิเตอร์ถูกแสดงในตารางที่ 1 และกำหนดฮาร์ดแวร์ดิจิทัลเพื่อแสดงสัญญาณเอาต์พุตทั้ง 3 แกน โดยไมโครสร้างอัลกอริทึมของโปรแกรม ดังนี้

ส่วนที่ 1 กำหนดฟังก์ชัน ไม่เป็นเชิงเส้นจากสมการที่ (2) และ (3)

ส่วนที่ 2 กำหนดสมการอนุพันธ์จากสมการที่ (1)

ส่วนที่ 3 อัปเดตค่าจากตัวแปรในส่วนที่ 2 ด้วยวิธีการของออยเลอร์

เพื่อประมวลค่าแต่ละสมการอนุพันธ์ (ODE) ของระบบที่มีสมการ

ส่วนที่ 4 เป็นกระบวนการควบคุมขนาดสัญญาณ (Amplitude Control :AMC) เพื่อปรับค่าจากส่วนที่ 3 ให้อยู่ในช่วงทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอยู่ในช่วง 0-5 V อธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 3.2

ส่วนที่ 5 เป็นการสร้างสัญญาณอลวนแบบดิจิทัลขนาด 8 บิตโดยนำค่าที่ได้จากส่วนที่ 4 ส่งผ่านเซตดิจิทัลที่กำหนดไว้ข้างต้นไปยังวงจร R2R Ladder เพื่อค่าเอาต์พุตอลวนแบบแอนะล็อกแสดงตัวอย่างโปรแกรม ดังรูปที่ 2

```
void loop()
{
  float G1=C*(C*x)/2*(-tanh(m*x/2/D)+tanh(m*x/2/D)+1)+B;
  float G2=C*(C*y)/2*(-tanh(m*y/2/D)+tanh(m*y/2/D)+1)+B;
  float dx = -y+G1;
  float dy = -(k*z+G2);
  x += (dx*dt);
  y += (dy*dt);
  z += (z*dt);
  int digitalValueX = Alpha*(x - (Vmax - (Vmin))) * 255;
  int digitalValueY = Alpha*(y - (Vmax - (Vmin))) * 255;
  int digitalValueZ = Alpha*(z - (Vmax - (Vmin))) * 255;
  digitalWrite(DigitalPinX, bitWrite(digitalValueX, 3));
  digitalWrite(DigitalPinY, bitWrite(digitalValueY, 3));
  digitalWrite(DigitalPinZ, bitWrite(digitalValueZ, 3));
  delay(100);
}
```

รูปที่ 2 ตัวอย่างโปรแกรมสำหรับสร้างสัญญาณอลวนในส่วนต่างๆ

2.3 การหาค่าดัชนีประสิทธิภาพเชิงตัวเลขของระบบอลวน

Lyapunov exponent (LE) คือกระบวนการวิเคราะห์การแตกตัวของและการบรรจบในวิถีวงโคจรของสัญญาณ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญในการตรวจสอบว่าระบบที่ทำการทดสอบมีความอลวนหรือไม่ โดยระบบอนุพันธ์ที่มีความอลวนจะคือมีค่าของ LE อย่างน้อย 1 ค่าที่เป็นบวก โดยงานวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมของ Wolf [8] นำมาดัดแปลงเป็นโปรแกรม MATLAB กำหนดพารามิเตอร์และผลการคำนวณ ถูกแสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $(x_0, y_0, z_0) = (0.1, 0.1, 0.01)$ สำหรับการวิเคราะห์

เนื่องจากความซับซ้อนของระบบอลวน ไม่สามารถมองซึ่งได้จากสเกลว่าระบบมีความซับซ้อนมากน้อยเพียงใด จึงมีความจำเป็นต้องมีเครื่องมือเพื่อใช้บอกความซับซ้อนของระบบอลวน มาใช้ในการวิเคราะห์ความซับซ้อนของระบบออกมาเป็นค่าเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ สูตรดังกล่าวคือ Kaplan-Yorke (D_{KY}) [9] ซึ่งค่า D_{KY} สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_{KY} = j + \frac{1}{|LE_{j+1}|} \sum_{i=1}^j LE_i = 2 + \frac{LE_1 + LE_2}{|LE_3|} \quad (4)$$

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพความอลวนเชิงตัวเลขและค่าแปรของระบบอลวนทั้ง 3 แบบ

รูปแบบอลวน	พารามิเตอร์อ้างอิง	พารามิเตอร์ทดสอบจริง	ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov	D_{KY}
2.Scroll	A=0.5, B=1.5, C=0.5, D=1.5, k=0.35	A=0.5, B=1.5, C=0.5, D=1.5, k=0.43	LE= 0.087081 LE= -0.000034 LE= -0.437047	2.201
3.Scroll	A=2, B=1, C=2, D=1, k=0.35	A=2, B=1, C=2, D=1, k=0.45	LE= 0.103831 LE= 0.000145 LE= 0.453686	2.228
4.Scroll	A=1, B=2, C=3, D=2, k=0.16	A=1, B=2, C=3, D=2, k=0.3	LE= 0.216979 LE= -0.001062 LE= -0.375918	2.574

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าระบบอลวนที่ออกแบบไว้มันจะสามารถปรับวงม้วนของเอาต์พุตเพียงปรับค่า Scroll มีค่า D_{KY} ก่อนข้างสูง ซึ่งในการออกแบบได้ทำการกำหนดค่าไว้ในอัลกอริทึมที่ออกแบบ ซึ่งการ

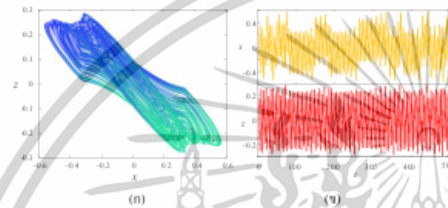
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46
 The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)
 วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ ติวาน่า พลาซ่า กระบี่ อ่าวนาง จังหวักระบี่



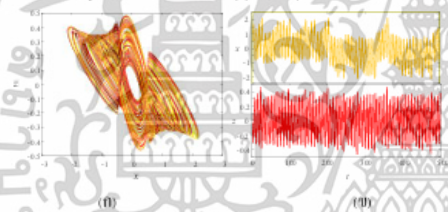
กำหนดสัญญาณสามารถทำได้โดยง่ายด้วยการกดสวิทช์เพื่อเลือกรูปแบบ
 อดวนที่ต้องการ

2.4 การจำลองผลเชิงตัวเลข

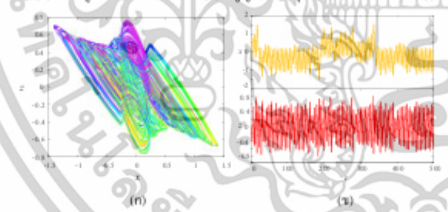
งานวิจัยนี้มีผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อ
 ยืนยันความถูกต้องของระบบ โดยแสดงภาพตัวลึงคุดอดวน บนระนาบ x
 $- z$ และสัญญาณเอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t) ของระบบทั้ง 3
 รูปแบบ พบว่าตัวลึงคุดอดวนและเอาต์พุตบนแกนเวลา แบบสองวงม้วน
 สามวงม้วน และตั้ง่วงม้วน มีลักษณะดังรูป 3 - 5 ตามลำดับ



รูปที่ 3 เอาต์พุตของระบบสองวนแบบสองวงม้วน
 (ก) ตัวลึงคุดอดวนบนแกน $x-z$ (ข) สัญญาณเอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t)



รูปที่ 4 เอาต์พุตของระบบสองวนแบบ สามวงม้วน
 (ก) ตัวลึงคุดอดวน บนแกน $x-z$ (ข) สัญญาณเอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t)

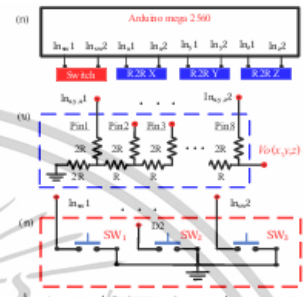


รูปที่ 5 เอาต์พุตของระบบสองวนแบบ ตั้ง่วงม้วน
 (ก) ตัวลึงคุดอดวน บนแกน $x-z$ (ข) สัญญาณเอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t)

3. การสร้างออสซิลเลเตอร์แบบอดวน

3.1 ส่วนประกอบของออสซิลเลเตอร์แบบอดวน
 การสร้างสัญญาณอดวนรูปแบบต่างๆในงานวิจัยนี้ ได้แบ่งการสร้าง
 ออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 6
 ส่วนที่ 1 คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสร้าง
 สัญญาณอดวนออกมาในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลแบบขนานเพื่อให้
 สามารถสร้างสัญญาณได้เร็วที่สุด

ส่วนที่ 2 วงจร R2R ladder แบบ 8 บิต ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ
 ดิจิตอลเป็นแอนะล็อก ที่มีระดับแรงดันต่างกัน 255 ตำแหน่ง
 ส่วนที่ 3 คือ “สวิทช์ (SW_{i,j})” เพื่อใช้ควบคุมและปรับรูปแบบ
 (Reconfiguration) ของระบบอดวน



รูปที่ 6 (ก) การเชื่อมต่อของฮาร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (ข) วงจรแปลงสัญญาณ DAC
 (ค) การออกแบบสวิทช์

ส่วนที่ 1 คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสร้าง
 สัญญาณอดวนออกมาในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลแบบขนานเพื่อให้
 สามารถสร้างสัญญาณได้เร็วที่สุด

ส่วนที่ 2 วงจร R2R ladder แบบ 8 บิต ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ
 ดิจิตอลเป็นแอนะล็อก ที่มีระดับแรงดันต่างกัน 255 ตำแหน่ง
 ส่วนที่ 3 คือ “สวิทช์ (SW_{i,j})” เพื่อใช้ควบคุมและปรับรูปแบบ
 (Reconfiguration) ของระบบอดวน

3.2 ควบคุมขนาดสัญญาณ (Amplitude Control :AMC)

ในงานวิจัยนี้ ได้นำอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ มาใช้ในการสร้าง
 สัญญาณอดวน ซึ่งมีข้อจำกัดของแรงดันอยู่ในระดับ 0-5 V จากการทำ
 การทดลองการสร้างสัญญาณอดวนเชิงตัวเลขในโปรแกรม MATLAB
 พบว่ามีช่วงที่แอมพลิจูดของสัญญาณอยู่ในช่วงคิดลบ ดังรูปที่ 2 - 4 (ข)
 จึงมีความจำเป็นต้องนำวิธีการ AMC [10] เพื่อปรับแรงดันของสัญญาณ
 อดวน โดยควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้
 ทำงานในช่วง 0-5 V โดยใช้สมการ ดังนี้

$$V_{out} = \alpha \cdot \frac{(V_n - (V_{min}))}{(V_{max} - (-V_{min}))} \cdot 255 \tag{5}$$

ที่ V_n และ V_{out} คือค่าแอมพลิจูดก่อนและหลังทำการบรรณาการ AMC
 ซึ่ง V_{max} และ V_{min} คือค่าแอมพลิจูดที่มากและน้อยที่สุดของสัญญาณที่
 สร้างได้ โดยที่ α คือพารามิเตอร์สำหรับควบคุมขนาดสัญญาณ โดยขนาด
 ของสัญญาณขึ้นอยู่กับระบบอดวนที่นำมาใช้ และ การกำหนดค่าตัวแปร
 ต่างๆ ซึ่งค่า α นี้เหมาะสมในการใช้จะอยู่ในช่วง $0 \leq \alpha \leq 1$

4. ผลการทดลอง

เพื่อให้ระบบอดวนที่นำมาเสนอมีต้นทุนต่ำ อุปกรณ์ที่ใช้งานก็จะเป็นอุป
 กรณ์ที่ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักจะใช้
 Arduino Mega 2560 วงจร DAC ขนาด 8 บิต ทั้งหมด 3 ชุด โดยกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

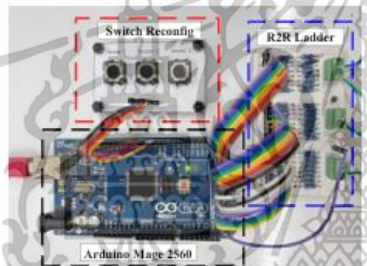
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46
 The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)
 วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ ศูนย์นำ พลาซ่า กระบี่ อำเภอวัง จังหวัดกระบี่



ตัวต้านทาน R เท่ากับ 10k โอห์ม การทดลองระบบออสซิลเลชันที่นำเสนอแสดง
 ดังรูปที่ 7(ก) และ อุปกรณ์ที่ใช้แสดงในรูปที่ 7(ข) โดยกำหนดสมการ
 สมการอนุพันธ์ และ สามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรได้ระหว่างที่วงจรทำงาน
 อยู่ได้อย่างรวดเร็วตามที่ได้อัปเดตไว้ โดยไม่ต้องทำหยุดการทำงาน
 และอัปเดตคำสั่งใหม่ เมื่อต้องการเลือกรูปแบบสัญญาณออสซิลเลชัน ทำให้
 โค้ดเปลี่ยนค่าตัวแปรตามตารางที่ 1 จากการกดสวิทช์ โดยวงจรจะสร้าง
 สัญญาณออสซิลเลชันเฮลต์ในรูปแบบสองวงม้วน สามวงม้วน และ สี่วงม้วน
 ดังแสดงดังรูปที่ 8 - 10 ตามลำดับ

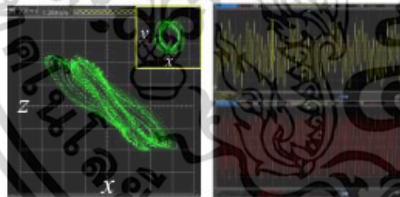


(ก)



(ข)

รูปที่ 7: (ก) ภาพรวมของบอร์ดทดลองแบบออสซิลเลชันที่ทำงานอยู่
 (ข) อุปกรณ์ที่ใช้ในทดลอง

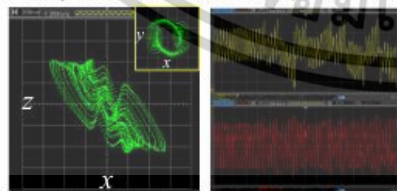


(ก)

(ข)

รูปที่ 8 ผลการทดลองของระบบออสซิลเลชันแบบสองวงม้วน

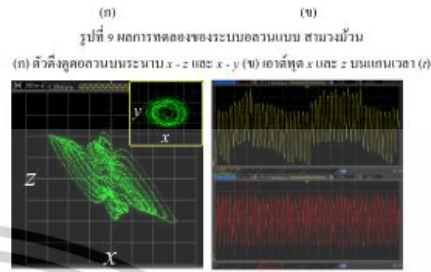
(ก) ตัวตั้งจุดออสซิลเลชันแบบสามวงม้วน x-z และ x-y (ข) เวกเตอร์ x และ z บนแกนเวลา (t)



(ก)

(ข)

รูปที่ 9 ผลการทดลองของระบบออสซิลเลชันแบบสามวงม้วน



(ก)

(ข)

รูปที่ 10 ผลการทดลองของระบบออสซิลเลชันแบบสี่วงม้วน

(ก) ตัวตั้งจุดออสซิลเลชันแบบสามวงม้วน x-z และ x-y (ข) เวกเตอร์ x และ z บนแกนเวลา (t)

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้เสนอการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันซับซ้อนสูง
 ต้นทุนต่ำ สามารถสร้างสัญญาณออสซิลเลชันได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ สองวงม้วน สาม
 วงม้วน และสี่วงม้วน โดยการปรับแต่งค่าตัวแปรได้ใหม่อย่างรวดเร็วแม่นยำ
 และมีต้นทุนต่ำ โดยใช้อุปกรณ์ในท้องถิ่นตลาด เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์
 ตัวต้านทาน คือร่วมกับสวิทช์โดยมีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ
 ออสซิลเลชันด้วยการ Simulation ตัวตั้งจุดออสซิลเลชัน สัญญาณเฮลต์บน
 แกนเวลา Lyapunov Exponent และ Kaplan-Yorke จากโปรแกรม
 MATLAB เพื่อยืนยันผลการทดลองพร้อมทั้งเปรียบเทียบเฮลต์ที่ได้จาก
 ออสซิลเลชันในไมโครคอนโทรลเลอร์ พบว่าผลการทดลองทั้งสอง
 รูปแบบมีความสอดคล้องกันทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow," *J. Atmos. Sci.*, vol.20, no.2, pp. 130-141, 1963.
- [2] O. E. Rössler, "An Equation for Continuous Chaos," *Physics Letters*, vol.57A, no. 5, pp. 397-398, 1976.
- [3] J.C. Sprott, "A New Class of Chaotic Circuit," *Physics Letters A*, vol. 266, pp.19-23, 2000.
- [4] J. Katz, and Y. Lindell, "Introduction to modern cryptography," New York, Taylor & Francis Group, 2008.
- [5] K. Karawanich, M. Kumngern, J. Chimnoy, and P. Prommee, "A four-scroll chaotic generator based on two nonlinear functions and its telecommunications cryptography application," *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, vol.157, 154439, 2022.
- [6] K. Karawanich, and P. Prommee, "High-complex chaotic system based on new nonlinear function and OTA-based circuit realization," *Chaos, Solit. Frac.* Vol.162, 112536, 2022.
- [7] R. Chhuab, M. Mora-Gonzalez, D. Lopez-Mancillaa "Implementation of a Chaotic Oscillator into a Simple Microcontroller" *IERI Procedia*, Vol.4, pp.247 - 252, 2013
- [8] A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney, and J.A. Vastano, "Determining Lyapunov exponents from a time series," *Phys. D.*, vol.16, pp.285-317, 1985.
- [9] S.H. Strogatz, "Nonlinear dynamics and chaos," Taylor & Francis Group, 1994.
- [10] Li, C., Sprott J.C., Yuan, Z.Y., Li, H. Constructing chaotic systems with Total amplitude control. *Int. J. Bifurcation Chaos*. 2015;25(10):1530025.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายจิรัฏฐ์ ฉิมน้อย
 วัน เดือน ปีเกิด 25 กรกฎาคม พ.ศ.2542
 ที่อยู่ 4/18 ม.13 ซอยมิตรไมตรี 6 ถนนมิตรไมตรี เขตหนองจอก แขวงหนองจอก
 กรุงเทพมหานคร 10530
 Email jarin.jiratcn@gmail.com

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2564

ผลงานวิจัย

- จิรัฏฐ์ ฉิมน้อย ณัฐพงศ์ วงศ์พร้อมมูล และ พิพัฒน์ พรหมมี “วงจรถ่ายทอดสัญญาณออลวันขับเคลื่อนด้วยสมการการกระตุ้นร่วมกับฟังก์ชันดัดแปลงสีเหลี่ยมและสัญลักษณ์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45 ภูเก็ตธานี รีสอร์ท อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก, หน้า 526-529, 16-18 พฤศจิกายน 2565
- จิรัฏฐ์ ฉิมน้อย คุณานนต์ คระระวานิช และ พิพัฒน์ พรหมมี “ระบบออลวันขับเคลื่อนสูงต้นทุนต่ำปรับรูปแบบได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46, ดีวาน่า พลาซ่า กระบี่ อำเภอนาง จังหวัดกระบี่, หน้า 249-252, 15-17 พฤศจิกายน 2566