

วงจรกำเนิดการม้วนอลวนที่มีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์

นายวัชรินทร์ จันทะเนตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2553

**CHAOTIC SCROLL GENERATORS HAVING
A WIEN BRIDGE OSCILLATOR**

Watcharin Jantanate

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

วงจรถวายการมอบหมายหน้าที่ให้วงจรถวายการควบคุมแบบวินบรีดจ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นหน่วยงานหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ศ. น.ท. ดร.สรวิชัย สุจิตจร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อรชุน ไชยเสนาะ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วัชรินทร์ จันทะเนตร : วงจรกำเนิดการม้วนอลวนที่มีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์
(CHAOTIC SCROLL GENERATORS HAVING A WIEN BRIDGE OSCILLATOR)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรายุทธิ สุจิตจร, 111 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาพฤติกรรมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์สองรูปแบบที่เกิดสภาวะอลวน โดยศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดสภาวะอลวนในวงจรแบบจั่วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน และวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ศึกษาการสร้างการม้วนอลวนที่อาศัยสัญญาณอลวนจากวงจรสร้างสัญญาณอลวนแบบจั่วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน นอกจากนั้นได้พัฒนาวงจรกำเนิดการสร้างการม้วนอลวนโดยใช้วงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแกนกำเนิดสัญญาณอลวน จำลองผลการทำงาน ของวงจรด้วยโปรแกรม PSIM และทดสอบวงจรกำเนิดการม้วนอลวน 2 3 4 และ 5 วงม้วน จากวงจรแกนกำเนิดสัญญาณอลวนทั้งสองแบบ โดยการอัดประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ที่ขนาดแรงดัน 1 โวลต์ เพื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นให้กับวงจร การเปลี่ยนแปลงการม้วนอลวนสามารถกำหนดได้ด้วยสภาวะเปิด/ปิดของสวิตช์ S1 และ S2 ในวงจรสร้างการม้วนอลวน และทำการปรับตั้งค่าความต้านทาน R ที่ต่ออยู่ระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 เพื่อให้วงม้วนที่เกิด มีความสมมาตรกัน ผลการทดสอบวงจรสร้างการม้วนอลวนมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM อย่างไรก็ตาม พบว่าการปรับความสมมาตรให้วงม้วนกระทำได้ยาก ในทางปฏิบัติ

WATCHARIN JANTANATE : CHAOTIC SCROLL GENERATORS

HAVING A WIEN BRIDGE OSCILLATOR. THESIS ADVISOR :

PROFESSOR WING COMMANDER SARAWUT SUJITJORN, Ph.D., 111 PP.

CHAOS/ CHUA'S CIRCUIT/ WIEN BRIDGE OSCILLATOR/ GENERATOR

This thesis studies the behaviours of two chaotic electronics. It studies the effects of circuit parameters on chaotic behaviours of the Chua's circuit with simulated inductors, and the Wien bridge oscillator. Chaotic scroll generation based on chaotic signal provided by the Chua's circuit with simulated inductors is also investigated. Furthermore, some chaotic scroll generators have been developed based on the Wien bridge oscillator as the chaotic core circuit 2, 3, 4 and 5 scroll generations based on both types of the chaotic core circuits have been simulated using PSIM and tested. It is necessary to charge the capacitor C_1 in the circuits to 1V-initial voltage. Variations of the scroll generation can be defined by the on/off status of the switches $S1$ and $S2$ as well as the adjustment of the resistor R interconnected between the capacitors C_1 and C_2 to achieve symmetrical scrolls. Test results agree very well with PSIM simulations. However, symmetrical scrolls are very difficult to be achieved in practice.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินการวิจัย ซึ่งได้แก่

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรายุทธิ สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจและแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประวิช เปรียบเหมือน และอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่นทุกท่าน ที่เป็นกำลังในการสนับสนุนส่งเสริม จนมีโอกาสดำเนินการระดับปริญญาโท โดยได้รับทุนพัฒนาบุคลากรสนับสนุนจากวิทยาเขตขอนแก่น และเป็นกำลังใจในการศึกษาด้วยดีเสมอมา

ขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวังกุล อาจารย์จักรกฤษณ์ เคลือบวัง และเพื่อนบัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อนิคม – คุณแม่สังวร จันทะเนตร รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู การสนับสนุนทางด้านการศึกษายิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและทุกข์ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

วัชรินทร์ จันทะเนตร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 สภาวะอลวนในระบบพลวัต.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ประวัติความเป็นมาของทฤษฎีอลวนโดยย่อ.....	4
2.3 ระบบพลวัตที่เกิดพฤติกรรมอลวน.....	11
2.3.1 ระบบแวนเดอร์โพล.....	11
2.3.2 ระบบลอเรนซ์.....	13
2.3.3 ระบบรอสเลอร์.....	15
3 วงจรคู่และวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์.....	18
3.1 บทนำ.....	18
3.2 วงจรคู่.....	18
3.2.1 หลักการทำงานของวงจรคู่.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การจำลองผลวงจรม้วน	24
3.2.3 การทดสอบวงจรม้วน	27
3.3 วงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์	30
3.3.1 หลักการทำงานของวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์	32
3.3.2 การจำลองผลวงจรม้วนแบบวินบริดจ์	32
3.3.3 การทดสอบผลวงจรม้วนแบบวินบริดจ์	34
3.4 การควบคุมพฤติกรรมมอดวนในวงจรมอดวน	36
3.4.1 การควบคุมพฤติกรรมมอดวนของวงจรม้วน	36
3.4.2 การควบคุมพฤติกรรมมอดวนของวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์	36
3.5 สรุป	36
4 การม้วนมอดวน	38
4.1 บทนำ	38
4.2 หลักการเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วง	38
4.3 หลักการเกิดการม้วนมอดวน	39
4.4 สรุป	44
5 วงจรกำเนิดการม้วนมอดวน	45
5.1 บทนำ	45
5.2 หลักการทำงานของวงจรกำเนิดการม้วนมอดวน	45
5.2.1 วงจรกำเนิดการม้วนมอดวนแบบคู่	45
5.2.2 วงจรกำเนิดการม้วนมอดวนแบบคี่	50
5.3 การจำลองผลวงจรม้วนมอดวน	54
5.3.1 กรณีวงจรม้วนเป็นแกนกำเนิดการม้วนมอดวน	55
5.3.2 กรณีวงจรม้วนแบบวินบริดจ์เป็นแกนกำเนิดการม้วนมอดวน	61
5.4 การทดสอบและอภิปรายผล	67
5.5 สรุป	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	78
6.1 สรุป.....	78
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดพฤติกรรมอลวน.....	82
ภาคผนวก ข. โปรแกรม MATLAB จำลองระบบแวนเดอร์โพล ลอเรนซ์ และรอสเลอร์.....	87
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรนำ	27
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์	34
5.1 การเปิด-ปิดสวิตช์ในวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่	49
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่	49
5.3 การเปิด-ปิดสวิตช์ในวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคี่	52
5.4 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคี่	52

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาพฤติกรรมอลวน.....5
2.2	พฤติกรรมอลวนแบบมีขอบเขตของเซต.....7
2.3	พฤติกรรมอลวนแบบไม่มีขอบเขตของอาร์โนลด์.....7
2.4	พฤติกรรมที่ไม่ใช่แบบอลวนของระบบวงกลม.....8
2.5	พฤติกรรมแบบอลวนของระบบลอเรนซ์.....9
2.6	อนุกรมเวลาและอำพน.....10
2.7	แผนภาพจุดแยกสองราก.....11
2.8	พฤติกรรมของระบบแวนเดอร์โพลเปลี่ยนแปลงตามค่า k12
2.9	พฤติกรรมของระบบลอเรนซ์.....14
2.10	ผลการจำลองสมการรอสเลอร์ในโดเมนเวลา.....16
2.11	ผลการจำลองสมการรอสเลอร์ในปริภูมิสเตต (x, y, z)16
3.1	วงจรรู้แบบพื้นฐาน.....19
3.2	โครงข่ายออปแอมป์ใช้เป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น.....19
3.3	ช่วงความชันของความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....19
3.4	วงจรรู้ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ.....20
3.5	วงจรรู้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน.....20
3.6	วงจรรู้ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน.....20
3.7	สัญญาณอลวนจากวงจรรู้แบบวงม้วนเดี่ยว.....22
3.8	สัญญาณอลวนจากวงจรรู้แบบม้วนคู่.....23
3.9	ผลการจำลองวงจรรู้กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ.....25
3.10	ผลการจำลองวงจรรู้กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน.....26
3.11	ผลการทดสอบวงจรรู้ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ.....28
3.12	ผลการทดสอบวงจรรู้แบบรู้โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน.....29
3.13	แผนภาพบล็อกแทนวงจรรู้แกว่งกวัดที่มีการป้อนกลับแบบบวก.....30
3.14	โครงสร้างวงจรรู้แกว่งกวัดแบบวินบริดจ์.....31

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 วงจรสร้างสัญญาณอลวนที่มีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ.....	32
3.16 ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์.....	33
3.17 ผลการทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์.....	35
4.1 ลักษณะของฟังก์ชันเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วง.....	38
4.2 กราฟลักษณะสมบัติการม้วนอลวน.....	39
4.3 สนามเวกเตอร์ของแรงดัน.....	40
4.4 การม้วนอลวนที่ขนาด 2 วงม้วน.....	40
4.5 สนามเวกเตอร์ของแรงดันที่เกิดมากกว่า 2 วงม้วน.....	41
4.6 ตัวอย่างการม้วนอลวนแบบจำนวนคู่.....	42
4.7 ตัวอย่างการม้วนอลวนแบบจำนวนคี่.....	43
5.1 โครงข่ายออปแอมป์สำหรับกำเนิดการม้วนอลวน.....	47
5.2 วงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่.....	48
5.3 วงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคี่.....	53
5.4 ผลจำลองการเกิด 2 วงม้วน กรณีวงจรหิ้วเป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1600\Omega$	55
5.5 ผลจำลองการเกิด 3 วงม้วน กรณีวงจรหิ้วเป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1650\Omega$	56
5.6 ผลจำลองการเกิด 4 วงม้วน กรณีวงจรหิ้วเป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1640\Omega$	57
5.7 ผลจำลองการเกิด 5 วงม้วน กรณีวงจรหิ้วเป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1660\Omega$	58
5.8 ผลจำลองการเกิด 6 วงม้วน กรณีวงจรหิ้วเป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1650\Omega$	59
5.9 ผลจำลองการเกิด 7 วงม้วน กรณีวงจรหิ้วเป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1655\Omega$	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 ผลจำลองการเกิด 2 วงม้วน กรณีวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์ เป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1500\Omega$	61
5.11 ผลจำลองการเกิด 3 วงม้วน กรณีวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์ เป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1550\Omega$	62
5.12 ผลจำลองการเกิด 4 วงม้วน กรณีวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์ เป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1565\Omega$	63
5.13 ผลจำลองการเกิด 5 วงม้วน กรณีวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์ เป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1570\Omega$	64
5.14 ผลจำลองการเกิด 6 วงม้วน กรณีวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์ เป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1600\Omega$	65
5.15 ผลจำลองการเกิด 7 วงม้วน กรณีวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์ เป็นแกนกำเนิดการม้วน ที่ความต้านทาน $R=1555\Omega$	66
5.16 ผลการทดสอบวงจรนำกรณีเกิด 2 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1620\Omega$	68
5.17 ผลการทดสอบวงจรนำกรณีเกิด 3 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1645\Omega$	69
5.18 ผลการทดสอบวงจรนำกรณีเกิด 4 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1640\Omega$	70
5.19 ผลการทดสอบวงจรนำกรณีเกิด 5 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1650\Omega$	71
5.20 ผลการทดสอบวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 2 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1445\Omega$	73
5.21 ผลการทดสอบวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 3 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1563\Omega$	74
5.22 ผลการทดสอบวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 4 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1470\Omega$	75
5.23 ผลการทดสอบวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 5 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1568\Omega$	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

เคออส (chaos) มาจากภาษากรีก แปลว่า ความสับสน และเป็นปรากฏการณ์เช่นเดียวกับ สัญญาณรบกวนในระบบพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear dynamic system) โดยความหมาย ในทางวิทยาศาสตร์คือสภาพและกระบวนการที่ไร้เสถียรภาพ (unstable) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง เพียงเล็กน้อยทำให้เกิดการพัฒนาที่ไม่เป็นเส้นตรง เป็นเส้นคดเคี้ยววกวัดแกว่ง บางครั้งมีการก้าว กระโดดแบบฉับพลันของผลลัพธ์ รูปแบบคุณลักษณะของพฤติกรรมแบบอลวน แสดงให้เห็นว่า เป็นพฤติกรรมแบบไม่เป็นรายคาบในระยะยาว ซึ่งหมายถึงการเกิดสถานะซ้ำเป็นครั้งที่สอง ระบบ ที่เป็นแบบอลวนจะมีลักษณะ ดังนี้

1. มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) มีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับคุณสมบัติแบบ เชิงเส้น (ฟังก์ชัน f เป็นเชิงเส้นก็ต่อเมื่อ $f(\alpha x + \beta y) = \alpha f(x) + \beta f(y)$ เมื่อ α และ β เป็น ค่าคงที่) ซึ่งความอลวนจะไม่เกิดในระบบที่เป็นเชิงเส้น แต่ไม่ได้หมายความว่าระบบไม่เป็นเชิง เส้นจะเกิดความอลวนในทุกระบบเสมอไป จะมีช่วงพารามิเตอร์ที่จะทำให้ระบบมีพฤติกรรมแบบ ออลวน และในระบบไม่เป็นเชิงเส้นบางระบบอาจเกิดพฤติกรรมของความอลวนตลอดเวลา

2. ไม่เกิดแบบสุ่ม สภาวะอลวนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์จึงเรียกกัน ว่า “deterministic chaos” กล่าวคือพฤติกรรมทั้งหลายที่เกิดขึ้นในระบบอลวน เกิดขึ้นภายใต้ กฎเกณฑ์ที่แน่นอน ดังนั้นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม เช่น การทอดลูกเต๋า จึงไม่เป็นความอลวน

3. ไวต่อสภาวะเริ่มต้น (sensitivity to initial conditions) ในสภาวะเริ่มต้นของระบบที่มี ค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดผลในภายหลังที่มีความแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากในระบบ ออลวนจะขยายความแตกต่างให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่พบบ่อยจะเป็นการขยายความแตกต่างให้เร็วขึ้น ในระดับเลขยกกำลังของเวลา

4. ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าในระยะยาวได้ เนื่องจากความไวต่อสภาวะเริ่มต้น ทำให้ ในระยะยาวผลการเปลี่ยนแปลงจะไม่สามารถทำนายได้ แต่อย่างไรก็ตามยังเป็นไปได้ในการ ทำนายผลในระยะสั้น

นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่น่าสนใจของระบบอลวนอีกคือ การแสดงลักษณะคล้ายตัวเอง (self similarity) หรือเรียกว่า “แฟร็กทัล (fractal)” ลักษณะเช่นนี้จะปรากฏเมื่อแสดงเส้นทางการ

เคลื่อนที่ของระบบในปริภูมิเฟส ลักษณะคล้ายตัวเองหมายความว่า ไม่ว่าจะมองเส้นทางการเคลื่อนที่จากระดับใดก็ตาม จะสังเกตเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน แต่คุณสมบัตินี้ไม่ได้เป็นเงื่อนไขที่จำเป็นต่อการเกิดสภาวะอลวนแต่อย่างใด เพียงแต่พบร่วมกันเท่านั้นในบางโอกาส

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของวงจรม้วน (chua) และวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ที่เกิดสภาวะอลวน
2. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของวงจรถ้าเนคการม้วนอลวน
3. เพื่อพัฒนาการถ้าเนคการม้วนอลวนแบบคู่และคี่โดยใช้วงจรถ้าเนคการม้วนแบบวินบริดจ์เป็นแกนถ้าเนค

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การจำลองผลการการทำงานของวงจรถ้าเนคการม้วนร่วมกับโปรแกรม PSIM ร่วมกับ โปรแกรม MATLAB
2. ทดสอบการทำงานของวงจรถ้าเนคการม้วนที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษา จำลองผล และปฏิบัติการทดลองวงจรถ้าเนคการม้วนอลวนโดยมีวงจรม้วนเป็นแกนถ้าเนค จำกัดการทดลองที่ 2 3 4 และ 5 ม้วน
2. พัฒนาวจรถ้าเนคการม้วนแบบวินบริดจ์ให้ถ้าเนคการม้วนอลวนแบบคู่และแบบคี่ได้
3. จำลองผล และปฏิบัติการทดลองวงจรถ้าเนคการม้วนอลวนโดยมีวงจรถ้าเนคการม้วนแบบวินบริดจ์เป็นแกนถ้าเนคความอลวน จำกัดการทดลองที่ 2 3 4 และ 5 ม้วน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แนวคิดในการพัฒนาเกี่ยวกับการถ้าเนคการม้วนอลวนแบบคู่และแบบคี่จากวงจรถ้าเนคการม้วนแบบวินบริดจ์
2. ได้ต้นแบบวงจรถ้าเนคการม้วนอลวนแบบคู่และแบบคี่ด้วยวงจรถ้าเนคการม้วนแบบวินบริดจ์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป
3. เผยแพร่ผลงานวิจัยในระดับชาติหรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท โดย**บทที่ 1** เป็นบทนำที่กล่าวถึงความหมายของเคออส วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมทั้งปรัชญาวิธีธรรมที่เกี่ยวกับการวิจัย และในส่วนของบทอื่น ๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงสภาวะอลวนในระบบพลวัต ประวัติความเป็นมาของทฤษฎีอลวน โดยย่อระบบพลวัตที่เกิดพฤติกรรมอลวน รวมถึงตัวอย่างระบบที่แสดงพฤติกรรมอลวน

บทที่ 3 กล่าวถึงวงจรม้วนและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ในรายละเอียดของวงจรม้วนและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ประกอบด้วย หลักการทำงานของวงจร การจำลองผลของวงจร การทดสอบวงจร รวมถึงการควบคุมพฤติกรรมอลวนในวงจรม้วนและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์

บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการของการม้วนอลวน หลักการเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วง หลักการเกิดการม้วนอลวนซึ่งประกอบด้วย การม้วนอลวนจำนวนคู่ และการม้วนอลวนจำนวนคี่

บทที่ 5 กล่าวถึงวงจรถ้าเน็คการม้วนอลวน หลักการทำงานของวงจรถ้าเน็คการม้วนอลวนแบบคู่และแบบคี่ การจำลองผลของวงจรถ้าเน็คการม้วนอลวนกรณีวงจรม้วนเป็นแกนถ้าเน็คการม้วนอลวน และกรณีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแกนถ้าเน็คการม้วนอลวน รวมถึงการสรุปผลและอภิปรายผลการทดสอบ

บทที่ 6 นำเสนอบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

สภาวะอลวนในระบบพลวัต

2.1 บทนำ

ในระบบจักรวาลมีการโคจรของเทหวัตถุต่าง ๆ นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการศึกษาและพยายามหาความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์ ที่จะใช้หาตำแหน่ง เส้นทางการโคจรที่แน่นอนของเทหวัตถุเหล่านั้น ซึ่งการโคจรที่เกิดขึ้นนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นที่เกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดของมวล จุดเริ่มต้นและความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ

การโคจรของวัตถุที่น้อยกว่า 3 ชิ้น มีการหาค่าผลเฉลยโดยกฎแรงดึงดูดของนิวตัน ส่วนการโคจรที่มีวัตถุจำนวนตั้งแต่ 3 ชิ้นขึ้นไป ยังไม่สามารถที่จะหาผลเฉลยที่แน่นอนได้ ทั้งนี้ นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ ปวงกาเร (Poincare, J.H., 1854-1912) ได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า แผนภาพปวงกาเร (1989) ซึ่งใช้สำหรับสังเกตและวิเคราะห์เส้นทางการโคจรของวัตถุดังกล่าว รวมถึงเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาสภาวะอลวนอีกด้วย

2.2 ประวัติความเป็นมาของทฤษฎีอลวนโดยย่อ

ประมาณ ค.ศ. 1900 ได้มีการศึกษาสนามแรงดึงดูดระหว่างกันของวัตถุสามชิ้นที่เรียกว่า ปัญหาสามวัตถุ (three-body problem) โดย ปวงกาเร (Poincare, J.H.) ซึ่งได้ทำการศึกษาและค้นพบว่าวงโคจรของวัตถุมีลักษณะที่ไม่เป็นรายคาบ นั่นคือไม่มีทางวิ่งซ้ำเป็นวงรอบโดยอาจจะขยายเป็นวงกว้างขึ้นเรื่อย ๆ หรือลู่เข้าหาจุดใดจุดหนึ่งของปริภูมิ ต่อมาได้มีการศึกษาถึงปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เกี่ยวกับทฤษฎีเคออสนี้โดย เบอร์กอฟ (Birkhoff, G.D.) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัตถุสามชิ้น คอลโมโกรอฟ (Kolmogorov, A.N.) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความปั่นป่วน และปัญหาเกี่ยวกับดาราศาสตร์ ส่วนคาร์ทไรท์ (Cartwright, M.L.) และลิตเติลวูด (Littlewood, J.E.) ได้ทำการศึกษาปัญหาทางวิศวกรรมการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ

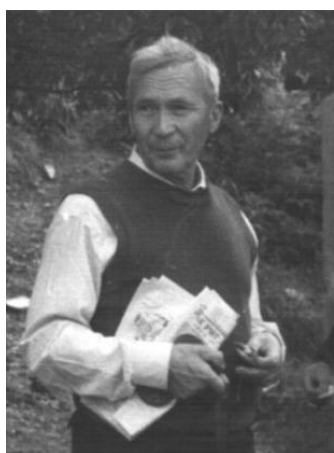
ลอเรนซ์ (Lorenz, E.N.) เป็นผู้ที่บุกเบิกทฤษฎีเคออส โดยได้สังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลองทางด้านพยากรณ์อากาศ ในปี ค.ศ. 1961 ลอเรนซ์ได้นำคอมพิวเตอร์มาสร้างแบบจำลองสภาพอากาศ ซึ่งในการคำนวณครั้งถัดมาไม่ต้องการเริ่มการจำลองจากจุดเริ่มต้น เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลก่อนหน้าเป็นค่าเริ่มต้น ซึ่งผลที่ได้ปรากฏว่าค่าที่คำนวณมีความแตกต่างจากเดิมโดยสิ้นเชิง เขาพบว่าสาเหตุเกิดจากการปัดเศษของการคำนวณซึ่งมีขนาดน้อยมาก แต่กลับนำไปสู่ความแตกต่างอย่างมากมายซึ่งเรียกว่า ไวต่อสภาวะเริ่มต้น



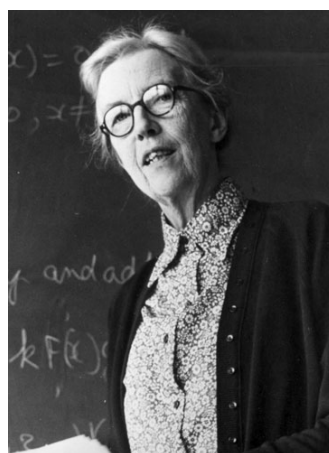
ก) Jules Henri Poincare
(1854-1912)



ข) George David Birkhoff
(1884-1944)

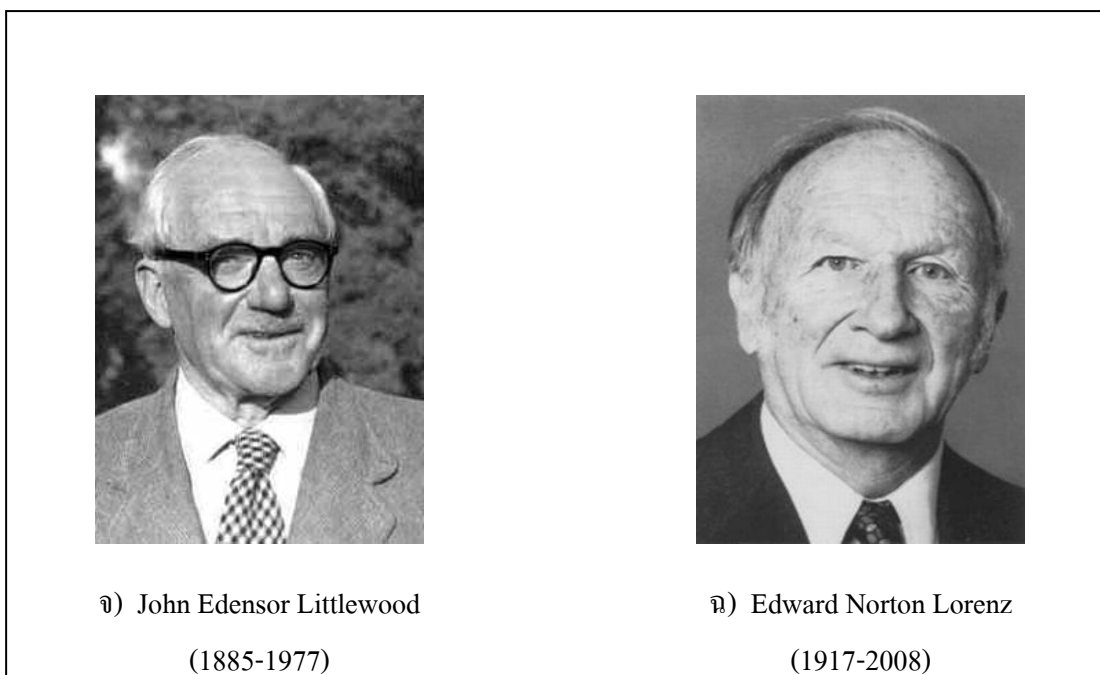


ค) Andrey Nikolaevich Kolmogorov
(1903-1987)



ง) Mary Lucy Cartwright
(1900-1998)

รูปที่ 2.1 นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาพฤติกรรมมอลวน

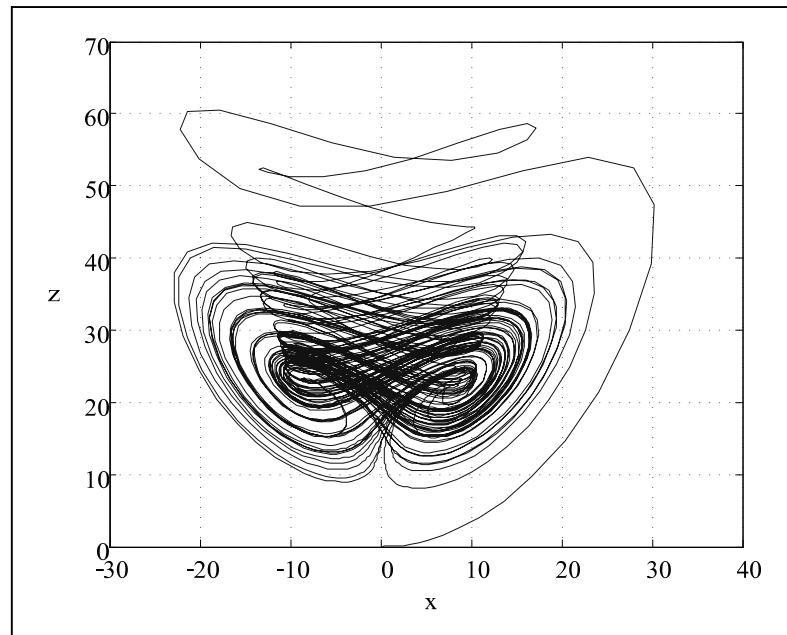


รูปที่ 2.1 นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาพฤติกรรมอลวน (ต่อ)

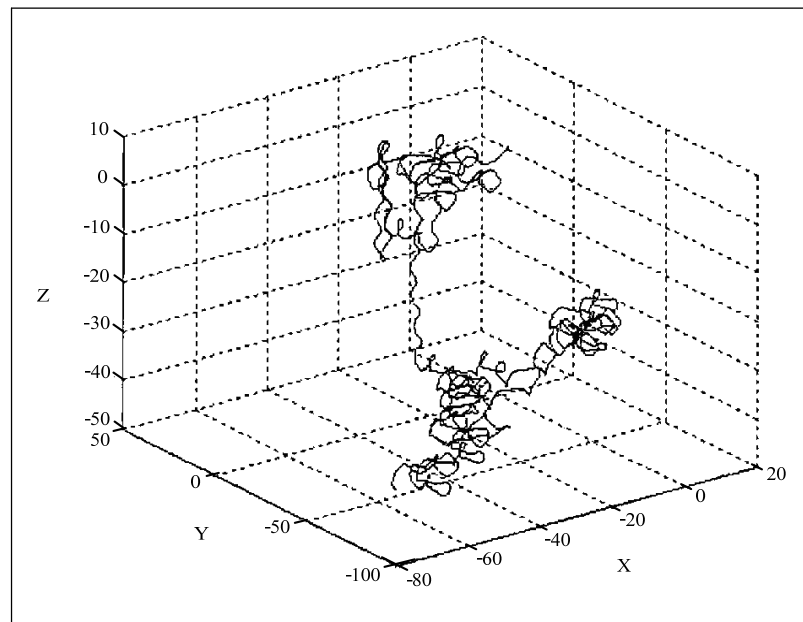
พฤติกรรมของระบบอลวนที่เกิดขึ้นนั้นมีปัจจัยที่เป็นตัวกำหนด 3 ส่วนคือ สมการเชิงพลศาสตร์ที่ขึ้นกับเวลา สัมประสิทธิ์ของสมการระบบ (จะมีผลต่อระบบมากสำหรับการเกิดพฤติกรรมอลวน) และเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการระบบ (มีผลต่อเส้นทางโคจรของพฤติกรรมอลวน) ทั้งนี้จากปัจจัยที่ทำให้เกิดพฤติกรรมอลวนได้นั้น สามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดได้ 2 แบบ คือ

1. พฤติกรรมอลวนแบบมีขอบเขต หมายถึง พฤติกรรมอลวนที่มีการเกิดของจุดใหม่ที่เกาะกลุ่ม ไม่กระจัดกระจาย สามารถระบุขอบเขตได้อย่างชัดเจน เช่น พฤติกรรมอลวนของเชน (Chen) พฤติกรรมอลวนของฉั่ว (Chua) พฤติกรรมอลวนของลอเรนซ์ (Lorenz) พฤติกรรมอลวนของรอสเลอร์ (Rossler) และพฤติกรรมอลวนของสปร์อตต์ (Sprott) เป็นต้น รูปแบบพฤติกรรมอลวนลักษณะนี้อาจดูได้จากรูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างหนึ่ง

2. พฤติกรรมแบบไม่มีขอบเขต หมายถึง พฤติกรรมอลวนที่มีการเกิดของจุดใหม่ที่ไมเกาะกลุ่ม กระจัดกระจาย ไม่สามารถระบุขอบเขตได้ เช่น พฤติกรรมอลวนของอาร์โนลด์ (Arnold) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีพฤติกรรมอลวนที่คล้ายการล่องลอยของควันไฟและการไหลอลวนในของไหล เป็นต้น



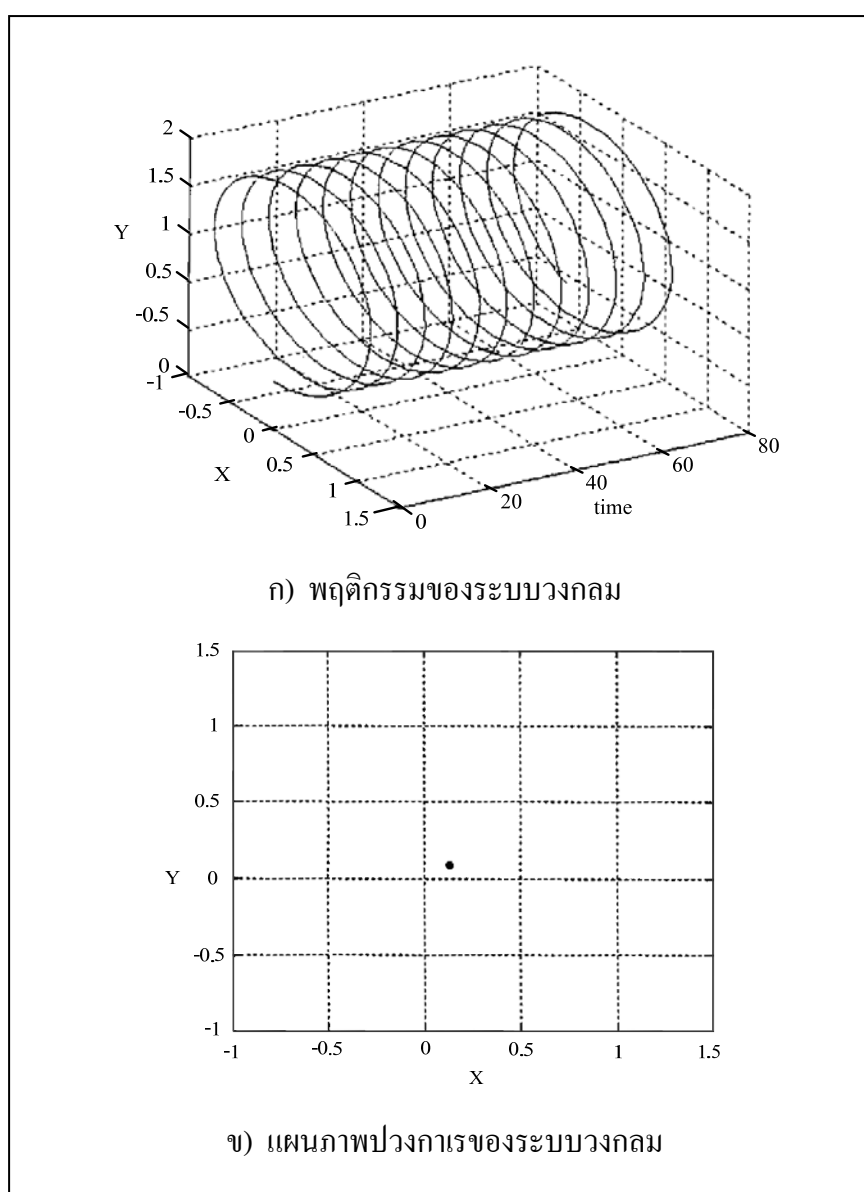
รูปที่ 2.2 พฤติกรรมอลวนแบบมีขอบเขตของเซน



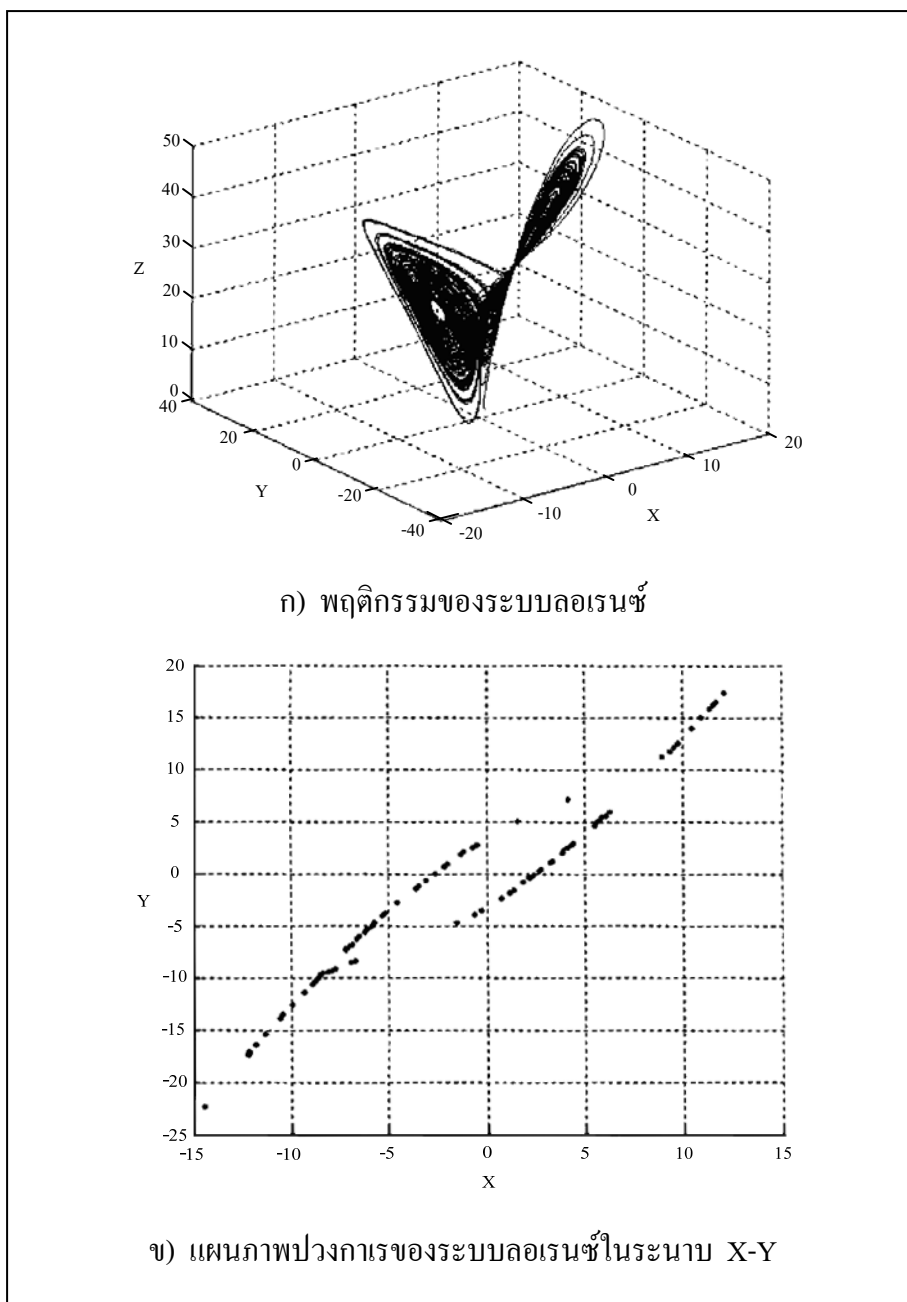
รูปที่ 2.3 พฤติกรรมอลวนแบบไม่มีขอบเขตของอาร์โนลด์

ดังต่อไปนี้ เป็นเครื่องมือในการวัดความอลวน

1. แผนภาพปวงกาเร (Poincare) ได้รับการนำเสนอโดยปวงกาเร ในปี ค.ศ. 1889 เป็นแผนภาพที่ใช้แสดงจุดของเส้นทางการโคจรตัดผ่านที่มีแกนประกอบเป็น X-Y วางอยู่ ณ ตำแหน่ง Z ใด ๆ X-Z วางอยู่ ณ ตำแหน่ง Y ใด ๆ หรือ Y-Z วางอยู่ ณ ตำแหน่ง X ใด ๆ ก็ได้เช่น แผนภาพปวงกาเรของสมการวงกลมซึ่งพฤติกรรมไม่ใช่แบบอลวน ซึ่งแสดงเป็นเพียงจุดเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.4 หรือแผนภาพปวงกาเรของลอเรนซ์ ที่มีพฤติกรรมแบบอลวนจึงมีจุดตัดแกนหลายจุดดังแสดงในรูปที่ 2.5



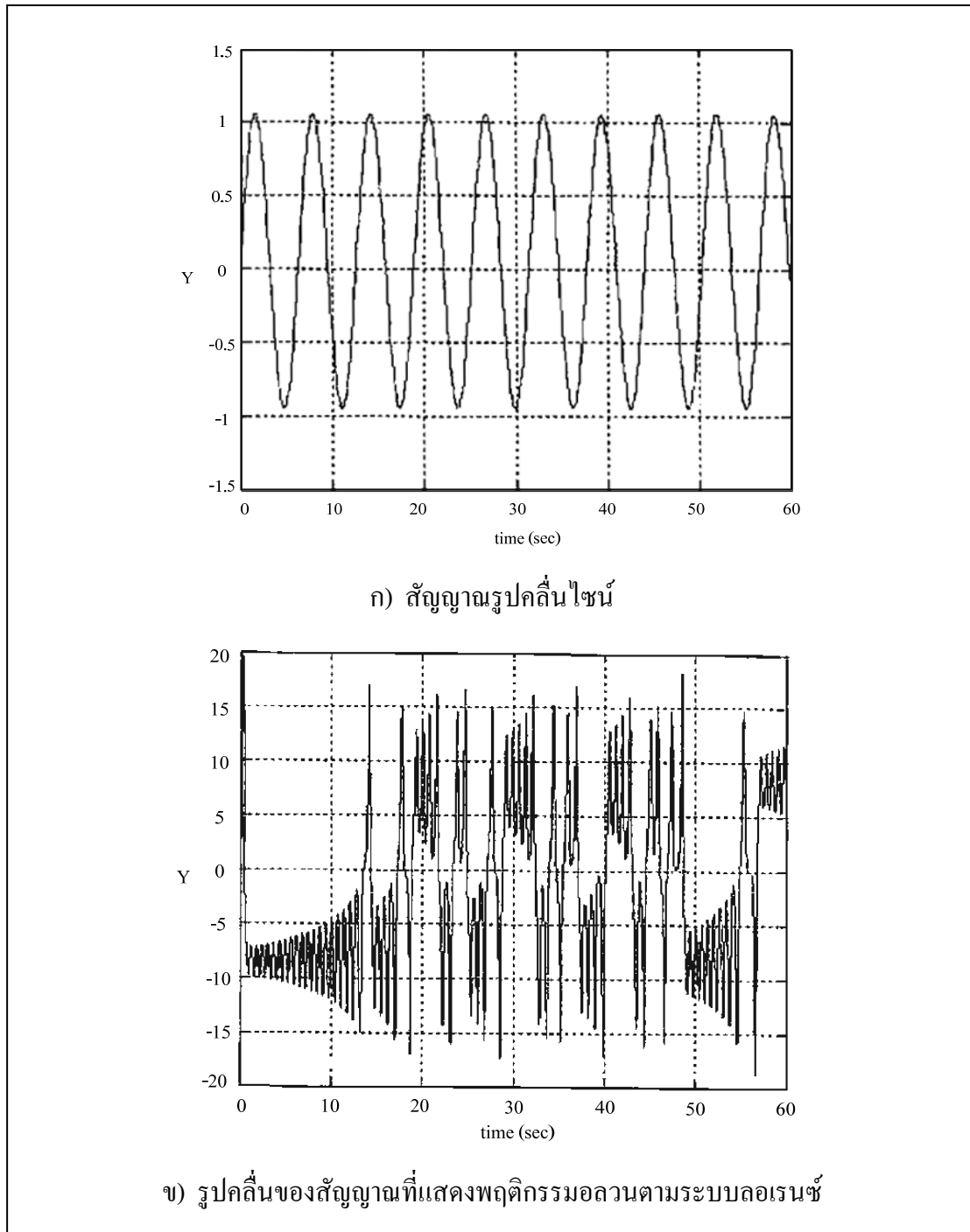
รูปที่ 2.4 พฤติกรรมที่ไม่ใช่แบบอลวนของระบบวงกลม



รูปที่ 2.5 พฤติกรรมแบบบอลลวนของระบบลอเรนซ์

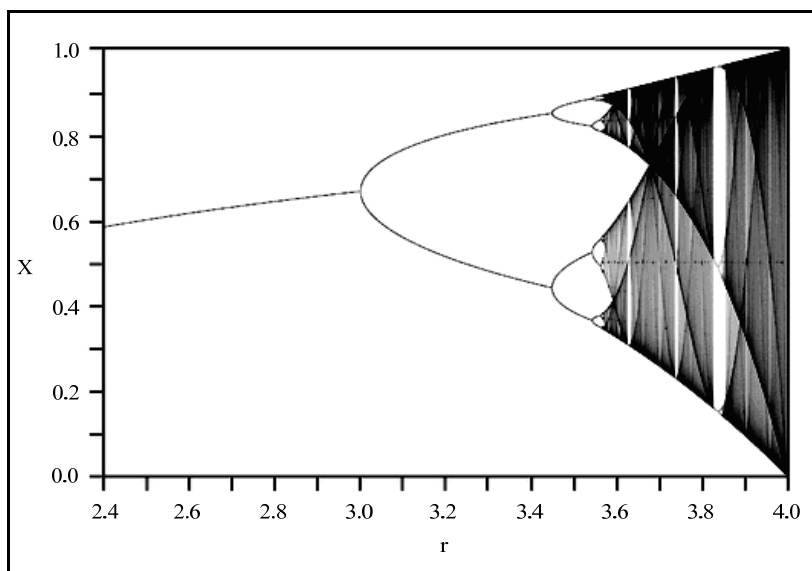
2. อนุกรมเวลา (time series) และอำพน (amplitude) แผนภาพอนุกรมเวลาและอำพนเป็นแผนภาพที่ใช้เพื่อสังเกตพฤติกรรมอลวนที่เกิดขึ้นของระบบทางในลักษณะของความถี่และระดับสัญญาณ เช่น อนุกรมเวลาและอำพนของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ไม่ใช่พฤติกรรมอลวน และอนุกรมเวลาและอำพนในแกน X Y และ Z ของลอเรนซ์ ซึ่งมีพฤติกรรมอลวนเกิดขึ้นตามการเปลี่ยนแปลง

ทางความถี่และอำพันตลอดเวลา รูปที่ 2.6 แสดงรูปคลื่นไซน์และสัญญาณในอนุกรมเวลาที่เกิดพฤติกรรมอลวน เพื่อเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 2.6 อนุกรมเวลาและอำพัน

3. จุดแยกสองราก (bifurcation) ดังแผนภาพในรูปที่ 2.7 เป็นแผนภาพที่ใช้ในการสังเกตพฤติกรรมของการเกิดผลเฉลยของระบบเป็นแบบคงเดิม ค่าเดิม คงที่ หรือเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อสัมประสิทธิ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไป สภาวะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดแบบนี้เรียกว่า สภาวะอลวน



รูปที่ 2.7 แผนภาพจุดแยกสองราก

4. ไลยาปูนอฟเอกโปเนนต์ (Lyapunov exponent) เป็นดัชนีระบุการลู่เข้าหรือลู่ออกของระบบภายใต้การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น และการทำงานของระบบผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง โดยแสดงได้ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นโดยอเล็กซานเดอร์ มิเกล โลวิช ไลยาปูนอฟ (Alexander Mikhailovich Lyapunov)

2.3 ระบบพลวัตที่เกิดพฤติกรรมอลวน

2.3.1 ระบบแวนเดอร์โพล

ระบบแวนเดอร์โพล เป็นระบบหนึ่งที่สามารถนำมาศึกษาเกี่ยวกับการเกิดพฤติกรรมอลวนได้ ในการศึกษาพฤติกรรมนี้สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ k ในสมการแวนเดอร์โพล ซึ่งมีผลทำให้เกิดพฤติกรรมอลวนขึ้น สมการแวนเดอร์โพลมีรูปแบบดังนี้

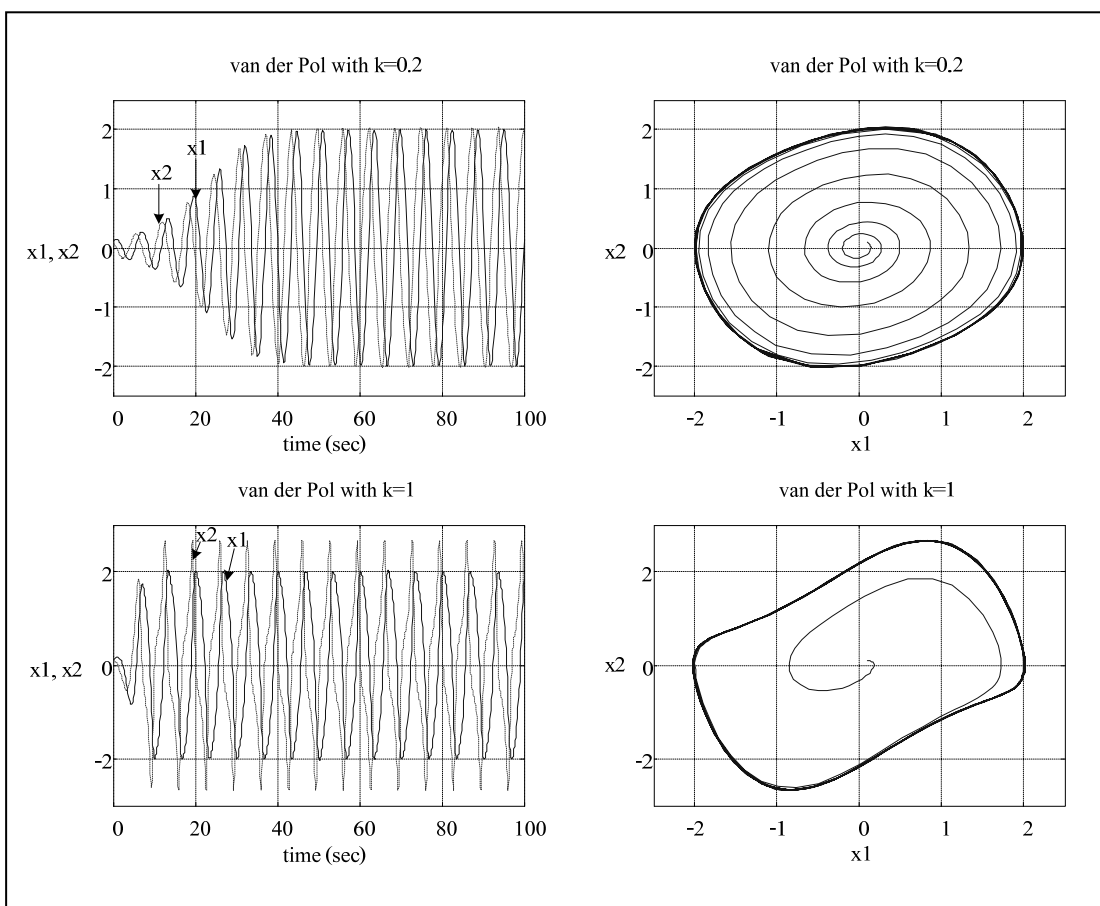
$$\frac{d^2 x}{dt^2} - k(1-x^2) \frac{dx}{dt} + x = 0 \quad (2.1)$$

กำหนดให้

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (2.2)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -k(1-x_1^2)x_2 - x_1 \quad (2.3)$$

เมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ k ระบบจะแสดงพฤติกรรมได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงเปรียบเทียบในกรณีของ $k=0.2$ และ 1 อาจสังเกตได้ว่าเมื่อพารามิเตอร์ k มีค่าสูงจะมีผลทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะเสถียร



รูปที่ 2.8 พฤติกรรมของระบบแวนเดอร์โพลเปลี่ยนแปลงตามค่า k

2.3.2 ระบบลอเรนซ์

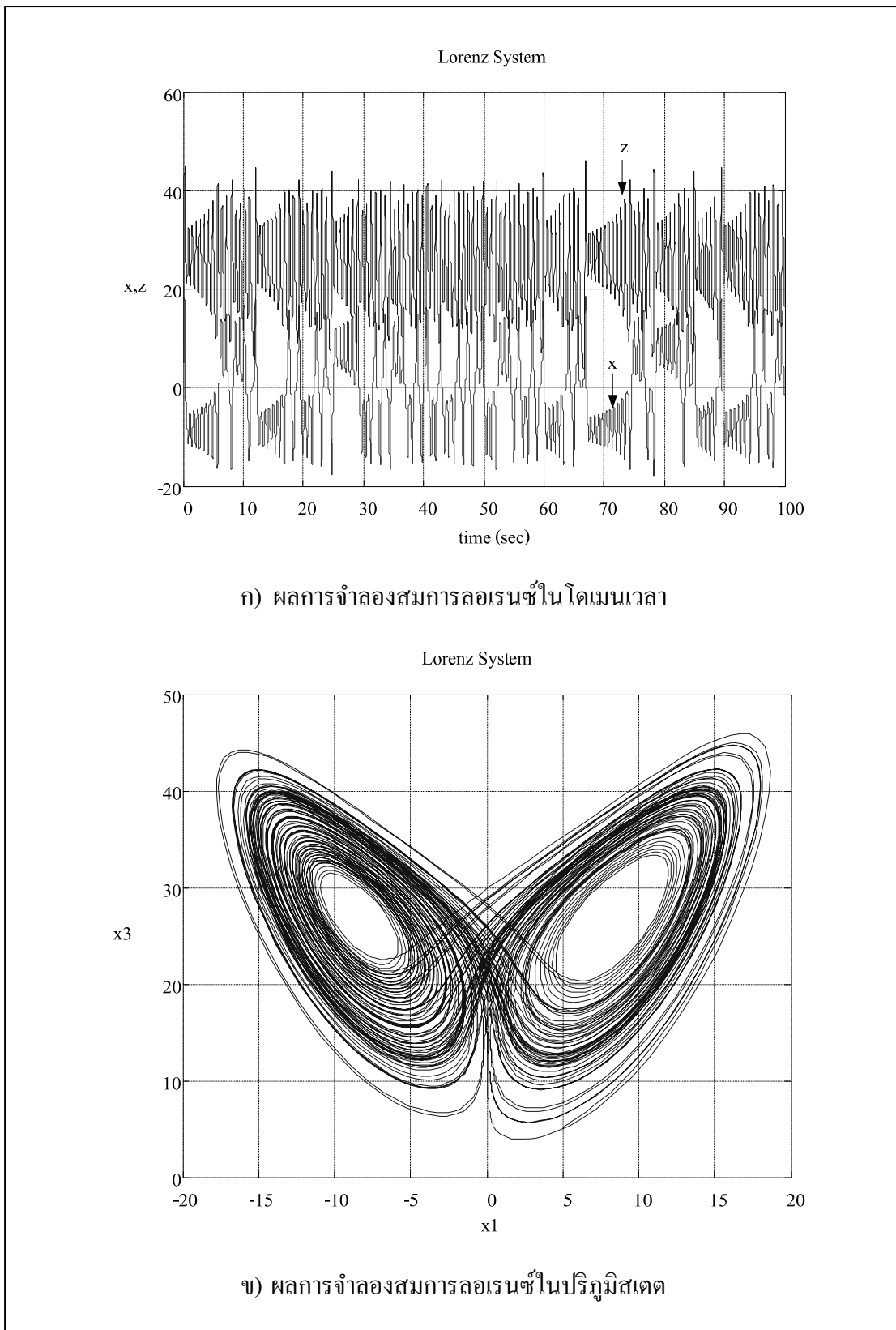
ตัวดึงดูดลอเรนซ์ (Lorenz attractor) เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากสมการลอเรนซ์ ซึ่งคิดค้นโดยเอ็ดเวิร์ด ลอเรนซ์ (Edward Lorenz) ในปี ค.ศ. 1963 เป็นระบบพลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้น มีแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน ระบบนี้แสดงพฤติกรรมเคออสสำหรับค่าพารามิเตอร์บางค่า รวมถึงลักษณะของระบบที่เรียกว่า ตัวดึงดูดแบบประหลาด (strange attractor) ซึ่งพิสูจน์โดย ทูเคอร์ (W.Tucker) ในปี ค.ศ. 2001 ระบบที่ปรากฏพฤติกรรมตามแบบจำลองนี้ ได้แก่ เลเซอร์ ไดนาโมและกังหันน้ำบางชนิด เป็นต้น ตัวดึงดูดลอเรนซ์เขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \quad (2.4)$$

$$\frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y \quad (2.5)$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \beta z \quad (2.6)$$

ในสมการที่ (2.4) (2.5) และ (2.6) ค่าพารามิเตอร์ของระบบ คือ σ ρ และ β ซึ่งในการสร้างแบบจำลองเพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของระบบนั้นอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ได้แก่ $\sigma = 10$ $\rho = 28$ และ $\beta = 8/3$ ผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 พฤติกรรมของระบบลอเรนซ์

2.3.3 ระบบรอสเลอร์

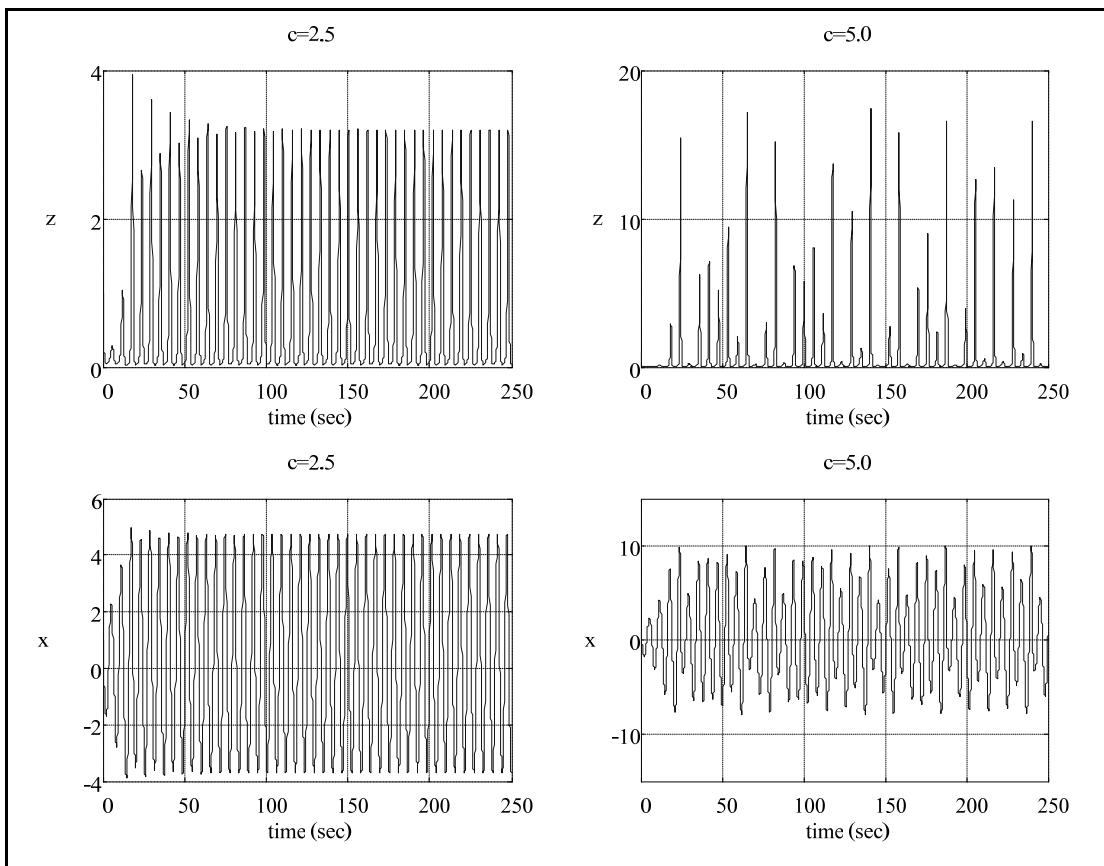
แบบจำลองของรอสเลอร์มีความง่ายกว่าแบบจำลองของลอเรนซ์และมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = -(z + y) \quad (2.7)$$

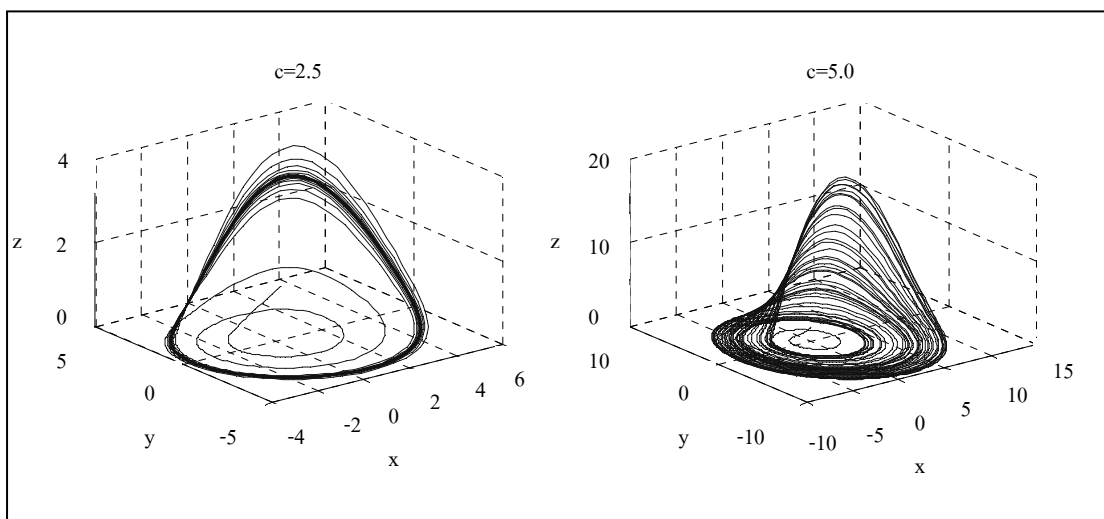
$$\frac{dy}{dt} = x + ay \quad (2.8)$$

$$\frac{dz}{dt} = b + xz - cz \quad (2.9)$$

ซึ่งมีตัวแปรพลวัตของระบบคือ x y และ z โดยมีพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ xz และมี a b c เป็นพารามิเตอร์ การศึกษาสภาวะอลวนทำได้โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ a และ b มีค่าคงที่เท่ากับ 0.2 ทั้งคู่ และปรับแปรพารามิเตอร์ c จนกว่าจะเกิดสภาวะอลวน พบว่าตัวแปร z เกิดสภาวะอลวนเมื่อ $c=2.5$ และ $c=5.0$ ทั้งนี้ได้แสดงผลการจำลองในโดเมนเวลาไว้ในรูปที่ 2.10 และแสดงผลในปริภูมิสแตตไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ผลการจำลองสมการรอสเลอร์ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.11 ผลการจำลองสมการรอสเลอร์ในปริภูมิสามมิติ (x y z)

อาจกล่าวได้ว่าประโยชน์ของการศึกษาสภาวะอลวนมีอยู่ 3 ด้านด้วยกัน คือ 1) ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต 2) ใช้ในการสร้างระบบอลวน และ 3) ใช้ในการควบคุมหรือสร้างความเสถียรให้กับระบบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต

เนื่องจากระบบที่เกิดความอลวนนั้นไม่สามารถที่จะบอกพฤติกรรมในช่วงเวลาระยะยาวได้ แต่สามารถที่จะบอกถึงพฤติกรรมในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของระบบนั้นและสภาวะตั้งต้นของระบบ ในปัจจุบันการศึกษาวิเคราะห์เพื่อทำนายอนุกรมเวลาตามแนวคิดของทฤษฎีความอลวน มีการใช้ประโยชน์ในด้านการทำนายความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (peak load) ในแต่ละวัน หรือปริมาณความต้องการใช้น้ำในแต่ละวัน ตลอดจนการพยากรณ์อากาศ เป็นต้น

2. ใช้ในการสร้างระบบอลวน

คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับมนุษย์คือคุณสมบัติที่คงที่ แต่ถึงอย่างไรก็ตามยังมีการยืนยันที่ทำให้ทราบได้ว่าคุณสมบัติที่มนุษย์รู้สึกสบายตัว คือ คุณสมบัติที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาอย่างอลวนรอบจุด ๆ หนึ่ง หรือที่เรียกว่าการแกว่งไกวแบบรายคาบ จากแนวคิดนี้ได้นำไปสู่การประยุกต์และพัฒนาการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนของบริษัทชโยในประเทศญี่ปุ่นที่ถือว่าเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าชิ้นแรกที่ก่อกำเนิดบนพื้นฐานของทฤษฎีอลวน และนอกจากนั้นบริษัทซัมซุงยังได้นำเอาทฤษฎีอลวนมาใช้ในการควบคุมหัวฉีดน้ำของเครื่องล้างจานซึ่งสามารถที่จะควบคุมปริมาณการใช้น้ำได้ดีกว่าแบบอื่น เพราะเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดที่คล้ายกับความไร้ระเบียบมีผลทำให้ครอบคลุมพื้นที่ได้ดีกว่าการเคลื่อนที่แบบปกติ

3. ใช้ในการควบคุมหรือสร้างเสถียรภาพให้กับระบบ

ระบบอลวนมีความไวต่อสภาวะตั้งต้นมาก เมื่อมีการรบกวนเพียงเล็กน้อยจึงทำให้เกิดผลขยายได้มาก ซึ่งการเพิ่มสัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยที่เหมาะสมเข้าสู่ระบบอลวน สามารถทำให้ระบบนั้นมีเสถียรภาพหรืออาจทำให้ระบบหลุดจากเสถียรภาพไปสู่สภาวะที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว เช่น การควบคุมยานอวกาศ ISEE-3 ให้ลอยไปสำรวจดาวหางที่ต้องการสำรวจได้โดยใช้เชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อย เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้งานทฤษฎีอลวนมิได้จำกัดแต่เพียงตัวอย่างที่ได้นำเสนอเท่านั้น ทฤษฎีความอลวนยังสามารถประยุกต์ใช้ได้อีกมากมายหลายสาขา เช่น ในด้านการสื่อสารซึ่งสามารถที่จะใช้สัญญาณอลวนในการเข้ารหัสข้อมูล (encryption) เพื่อป้องกันการขโมยข้อมูลหรือนำหลักการของทฤษฎีความอลวนไปใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุด (optimization) ของฟังก์ชัน ซึ่งทำให้ได้ค่าที่ดีที่สุดที่แท้จริง (global optimum) ได้ง่ายขึ้น เพราะความอลวนสามารถช่วยให้กระบวนการหาค่าตอบหลุดจากการติดลอคค่าตอบท้องถิ่นได้อย่างดี

บทที่ 3

วงจรริ้วและวงจรวงกวดแบบวินบริดจ์

3.1 บทนำ

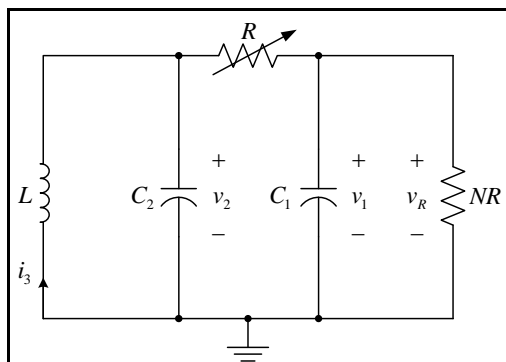
วงจรวงกวดสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ป้อนกลับและรูปแบบของวงจร เช่น วงจรวงกวดแบบเลื่อนเฟส (phase-shift oscillator) วงจรวงกวดแบบวินบริดจ์ (wien-bridge oscillator) วงจรวงกวดแบบสี่เหลี่ยม (quadrature oscillator) วงจรวงกวดแบบฮาร์ทเลย์ (hartley oscillator) เป็นต้น วงจรเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อสร้างสัญญาณออสซิลเลชันได้ โดยเฉพาะวงจรริ้วเป็นวงจรรีสร้างสัญญาณออสซิลเลชันที่นิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวงจรรีที่ไม่ซับซ้อน ใช้ชิ้นส่วนน้อย สามารถสร้างและใช้งานง่ายให้สัญญาณเอาต์พุตออสซิลเลชันที่มั่นคง และลักษณะการเคลื่อนที่ของสัญญาณเป็นแบบม้วนที่ซับซ้อน

วงจรวงกวดแบบวินบริดจ์ เป็นอีกวงจรรีหนึ่งที่สามารถสร้างสัญญาณออสซิลเลชันได้ดี ลักษณะโครงสร้างของวงจรรีไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการศึกษาและสร้าง สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับการสร้างการม้วนออสซิลเลชัน นั่นคือสามารถต่อร่วมกับความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นในวงจรริ้วซึ่งให้กำเนิดสัญญาณการม้วนออสซิลเลชันได้เช่นเดียวกับวงจรริ้ว

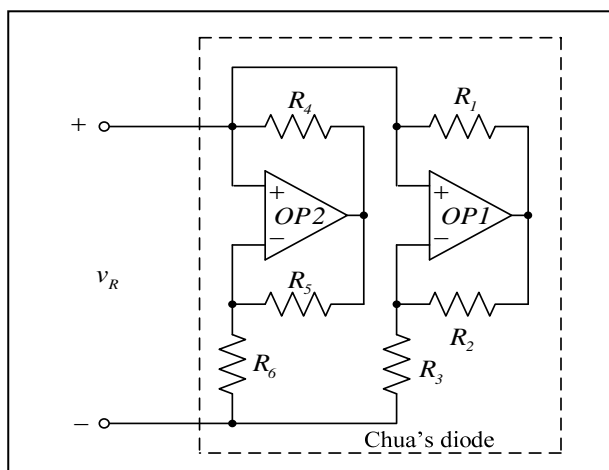
3.2 วงจรริ้ว

วงจรริ้ว (chua's circuit) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นวงจรรีอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถสร้างสัญญาณที่เรียกว่าพฤติกรรมออสซิลเลชันได้ ส่วนประกอบของวงจรรีที่ส่งผลต่อการเกิดของพฤติกรรมออสซิลเลชันคือ ความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรือที่เรียกกันว่านิ้วไดโอด ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นนี้ ในทางปฏิบัติสามารถสร้างขึ้นด้วยโครงข่ายออปแอมป์และความต้านทานดังแผนภาพในรูปที่ 3.2 เพื่อให้โครงข่ายมีลักษณะสมบัติดังกราฟ $f(v_R)$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 วงจรริ้วที่สมบูรณ์แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 3.4

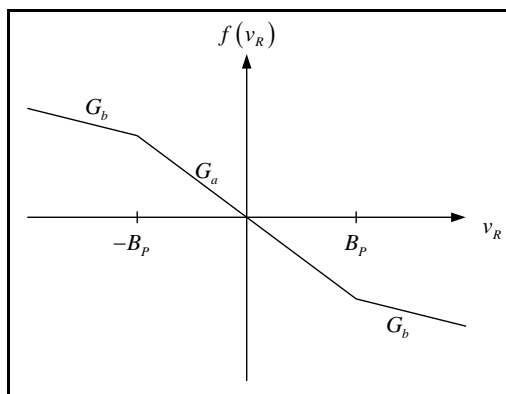
การสร้างสัญญาณออสซิลเลชันด้วยวงจรริ้วนั้น ความถี่ของสัญญาณออสซิลเลชันที่ได้จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ หากต้องการสัญญาณความถี่ต่ำ ต้องเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำให้มากขึ้น แต่จะประสบปัญหาเกี่ยวกับขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่โตขึ้นด้วย ซึ่งทำให้การสร้างเป็นไปได้ยากและไม่สะดวกในการใช้งาน จากปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (gyrator หรือ simulated inductor) แทน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และเมื่อรวมวงจรรีเข้าด้วยกันจะได้วงจรริ้วที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำเสมือนดังแสดงในรูปที่ 3.6



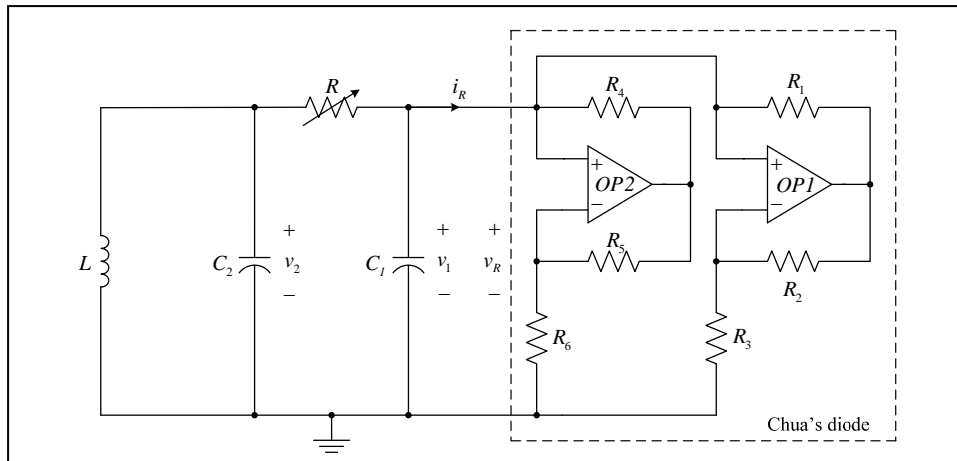
รูปที่ 3.1 วงจรลumpedแบบพื้นฐาน



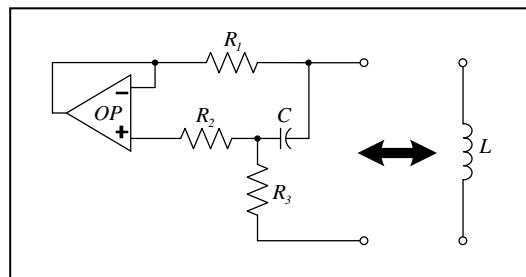
รูปที่ 3.2 โครงข่ายออปแอมป์ใช้เพื่อความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น



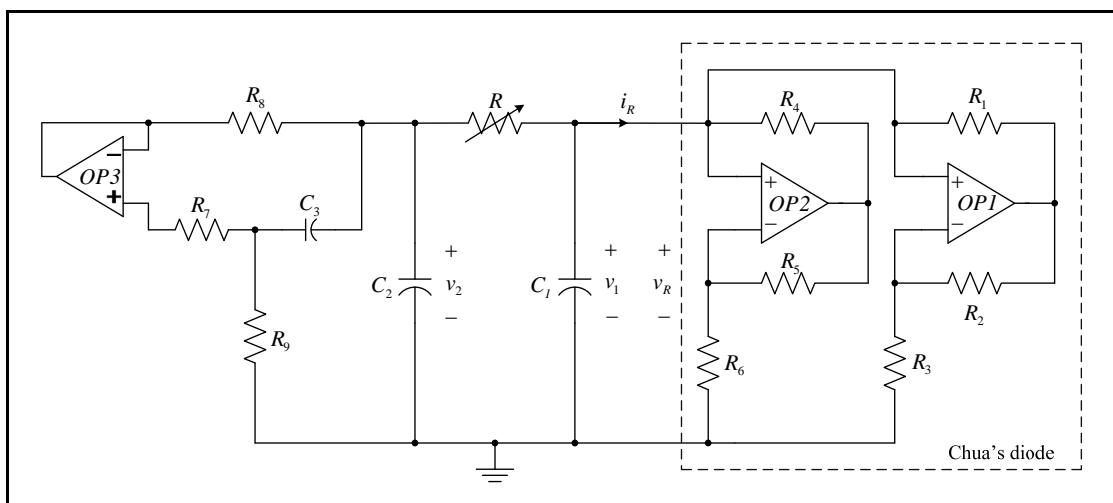
รูปที่ 3.3 ช่วงความชันของความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.4 วงจรนำที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.5 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน



รูปที่ 3.6 วงจรนำที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน

วงจรที่ทำให้กำเนิดสร้างสัญญาณอลวน มีสมการพลวัตทางไฟฟ้าดังต่อไปนี้

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R}(v_2 - v_1) - f(v_R) \quad (3.1)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R}(v_1 - v_2) + i_L \quad (3.2)$$

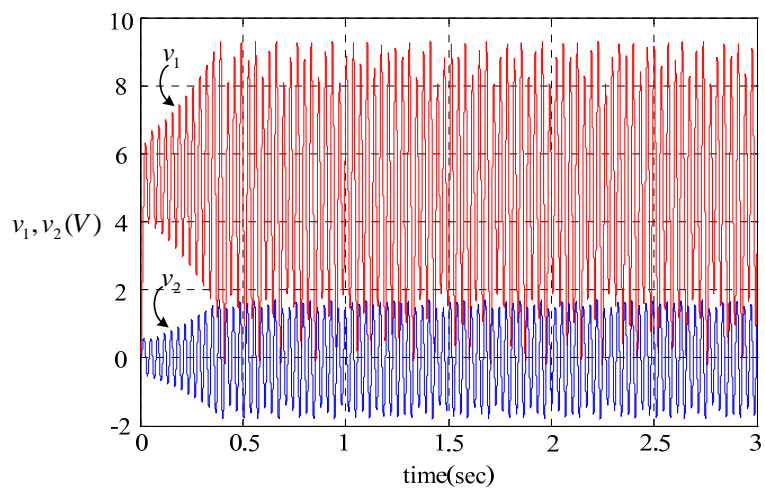
$$L \frac{di_L}{dt} = -v_2 \quad (3.3)$$

เมื่อ v_1 , v_2 และ i_L คือแรงดันตกคร่อม C_1 , C_2 และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ตามลำดับ ส่วน $f(v_R)$ คือ สมการลักษณะสมบัติของความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้นแสดงด้วยสมการ (3.4)

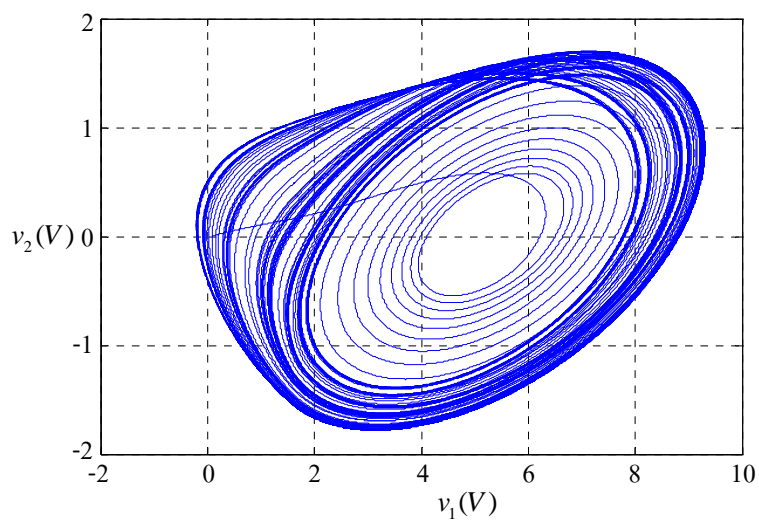
$$f(v_R) = G_b v_R + \frac{1}{2}(G_a - G_b)(|v_R - B_p| - |v_R + B_p|) \quad (3.4)$$

เมื่อ G_a และ G_b คือ ความชันของกราฟลักษณะสมบัติ $f(v_R)$ ช่วงด้านในและด้านนอกตามลำดับ โดยมี B_p เป็นจุดสิ้นสุดช่วงที่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 3.3

ลักษณะของสัญญาณอลวนพื้นฐานที่ได้จากวงจรนี้มีสองรูปแบบ ได้แก่ แบบวงม้วนเดี่ยว (single scroll) และแบบวงม้วนคู่ (double scroll) รูปแบบของสัญญาณที่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่อยู่ระหว่าง C_1 และ C_2 ในวงจร ลักษณะของสัญญาณอลวนที่เกิดขึ้นทั้งสองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

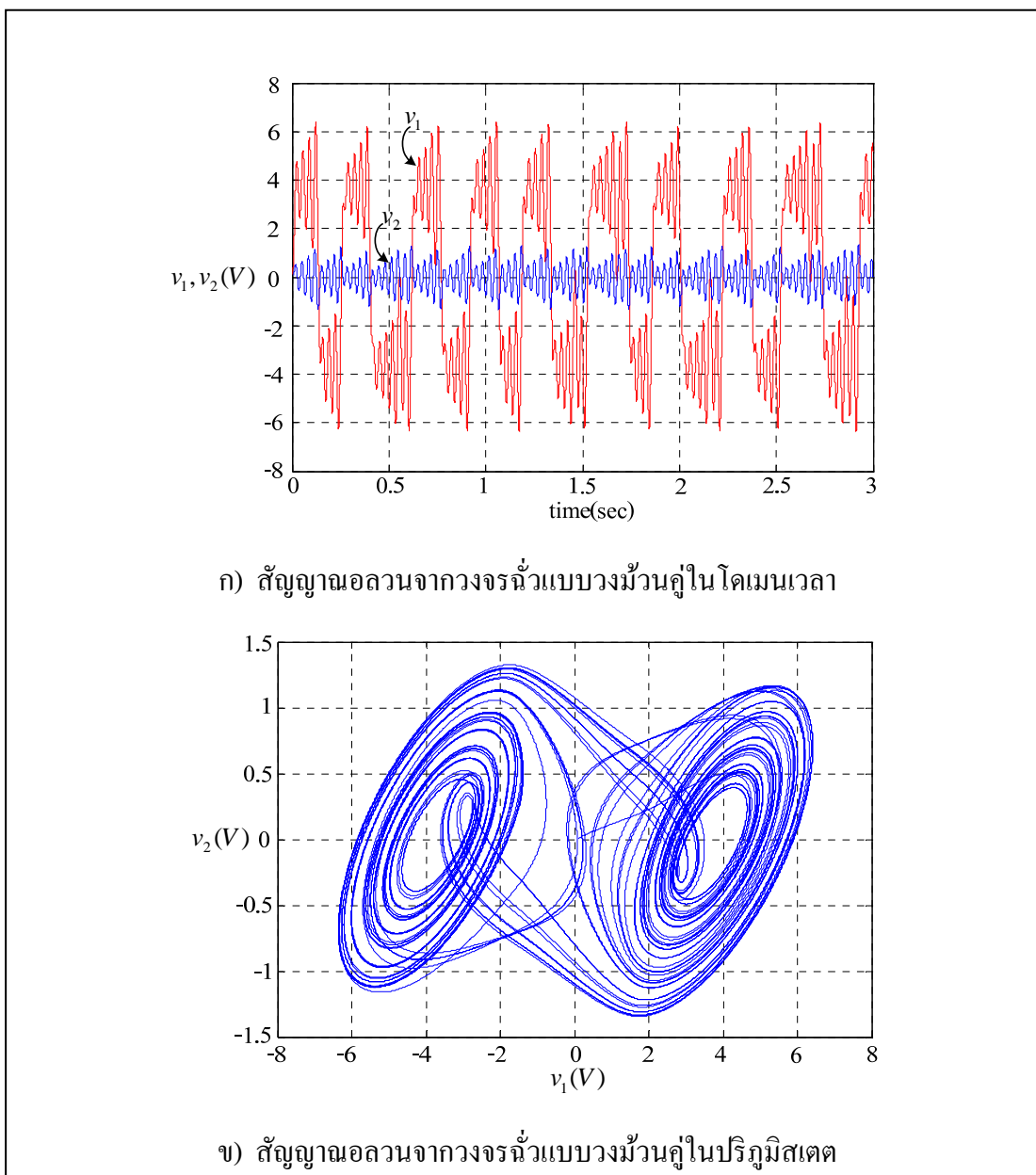


ก) สัญญาณอลวนจากวงจรนิวแบบวงม้วนเดี่ยวในโดเมนเวลา



ข) สัญญาณอลวนจากวงจรนิวแบบวงม้วนเดี่ยวในปริภูมิสเตต

รูปที่ 3.7 สัญญาณอลวนจากวงจรนิวแบบวงม้วนเดี่ยว



รูปที่ 3.8 สัญญาณอลวนจากวงจรหัวแบบม้วนคู่

3.2.1 หลักการทำงานของวงจรหัว

พิจารณาวงจรในรูปที่ 3.4 เห็นได้ว่าองค์ประกอบของวงจรมีตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว ตัวเก็บประจุ 2 ตัว ความต้านทานปรับค่าได้ และโครงข่ายออปแอมป์ทำหน้าที่ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น การทำงานของวงจรเพื่อให้เกิดสัญญาณอลวนขึ้นนี้ ต้องมีการกำหนดค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุเพื่อเป็นค่าเริ่มต้นให้กับวงจร โครงข่ายออปแอมป์ที่ต่อรวมในวงจรทำหน้าที่ในการสร้าง

ความต้านทานลบ (negative resistance) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดแรงดันที่เกี่ยวข้องกับรูปลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้น สภาวะอลวนที่เกิดขึ้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสแตต 2 ตัว ได้แก่ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 สัญญาณมีรูปลักษณะของการโคจรที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานละเอียด

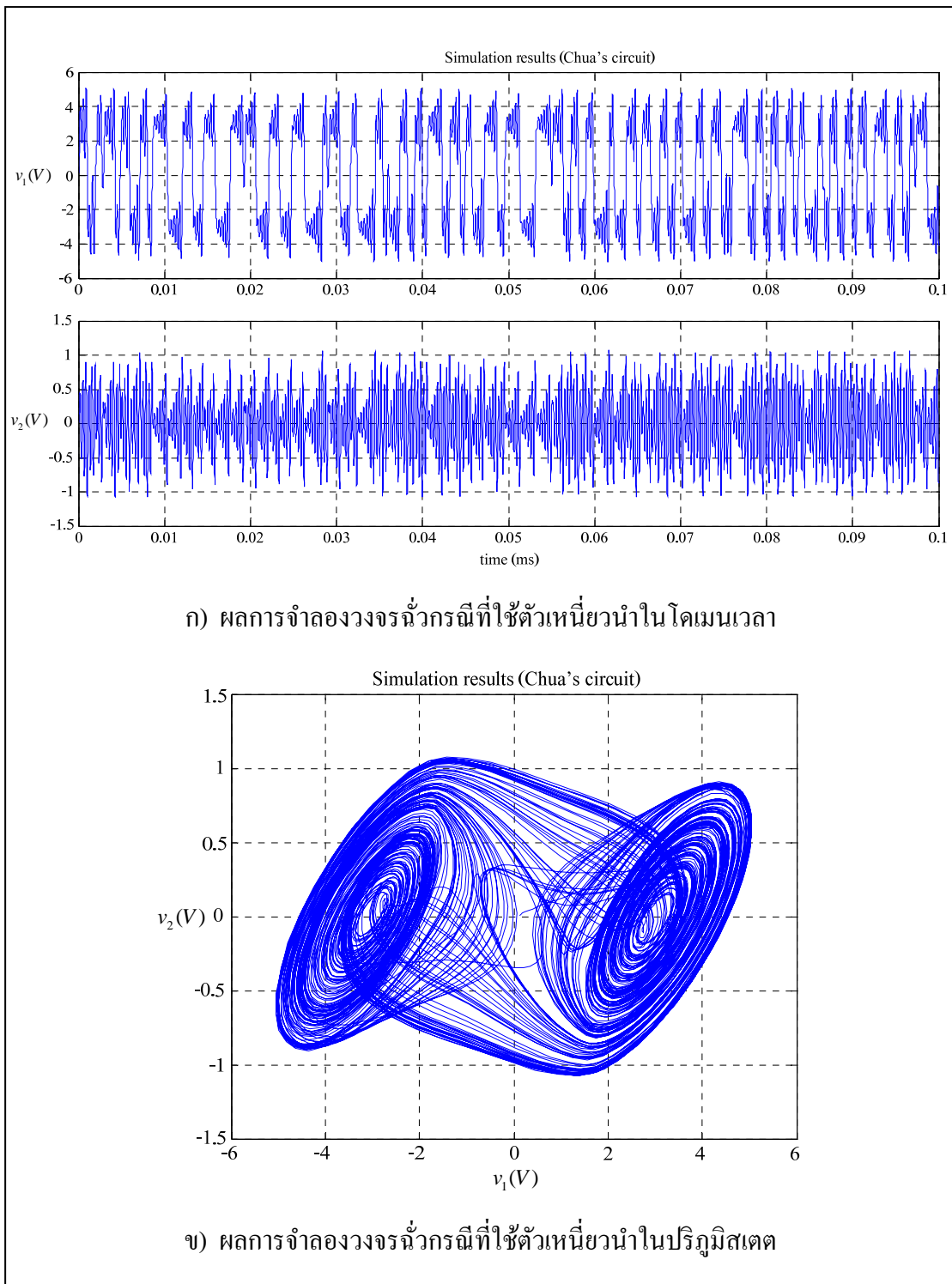
วงจรในรูปที่ 3.6 เป็นวงจรจั่วที่มีการพัฒนาโดยเปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำให้เป็นโครงข่ายออปแอมป์หรือที่เรียกว่า ตัวเหนี่ยวนำเสมือน ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงของวงจรนี้ส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรปรับค่าได้ยาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเหนี่ยวนำอาจทำให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปด้วย และกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำจะส่งผลให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำ จึงปรับปรุงวงจรให้อยู่ในลักษณะที่ง่ายต่อการปรับแต่งค่าได้อย่างละเอียด ทั้งนี้ค่าความเหนี่ยวนำเสมือนสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.5)

$$L = R_8 R_9 C_3 \quad (3.5)$$

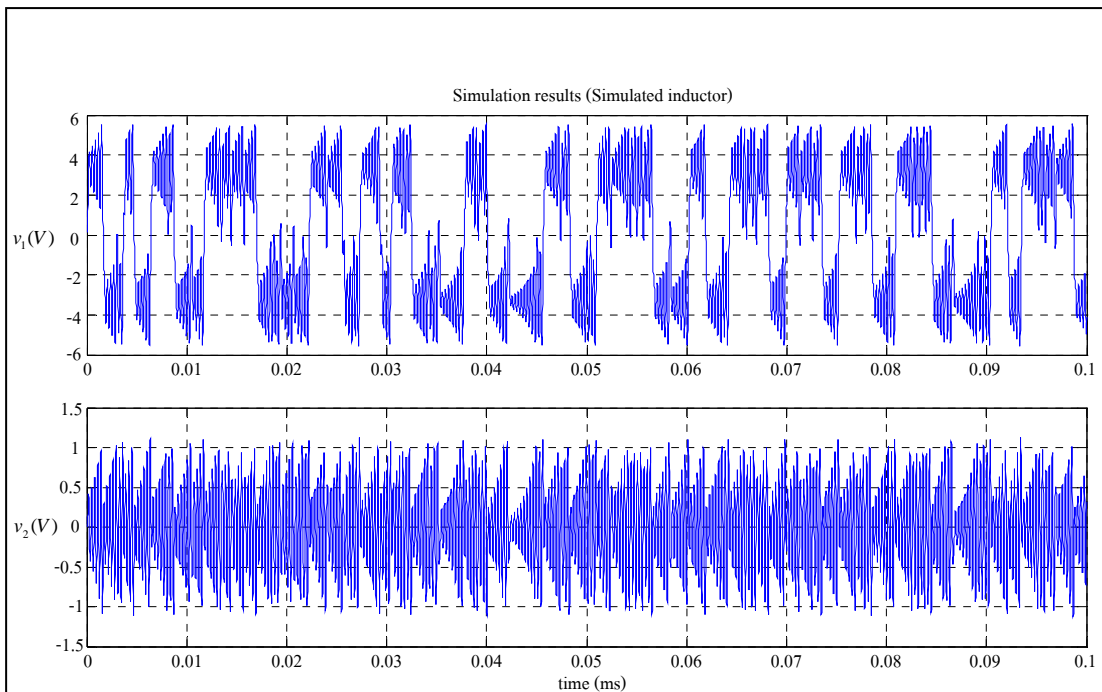
ทั้งนี้ค่าความต้านทาน R_7 ถูกกำหนดให้มีค่า $10k\Omega$

3.2.2 การจำลองสถานการณ์วงจรจั่ว

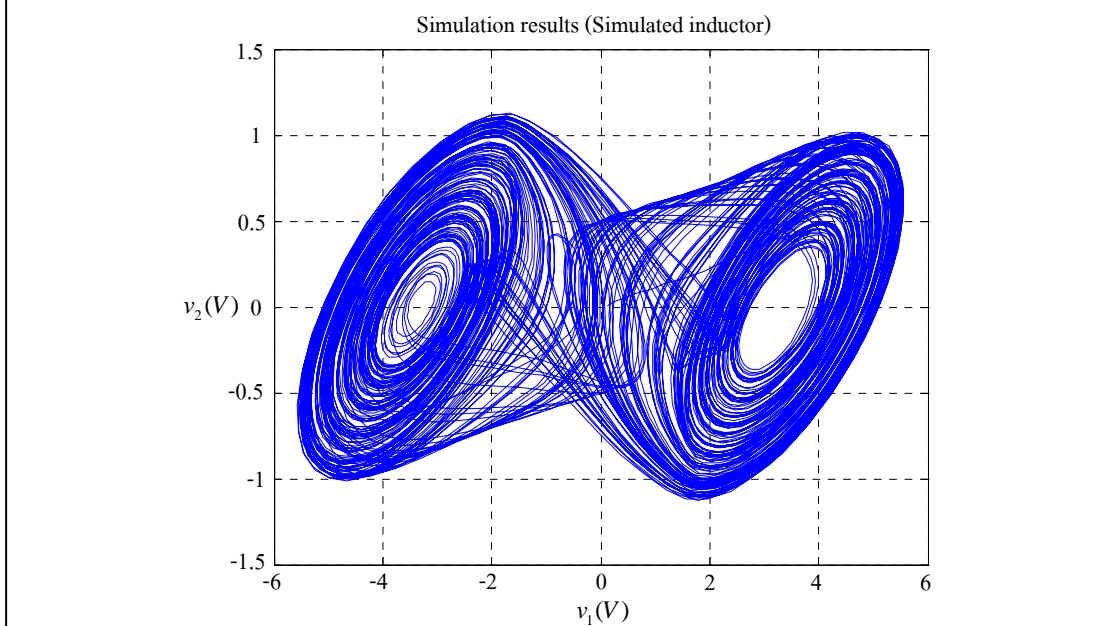
พฤติกรรมของวงจรจั่วสามารถศึกษาได้โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIM ซึ่งในการจำลองนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 การจำลองวงจรจั่วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำดังแผนภาพวงจรในรูปที่ 3.4 และกรณีที่ 2 การจำลองวงจรจั่วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนดังแผนภาพวงจรในรูปที่ 3.6 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ ซึ่งในลักษณะที่เกิดขึ้นทั้งในโดเมนเวลาและปริภูมิสแตตจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี เมื่อแทนตัวเหนี่ยวนำด้วยโครงข่ายออปแอมป์แล้ว สามารถที่จะปรับความละเอียดค่าความเหนี่ยวนำได้ง่ายกว่าตัวเหนี่ยวนำปกติ ทั้งนี้ในการจำลองสถานการณ์ทั้งสองกรณีนี้จะต้องอาศัยการปรับความต้านทาน (R) ตามวงจรในรูปที่ 3.4 และ 3.6 ซึ่งทำการปรับค่าความต้านทานเพื่อให้ลักษณะของการม้วนอลวนมีความสมดุล และการจำลองทุกกรณีจะต้องมีการกำหนดค่าแรงดันอินพุตป้อนให้กับวงจร ทั้งนี้สำหรับผลการจำลองในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ได้กำหนดให้ v_1 v_2 คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 ผลการจำลองวงจรนำวกรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ



ก) ผลการจำลองวงจรที่ใช้อัตราส่วนขดลวดในโดเมนเวลา



ข) ผลการจำลองวงจรที่ใช้อัตราส่วนขดลวดในปริภูมิสแตต

รูปที่ 3.10 ผลการจำลองวงจรที่ใช้อัตราส่วนขดลวด

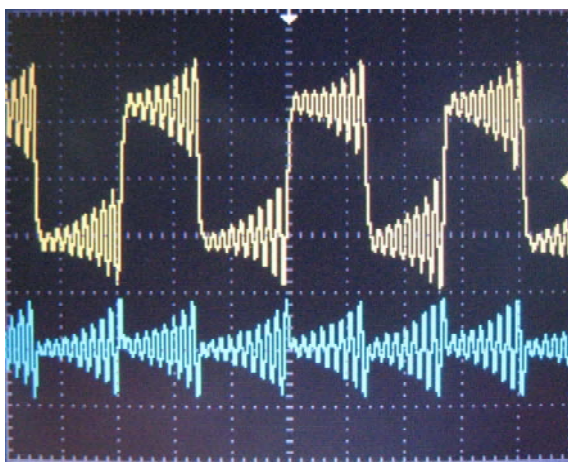
3.2.3 การทดสอบวงจรรีจิว

เพื่อเป็นการยืนยันผล จึงได้ทดสอบวงจรดังแผนภาพในรูปที่ 3.4 และ 3.6 ตามลำดับ ในการทดสอบวงจรทุกครั้ง ต้องมีการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ เพื่อเป็นการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นให้กับวงจรอย่างถูกต้อง ในการทดสอบวงจรนี้ ได้กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวเป็น 1 โวลต์ อุปกรณ์ *RLC* และออปแอมป์ที่ใช้ในการทดสอบ ได้รวบรวมแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และผลของการทดสอบของทั้งสองกรณีแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ

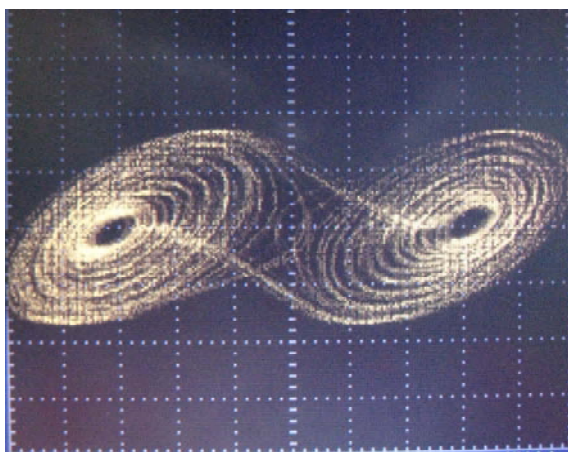
ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรรีจิว

ความต้านทาน (R)	ตัวเก็บประจุ (C)	ตัวเหนี่ยวนำ (L)	ออปแอมป์
$R_1 = R_2 = 220\Omega$	$C_1 = 10nF$	$L = 18mH$	LM741
$R_3 = 2.2k\Omega$	$C_2 = 100nF$		
$R_4 = R_5 = 22k\Omega$	$C_3 = 0.01\mu F$		
$R_6 = 3.3k\Omega$			
$R_7 = 10k\Omega$			
$R_8 = 519k\Omega$			
$R_9 = 0.68\Omega$			
$R = 2k\Omega$			

ในการทดสอบวงจรมันสามารถที่จะบอกได้ว่า ขั้นตอนการทดสอบก่อนข้างที่จะละเอียด เนื่องจากต้องอาศัยการอัดประจุให้กับคาปาซิเตอร์ซึ่งอยู่ในส่วนของการกำเนิดสัญญาณของวงจร การแสดงพฤติกรรมการม้วนอลวนนั้นตัวควบคุมหลักคือความต้านทานปรับค่าได้ (R) ซึ่งเป็นตัวควบคุมให้เกิดการม้วนอลวนทั้งแบบเดี่ยวและแบบคู่ ทั้งนี้ผลการทดสอบที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันแต่มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ซึ่งอาจมีผลมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบไวต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอก

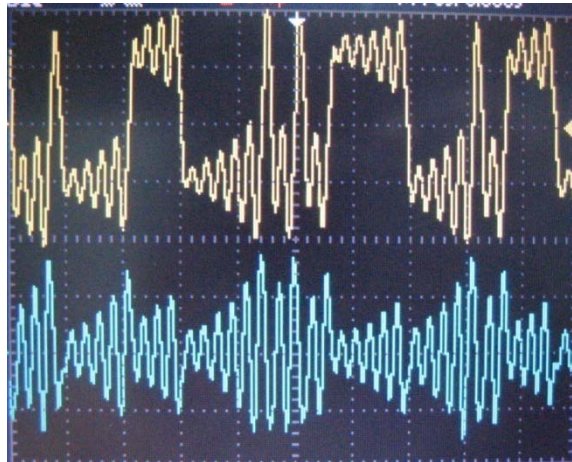


- ก) ผลการทดสอบวงจรนำคลื่นที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา (ms) ที่มีมาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มีมาตราส่วน 5 V/div 2 V/div ตามลำดับ

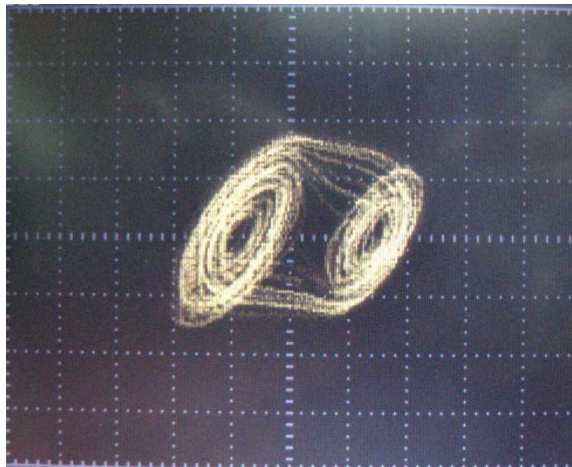


- ข) ผลการทดสอบวงจรนำคลื่นที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในปริภูมิสเตต แกนนอนคือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มีมาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มีมาตราส่วน 1 V/div

รูปที่ 3.11 ผลการทดสอบวงจรนำคลื่นที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ



- ก) ผลการทดสอบวงจรแบบฉั้วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนในโดเมนเวลา แกนนอนคือ แกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 5 V/div 1 V/div ตามลำดับ

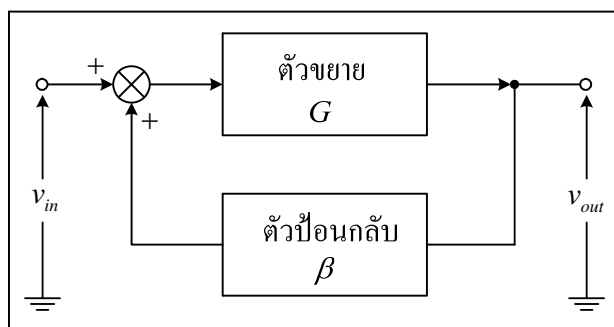


- ข) ผลการทดสอบวงจรแบบฉั้วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนในปริภูมิสเตต แกนนอนคือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div

รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบวงจรแบบฉั้วโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน

3.3 วงจรแวก์กวัดแบบวินบริดจ์

วงจรแวก์กวัดคือ วงจรกำเนิดสัญญาณ โดยที่ไม่มีการป้อนสัญญาณอินพุตจากภายนอก ด้วยวิธีการป้อนกลับแบบบวกก็สามารถทำให้เกิดการแวก์ของสัญญาณได้ วงจรแวก์กวัดที่มีการป้อนกลับแบบบวกอาจแทนด้วยแผนภาพบล็อกซึ่งเขียนแสดงอัตราส่วนของแรงดัน V_{out} ต่อ V_{in} ดังรูปที่ 3.13



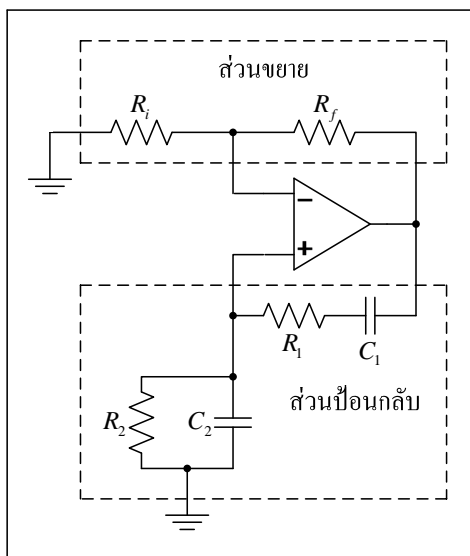
รูปที่ 3.13 แผนภาพบล็อกแทนวงจรแวก์กวัดที่มีการป้อนกลับแบบบวก

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{G}{1 - \beta G} \quad (3.6)$$

นั่นคือ

$$V_{out} = GV_{in} + \beta GV_{out} \quad (3.7)$$

เบื้องต้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวงจรแวก์กวัดแบบวินบริดจ์ และนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างการม้วนอลวน โดยต่อร่วมกับจั่วไดโอด ทั้งนี้เนื่องจากวงจรแวก์กวัดแบบวินบริดจ์มีโครงสร้างที่มีไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง วงจรมีพารามิเตอร์ R_i และ R_f ต่อเข้าด้วยกันเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส มีการป้อนกลับแบบบวกจากเอาต์พุตไปยังอินพุตโดยผ่านโครงข่าย R_1 , R_2 , C_1 และ C_2 ในลักษณะวงจรตามรูปที่ 3.14 ลักษณะเด่นของวงจรแวก์กวัดแบบวินบริดจ์คือ การกำหนดค่าความถี่ของการแวก์กวัด (f_0) กับค่าอัตราการขยาย (G) ของวงจรขยายสามารถทำได้อย่างมีอิสระต่อกัน ซึ่งทำให้สะดวกสำหรับการออกแบบและการใช้งาน



รูปที่ 3.14 โครงสร้างวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์

จากโครงสร้างของวงจรในรูปที่ 3.14 เมื่อกำหนดให้ $R_1 = R_2 = R$ และ $C_1 = C_2 = C$ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

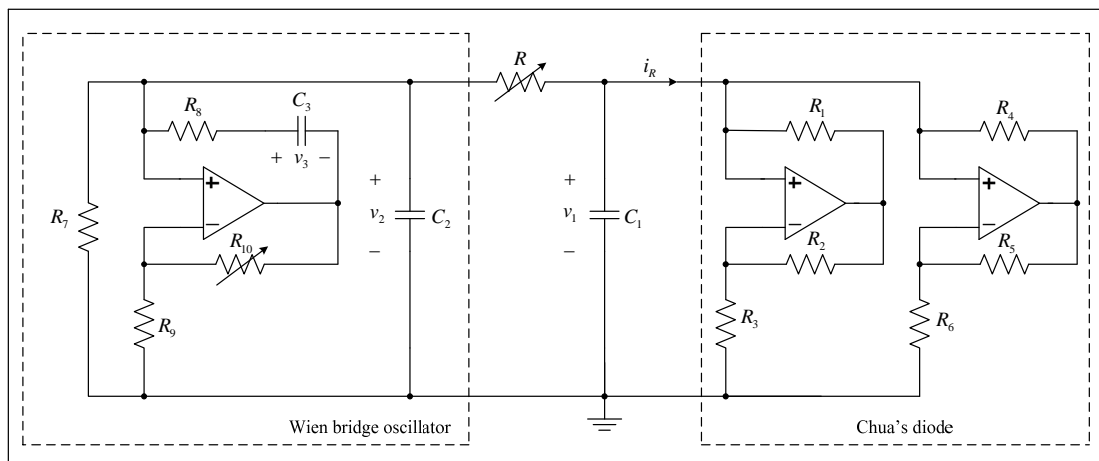
$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (3.8)$$

$$R_f = 2R_i \quad (3.9)$$

ส่วนขยายของวงจรมีอัตราขยาย G ซึ่ง

$$G = \frac{-R_f}{R_i} \quad (3.10)$$

ในส่วนของวงจรให้การป้อนกลับทำให้เกิดการแกว่งไปมาของสัญญาณ รูปคลื่นที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะซ้ำ ๆ กัน งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์มาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณอลวน ซึ่งจะต้องเชื่อมต่อกับวงจรเข้ากับหัวใจ โดยมีโครงสร้างของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.15



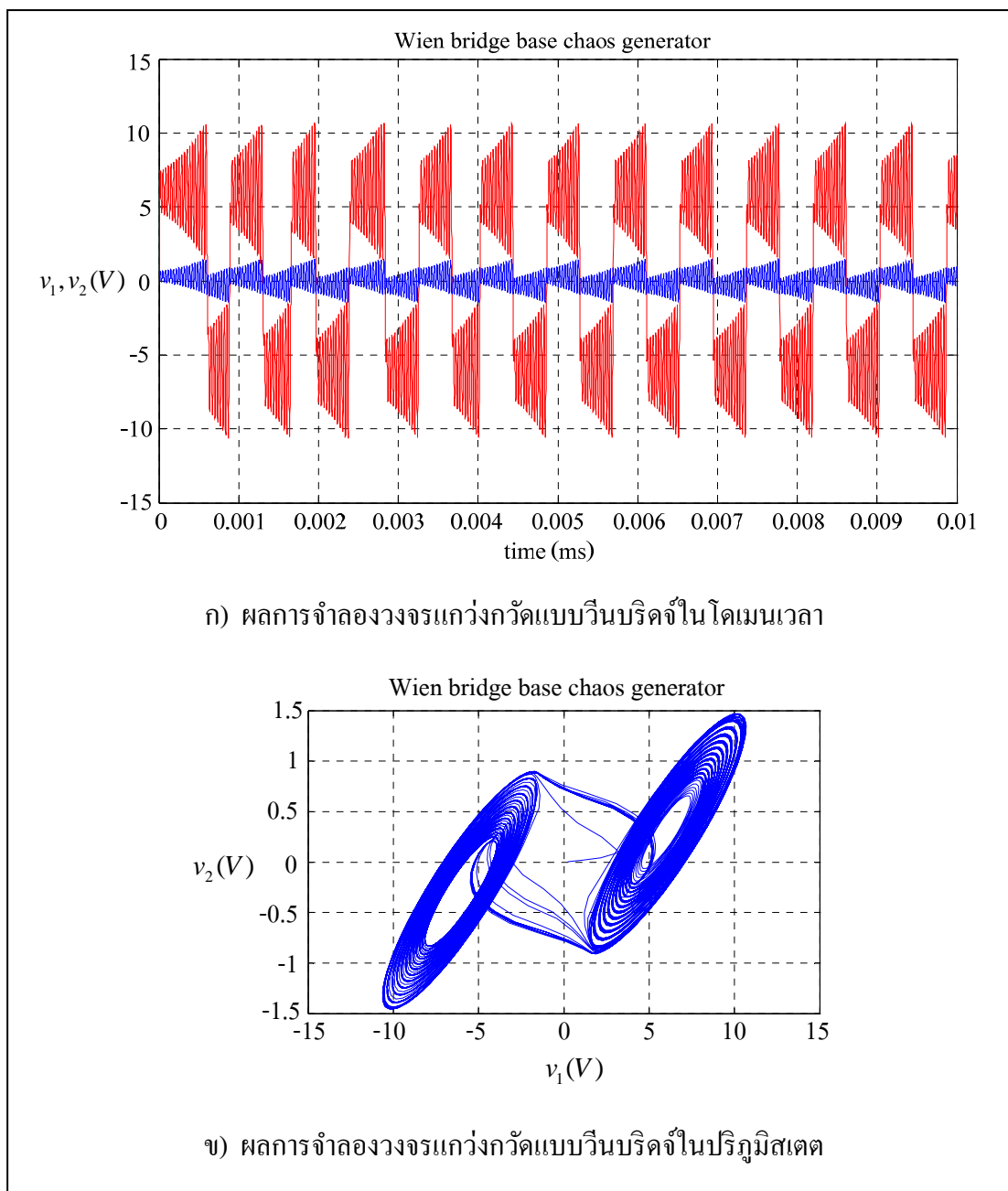
รูปที่ 3.15 วงจรสร้างสัญญาณอลวนที่มีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ

3.3.1 หลักการทำงานของวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์

วงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นอีกวงจรหนึ่งที่สามารถกำเนิดสัญญาณอลวนได้ วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.15 มีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแกว่งกวัดต่อร่วมกับส่วนของวงจรที่เรียกว่าไดโอด เพื่อที่จะควบคุมให้แสดงพฤติกรรมอลวน การกำเนิดสัญญาณแกว่งกวัดนั้นสามารถปรับตั้งค่าความต้านทาน R_{10} และค่าความต้านทาน R จะเป็นส่วนที่ปรับตั้งค่าเพื่อให้เกิดสภาวะอลวน โดยสัญญาณที่สนใจเป็นแรงดัน v_1 และ v_2 ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ตามลำดับ

3.3.2 การจำลองผลวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์

ในการจำลองผลการเกิดพฤติกรรมของวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ที่สามารถกำเนิดการม้วนอลวนได้สองวงม้วนที่มีลักษณะคล้ายกับวงจรแบบนั้นนั้น อาศัยหลักการกำหนดแรงดันที่ตัวเก็บประจุเช่นเดียวกับวงจรทั่วไป การจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM กำหนดแรงดันเริ่มต้นให้กับ C_1 เป็น 1 โวลต์ ซึ่งมีผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์

จากการจำลองสถานการณ์ตามวงจรดังรูปที่ 3.5 ด้วยโปรแกรม PSIM จะเห็นได้ว่า วงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์นี้สามารถควบคุมการเกิดการแกว่งกวัดของสัญญาณได้ด้วยการปรับตั้งค่าความต้านทาน R_{10} ซึ่งเป็นส่วนขยายของวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ทั้งนี้เมื่อสามารถกำเนิดสัญญาณแกว่งกวัดได้แล้ว ความต้านทาน R จะถูกปรับตั้งเพื่อหาจุดที่เหมาะสมต่อการเกิดสภาวะอลวนของสัญญาณ

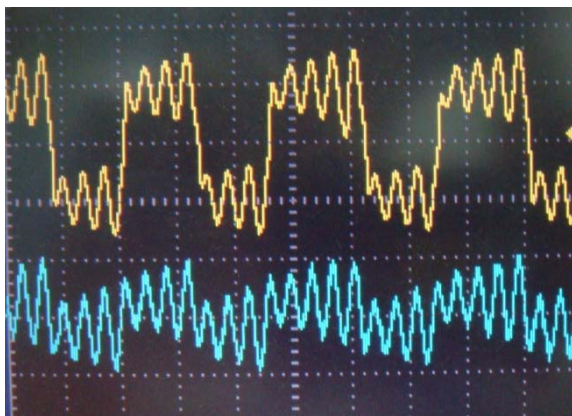
3.3.3 การทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์

เพื่อเป็นการยืนยันผลที่เกิดขึ้นจริงในวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ จึงทำการทดสอบวงจรที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.15 ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ในการทดสอบได้อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุให้แก่ C_1 เป็นการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 1 โวลต์

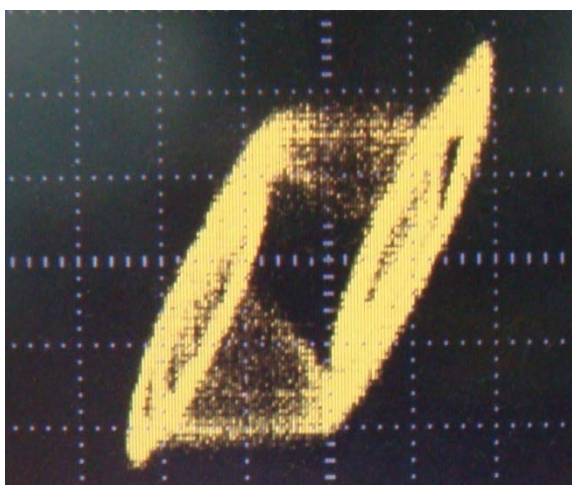
การทดสอบวงจรกำเนิดสภาวะอลวนโดยมีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแกนกำเนิดสัญญาณอลวนพบว่า เมื่อเริ่มอัดประจุให้กับ C_1 แล้วต่อเข้าวงจร สิ่งที่น่าประหลาดใจในลักษณะของปริภูมิสเตตคือ จุดเล็ก ๆ ที่มีการแกว่งไปมา และเมื่อพิจารณาที่โดเมนของเวลาจะพบว่ายังไม่เกิดพฤติกรรมที่เป็นสัญญาณอลวน นั่นคือ สัญญาณ v_1 และ v_2 มีลักษณะที่อยู่บนแกนเดียวกันหรือเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งทำการปรับจูนค่าความต้านทาน R_{10} โดยแต่แรกนั้นปรับตั้งไว้ที่ประมาณ 200 โอห์ม ทำการจนปรากฏสัญญาณอลวนเกิดขึ้นที่ค่าความต้านทานประมาณ 210 โอห์ม ซึ่งเมื่อเกิดการแกว่งกวัดนี้แล้ว ความต้านทาน R จะถูกปรับค่าเพื่อให้เข้าสู่ลักษณะการอลวนมีผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.17

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์

ความต้านทาน (R)	ตัวเก็บประจุ (C)	ออปแอมป์
$R_1 = R_2 = 220\Omega$	$C_1 = 0.33nF$	<i>LM741</i>
$R_3 = 2.2k\Omega$	$C_2 = 47nF$	
$R_4 = R_5 = 22k\Omega$	$C_3 = 47nF$	
$R_6 = 3.3k\Omega$		
$R_7 = 100\Omega$		
$R_8 = 100\Omega$		
$R_9 = 100\Omega$		
$R_{10} = 200\Omega$		
$R = 2k\Omega$		



- ก) ผลการทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน $100 \mu\text{s}/\text{div}$ และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน $500 \text{mV}/\text{div}$ $10 \text{mV}/\text{div}$ ตามลำดับ



- ข) ผลการทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ในปริภูมิสเตต แกนนอนคือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน $500 \text{mV}/\text{div}$ และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน $5 \text{mV}/\text{div}$

รูปที่ 3.17 ผลการทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์

3.4 การควบคุมพฤติกรรมอลวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดพฤติกรรมอลวนที่ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ให้กำเนิดพฤติกรรมที่เรียกว่าการม้วนอลวน วงจรกำเนิดการม้วนอลวนอาศัยวงจรนำและวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์เป็นแกนกลางให้กำเนิดสภาวะอลวน ทั้งสองวงจรมีส่วนประกอบสำคัญที่คล้ายกันคือฉั่วไดโอด แต่พฤติกรรมการม้วนอลวนที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ดังนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดพฤติกรรมอลวนได้ จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกับวงจร ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ของวงจร การกำหนดค่าเริ่มต้นและอินพุตให้กับวงจร รวมถึงคุณภาพของอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเป็นวงจรด้วย

3.4.1 การควบคุมพฤติกรรมอลวนของวงจรนำ

จากโครงสร้างวงจรถวนแบบฉั่วที่มีรูปแบบวงจรไม่ซับซ้อน ทำให้การควบคุมการเกิดการม้วนอลวนนั้นเป็นไปได้ไม่ยาก พารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อการเกิดการแฉ่งของสัญญาณนั้นอยู่ที่ค่าความเหนี่ยวนำในวงจร ซึ่งจะเป็นตัวที่ควบคุมการเกิดสัญญาณอลวนในขั้นพื้นฐาน ความต้านทานที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ในวงจรตามรูปที่ 3.4 และ 3.6 จะเป็นตัวควบคุมการเกิดการม้วนอลวนจากจุดเล็ก ๆ ที่ยังไม่แสดงพฤติกรรมอลวน โดยสามารถที่จะปรับค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนวงจรแสดงพฤติกรรมอลวนวงเดียวจนถึงการอลวนที่ปรากฏสองวงม้วน ซึ่งเป็นรูปแบบโดยทั่วไปที่เกิดขึ้นกับวงจรนำ

3.4.2 การควบคุมพฤติกรรมอลวนของวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์

วงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์เป็นอีกวงจรหนึ่งที่สามารถแสดงพฤติกรรมอลวนได้ในเบื้องต้น ได้นำเอาวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับฉั่วไดโอดตั้งวงจรในรูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมเพื่อให้เกิดพฤติกรรมที่เรียกว่าการม้วนอลวน การควบคุมวงจรแฉ่งกวดแบบวินบริดจ์เพื่อให้เกิดสภาวะอลวนนั้น สามารถควบคุมได้ที่ความต้านทาน R_0 ซึ่งมีผลทำให้เกิดสัญญาณอลวนขึ้นในวงจร และเช่นเดียวกันกรณีของวงจรนำคือ เมื่อเชื่อมต่อด้านส่วนที่เรียกว่าฉั่วไดโอด พฤติกรรมที่เกิดขึ้นสามารถแสดงเป็นการม้วนอลวนได้โดยควบคุมการม้วนอลวนที่ความต้านทาน R

3.5 สรุป

วงจรถวนแบบฉั่วและแบบวินบริดจ์เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแสดงพฤติกรรมอลวนได้ ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมีรูปแบบที่ไม่เหมือนกันเสมอไป แต่เมื่อนำมาผ่านกระบวนการที่เรียกว่า ความเป็นเชิงเส้นแบบต่อเนื่องแล้ว สามารถที่จะแสดงพฤติกรรมที่คล้ายกันคือเกิดเป็นการม้วนอลวนขึ้น ทั้งนี้ในการทดสอบวงจรทั้งสองแบบเพื่อเป็นการยืนยันผลนั้น

พารามิเตอร์ที่มีผลในการควบคุมการเกิดเป็นการม้วนอลวนคือความต้านทาน R ที่ต่ออยู่ระหว่าง C_1 และ C_2 สามารถปรับค่าได้โดยในลักษณะการปรับค่านี้อาจทำให้เกิดเป็นการม้วนอลวนขึ้นเริ่มจากจุดกำเนิดเล็ก ๆ กลายเป็นการม้วนอลวน 1 วงม้วน และ 2 วงม้วนตามลำดับ จนกระทั่งไม่เกิดพฤติกรรมอลวนขึ้นในวงจร ซึ่งในรายละเอียดการม้วนอลวนนั้นจะได้นำเสนอในบทต่อไป

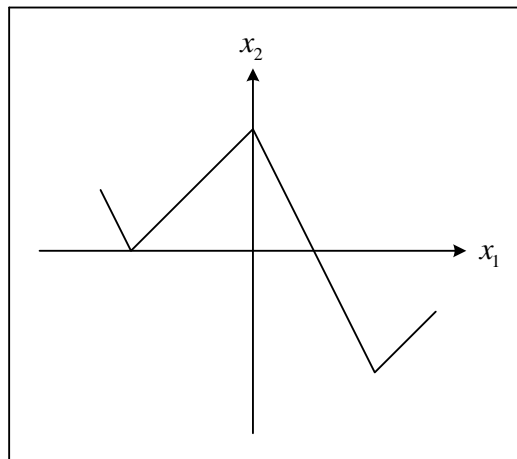
บทที่ 4

การม้วนอลวน

4.1 บทนำ

การม้วนอลวนเป็นพฤติกรรมที่เกิดจากจุดทำงานที่ไม่เสถียร ซึ่งมีลักษณะเป็นการลู่เข้าหาจุดทำงานแต่ไม่สามารถที่จะคงสถานะสมดุล ณ จุดทำงานนั้นได้ และจะเกิดการไถลจากจุดทำงานเดิมไปยังจุดทำงานใหม่โดยมีลักษณะลู่เข้าสู่จุดทำงานนั้น ๆ แต่ไม่สามารถคงสถานะสมดุลที่จุดทำงานใหม่ได้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้แม้จะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กัน แต่ก็ไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่าจุดทำงานที่แน่นอนอยู่ที่ตำแหน่งใด พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จึงเรียกว่า “การม้วนอลวน” (chaotic scroll) การสร้างการม้วนอลวนอาศัยวงจรออปแอมป์ให้กำเนิดการม้วนเป็นจำนวนคู่หรือคี่ก็ได้ การทำงานของวงจรอาศัยหลักการเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วง

4.2 หลักการเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วง

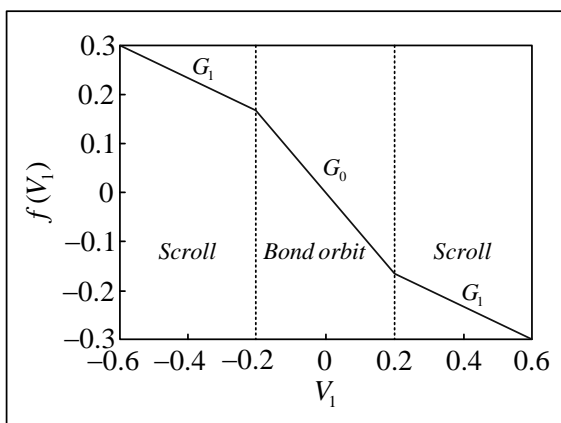


รูปที่ 4.1 ลักษณะของฟังก์ชันเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วง

หลักการเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วงเป็นวิธีการที่นำฟังก์ชันที่มีการสร้างจุดพักจากส่วนของเส้นตรงให้แยกออกเป็นหลาย ๆ ส่วน ซึ่งเกิดขึ้นโดยการแบ่งจากส่วนของเส้นตรงเดิมออกเป็นช่วง ๆ เพื่อให้เกิดเป็นจุดพักย่อย ๆ แทรกในเส้นตรงนั้น ทั้งนี้จุดพักที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ทั้งบวกและลบ

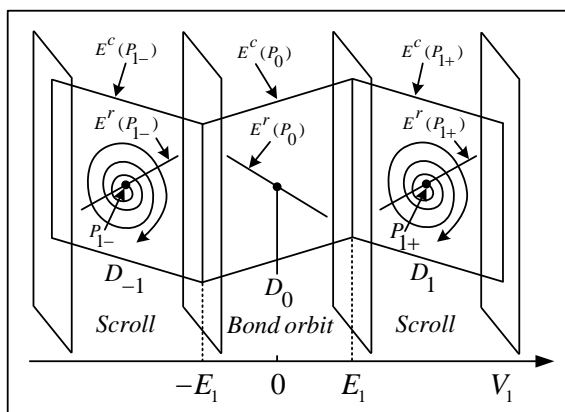
4.3 หลักการเกิดการม้วนอลวน

รูปแบบโดยทั่วไปที่เกิดจากหลักการเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วงนี้ สามารถแสดงเป็นการม้วนอลวนได้โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงจุดทำงาน ซึ่งมีการลู่เข้าหาจุดทำงานใด ๆ แต่ไม่สามารถคงสถานะอยู่ได้ ช่วงการเปลี่ยนแปลงจากจุดทำงานจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งจะเป็นเส้นทางในการเชื่อมต่อระหว่างจุดทำงานสองจุดนั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงแบบอลวนที่เกิดขึ้นนี้จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นการม้วนอลวน (scroll) และส่วนที่เป็นเส้นทางโคจรเชื่อมการม้วน (bond orbit) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งบริเวณที่เป็นพื้นที่ของการม้วนอลวนทั้งสองด้าน จะมีลักษณะเป็นการลู่เข้าแต่ไม่สามารถคงสถานะสมดุล ณ จุดนั้นได้ จึงเกิดการไหลเคลื่อนที่ผ่านตามแนวเส้นทางโคจรเชื่อมการม้วน โดยที่จุดทำงานทั้งสองจุดนี้ยังคงสถานะเข้าใกล้จุดสมดุลอยู่ตลอดเวลา ลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เรียกว่าการม้วนอลวน

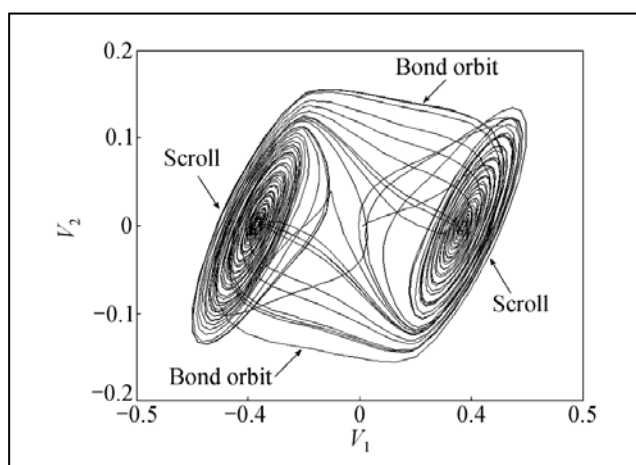


รูปที่ 4.2 กราฟลักษณะสมบัติการม้วนอลวน

พิจารณารูปที่ 4.3 การกำหนดจุดพักแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ $-E_1$ และ E_1 ซึ่งจุดพักแรงดันไฟฟ้านี้เป็นตัวที่แสดงลักษณะการม้วนอลวน และสามารถที่จะเพิ่มลงไปจากจุดเดิมในส่วนของเส้นตรง โดยหลักการของความเป็นเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วง เพื่อให้สามารถสร้างการม้วนอลวนที่มีจำนวนมากกว่า 2 วงม้วน ซึ่งสามารถกำเนิดการม้วนอลวนได้ทั้งแบบจำนวนคู่และจำนวนคี่ หรือแบบคู่และคี่ในวงจรเดียวกัน



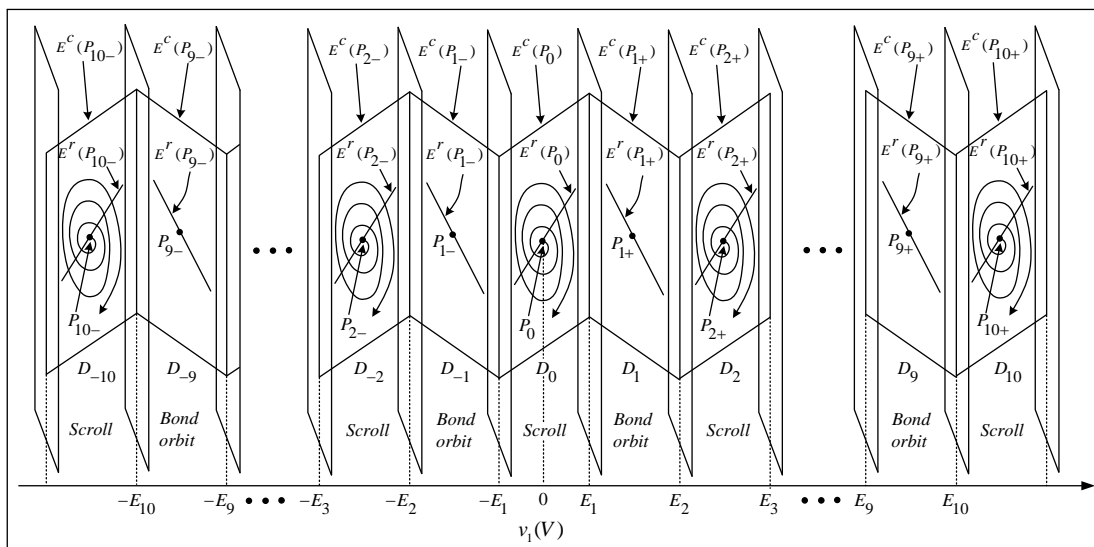
รูปที่ 4.3 สนามเวกเตอร์ของแรงดัน



รูปที่ 4.4 การม้วนอลวนที่ขนาด 2 วงม้วน

ในการสร้างการม้วนอลวนที่มีการม้วนมากกว่า 2 วงม้วน สามารถอธิบายได้จากกราฟในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการแบ่งส่วนของเส้นตรงเพื่อกำหนดจุดพักแรงดัน โดยในการพิจารณาการสร้างการม้วนอลวนนั้นจะอาศัยสมการที่ 4.1 ในการคำนวณหาจุดพักแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจร

$$f(v_1) = G_{n-1}v_1 + 0.5 \sum_{i=1}^{n-1} (G_{i-1} - G_i) \{ |v_1 + E_i| - |v_1 - E_i| \} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.5 สนามเวกเตอร์ของแรงดันที่เกิดมากกว่า 2 วงม้วน

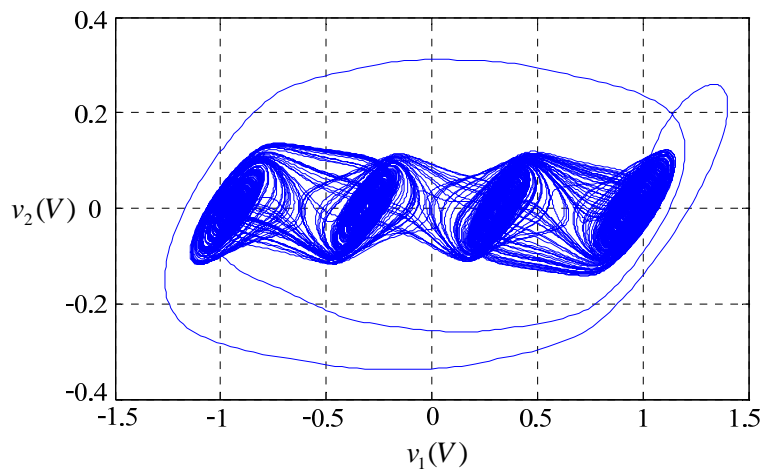
การม้วนอลวนจำนวนคู่

การม้วนอลวนจำนวนคู่คือ ลักษณะที่แสดงการลู่เข้าหาจุดทำงานที่ไม่สามารถคงสถานะการทำงานให้อยู่จุดนั้นได้ โดยจุดทำงานที่มีลักษณะนี้จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนคู่เช่น 2 4 6 8 เป็นต้น ตัวอย่างการเกิดการม้วนอลวนจำนวน 4 และ 6 ม้วน แสดงดังรูปที่ 4.5

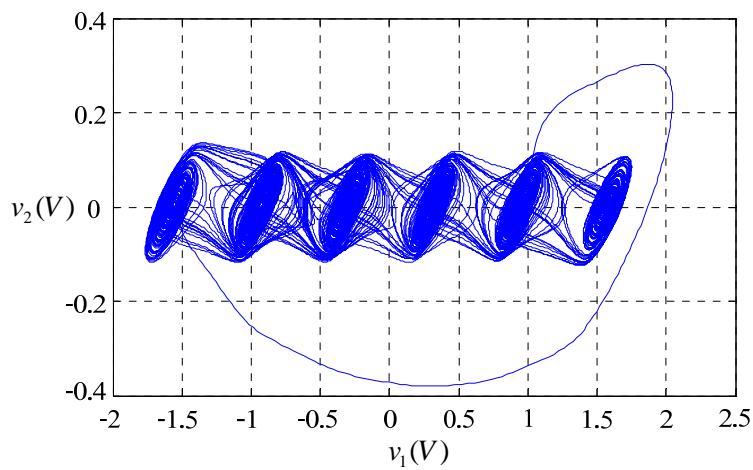
ในลักษณะการเกิดการม้วนอลวนนี้ เริ่มต้นจะต้องมีการกำหนดค่าความนำ G ที่เหมาะสม โดยในการพิจารณาจะต้องพิจารณาที่ค่าความต้านทานในวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างส่วนที่เป็นวงจรสร้างการม้วนอลวนกับส่วนที่เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยค่าความนำที่เป็นค่าเริ่มต้นนี้จะนำไปกำหนดค่าความนำในลำดับถัดไปทุก ๆ ค่าที่ได้จะนำมาใช้เพื่อหาจุดพักแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นมีการกำหนดขึ้นเป็นจุดแรกของการกำเนิดการม้วนอลวน และนำมาคำนวณหาจุดพักจุดอื่น ๆ ของวงจรต่อไป

การม้วนอลวนจำนวนคี่

การม้วนอลวนจำนวนคี่ คือ ลักษณะที่แสดงการลู่เข้าสู่จุดทำงานของพฤติกรรมอลวนที่มีจำนวนจุดทำงานเป็นจำนวนคี่เช่น 3 5 7 9 เป็นต้น โดยลักษณะการม้วนอลวนดังกล่าวนี้สามารถที่จะเกิดขึ้นได้คล้าย ๆ กับการเกิดการม้วนอลวนแบบคู่ ตัวอย่างการม้วนอลวนจำนวนคี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

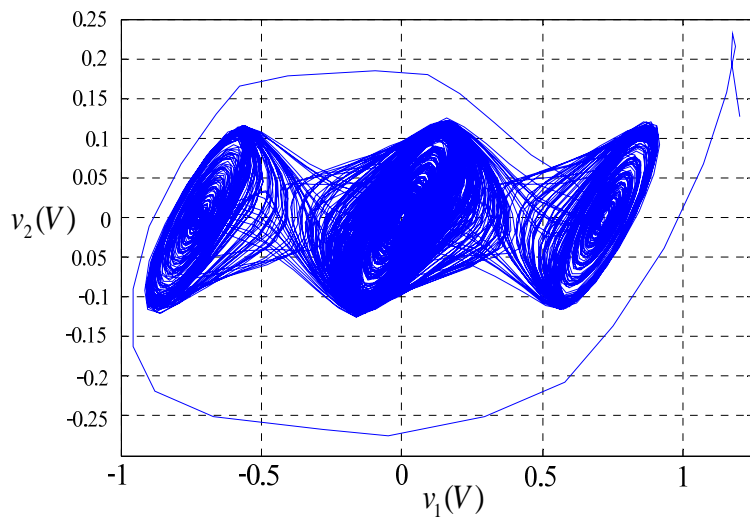


ก) การม้วนอลวนจำนวน 4 วงม้วน

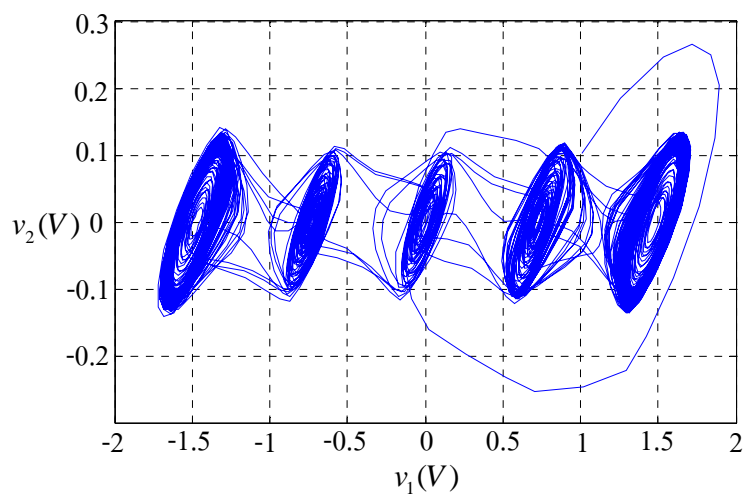


ข) การม้วนอลวนจำนวน 6 วงม้วน

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการม้วนอลวนแบบจำนวนคู่



ก) การม้วนอลวนจำนวน 3 วงม้วน



ข) การม้วนอลวนจำนวน 5 วงม้วน

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการม้วนอลวนแบบจำนวนคี่

4.4 สรุป

พฤติกรรมอลวนที่เกิดขึ้นในวงจรอิเล็กทรอนิกส์อาจจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป แต่ด้วยกระบวนการที่พยายามทำให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้นั้น ได้นำเอาหลักการของความเป็นเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วงเข้ามาประยุกต์ใช้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดพฤติกรรมอลวน โดยในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดพฤติกรรมอลวนนี้สามารถที่จะปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะสมดุลที่จุดทำงานแต่ละจุด ซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดจุดพักแรงดันให้กับระบบ แต่ด้วยลักษณะที่พลวัตรของระบบไม่สามารถคงอยู่ในสภาวะเสถียรนั้นได้ จึงมีการเปลี่ยนจุดทำงานซ้ำไปมา ดังนั้นช่วงเวลาที่ระบบพยายามเข้าสู่สภาวะเสถียรเมื่อนำมาพิจารณาในปริภูมิสแตตจึงมีลักษณะคล้ายการม้วน และช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานจึงมีลักษณะเป็นวิถีโคจรของสัญญาณอลวนนั้น ลักษณะที่เกิดขึ้นจึงเรียกว่าการม้วนอลวน ทั้งนี้รูปแบบโดยทั่วไปที่เกิดขึ้นสามารถสร้างได้ทั้งการม้วนอลวนแบบคู่และแบบคี่หรือเกิดขึ้นได้ทั้งคู่และคี่ในวงจรเดียวกัน แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างการม้วนอลวนแยกเป็นแบบคู่และแบบคี่เท่านั้น เนื่องจากมีโครงสร้างและการควบคุมการเกิดได้ง่าย ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 5

วงจรกำเนิดการม้วนอลวน

5.1 บทนำ

วงจรกำเนิดการม้วนอลวนในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่ วงจรการม้วนอลวนแบบวงม้วนจำนวนคู่และคี่ โดยทั้งสองแบบนี้ให้กำเนิดการม้วนอลวนที่ 2 3 4 และ 5 วงม้วน ที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณอลวนแบบวงจรถั่วและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ซึ่งวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนทั้งสองแบบนี้สามารถที่จะต่อเข้ากับวงจรกำเนิดการม้วนอลวนได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ซึ่งต้องมีการกำหนดแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่เหมาะสมให้กับวงจร ทั้งนี้วงจรที่นำมาสร้างเป็นวงจรการม้วนอลวน ได้นำวงจรพื้นฐานของออปแอมป์เข้ามาประยุกต์ใช้ เช่น วงจรขยายแบบกลับเฟส วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส วงจรบวก วงจรตามแรงดัน เป็นต้น

5.2 หลักการทำงานของวงจรกำเนิดการม้วนอลวน

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์วงจรออปแอมป์เพื่อสร้างการม้วนอลวน ซึ่งมีรายละเอียดของวงจรดังต่อไปนี้

5.2.1 วงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่

จากสมการที่ 4.1 เป็นการกำหนดจุดพักแรงดันไฟฟ้าให้กับ โครงข่ายของวงจรซึ่งเป็นการนำไปสู่การสร้างการม้วนอลวน โดยมีการกำหนดแรงดันเริ่มต้นของวงจร ค่าความนำในวงจร เพื่อให้ได้ค่าที่มีความเหมาะสมต่อการกำเนิดการม้วนอลวน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการกำหนดค่าต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้หาค่าจุดพักแรงดันลำดับต่อไปและค่าความต้านทานต่าง ๆ ของวงจรสร้างการม้วนอลวน ดังนี้

กำหนดให้แรงดันเริ่มต้น $E_1 = 0.2V$ ค่าความนำไฟฟ้าโดยพิจารณาจากค่าความต้านทานที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ที่มีค่าความต้านทาน $1.65k\Omega$ มาใช้ในการหาค่าความนำไฟฟ้า G จากสมการ $1/R$ ซึ่งจะมีเท่ากับ $0.6061S$ และกำหนดค่าความนำไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ $G_0 = G_2 = G_4 = -0.852mS$ และ $G_1 = G_3 = G_5 = -0.32mS$ ซึ่งการกำหนดค่าพารามิเตอร์นี้สามารถที่จะกำเนิดการม้วนอลวนสูงสุดได้ที่ 6 วงม้วน นั่นคือแสดงได้ที่ 2 4 และ 6 วงม้วน ตามลำดับ โดยมีวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบถั่วและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นวงจรแกนกำเนิดสัญญาณอลวน การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$E_{i+1} = \frac{2 \sum_{j=1}^i (G_j - G_{j-1}) E_j}{(G - G_i)} - E_i \quad (i=1,2,3,4) \quad (5.1)$$

จากสมการที่ (5.1) เป็นการหาค่าจุดพักแรงดันของวงจรสร้างการม้วนอลวนที่จำนวน 6 วงม้วน ซึ่งจะได้ค่าแรงดันที่จุดพักแรงดันดังนี้

$$\begin{aligned} E_i &= [E_1 \ E_2 \ E_3 \ E_4 \ E_5] \\ &= [0.2000 \ 0.5441 \ 0.9441 \ 1.2881 \ 1.6881] \text{ V.} \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ของวงจรสร้างการม้วนอลวนแล้ว ต่อไปจึงคำนวณหาค่าความต้านทานในวงจรสร้างการม้วนอลวนได้ดังต่อไปนี้

$$r_{2j} = \frac{R_{2j,2}}{R_{2j,1}} = \frac{E_{sat}}{E_{6-j}} - \frac{1 + (-1)^j}{2} \quad (j=1,2,3,4,5) \quad (5.2)$$

$$G_5 = -\frac{1}{R_3} \left(\frac{R_{02}}{R_{01}} \right) \quad (5.3)$$

$$G_{5-j} = G_{6-j} + \frac{(-1)^j}{R_3} \left[\frac{1 + (-1)^j}{2} + r_{2j} \right] \left(\frac{1}{1 + r_{2j+1}} \right) \quad (5.4)$$

$$r_0 = \frac{R_{02}}{R_{01}} = -R_3 G_8 \quad (5.5)$$

$$r_{2j+1} = \frac{R_{2j+1,2}}{R_{2j+1,1}} = \frac{(-1)^j \left[\frac{1 + (-1)^j}{2} + r_{2j} \right]}{R_3 (G_{4-j} - G_{5-j})} \quad (5.6)$$

จากสมการที่ (5.1) – (5.6) จะได้ค่าความต้านทานในวงจรสร้างการม้วนอลวนได้ดังนี้

$$r_{2j} = [r_0 \ r_2 \ r_4 \ r_6 \ r_8 \ r_{10}]$$

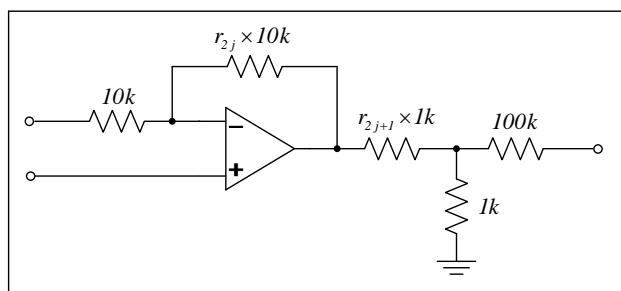
$$= [0.6400 \ 8.4736 \ 10.1016 \ 15.1516 \ 25.2966 \ 71.5000] \quad \Omega.$$

และ

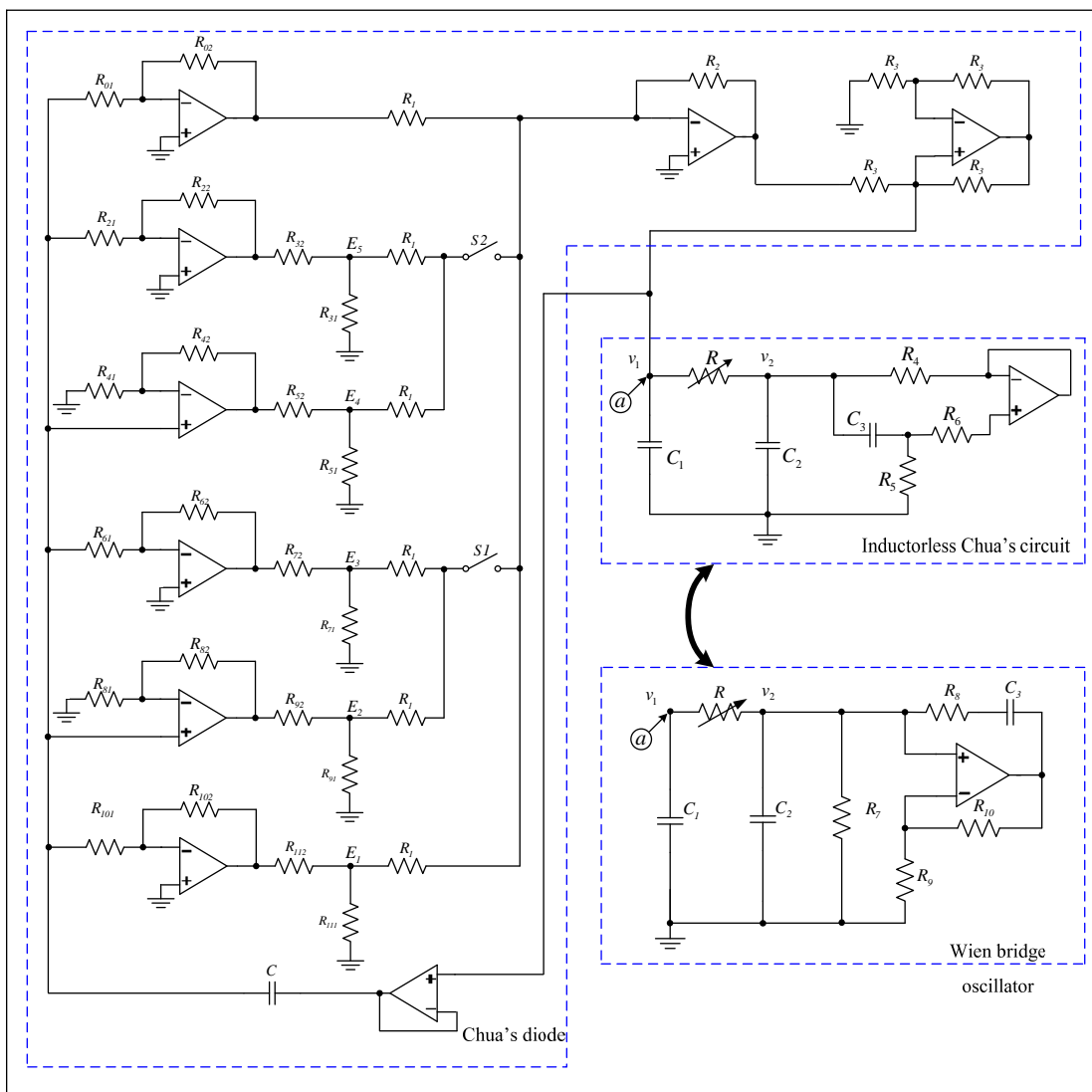
$$r_{2j+1} = [r_3 \ r_5 \ r_7 \ r_9 \ r_{11}]$$

$$= [6.9636 \ 9.4380 \ 13.2402 \ 23.7149 \ 66.1952] \quad \Omega.$$

เมื่อทราบค่าความต้านทาน r_{2j} และ r_{2j+1} แล้ว จึงนำไปสร้างเป็นวงจรโครงข่ายออปแอมป์ ซึ่งมีโครงสร้างหลักแสดงในรูปที่ 5.1 วงจรเต็มรูปเพื่อกำเนิการม้วนอลวนแบบคู่แสดงดังรูปที่ 5.2 โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรรวบรวมไว้ในตารางที่ 5.1 ทั้งนี้สังเกตพบว่า โครงข่ายของออปแอมป์มีการต่อแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟสสลับกัน หากคำนวณอัตราขยายของโครงข่ายออปแอมป์ตามรูปที่ 5.1 สำหรับค่าจุดพักแรงดันจาก $E_1 - E_5$ พบว่ามีค่าอัตราขยาย 71.5 26.3 15.1 11.1 และ 8.42 ตามลำดับ เมื่อคูณค่าแรงดัน $E_1 - E_5$ ด้วยอัตราขยายเหล่านี้ตามลำดับพบว่าผลคูณเท่ากับ 14.3 โวลต์ ซึ่งเป็นระดับอิมิตัวของเอาต์พุตของโครงข่ายพอดิ



รูปที่ 5.1 โครงข่ายออปแอมป์สำหรับกำเนิดการม้วนอลวน



รูปที่ 5.2 วงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่

จากวงจรในรูปที่ 5.2 แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ กรณีที่ใช้วงจรนิวแบบตัวเหนี่ยวนำเทียมและกรณีที่ใช้วงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแกนกำเนิดสภาวะอลวนซึ่งลักษณะการทำงานของทั้งสองกรณีจะคล้าย ๆ กันคือ เมื่อทำการปรับตั้งค่าความต้านทาน R ที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ของวงจรนิวหรือวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ โดยที่การเกิดการม้วนอลวนนั้นจะขึ้นอยู่กับ การเปิด-ปิดสวิตช์ S_1 และ S_2 ในวงจรด้วย นั่นคือแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีที่ 1 สวิตช์ S_1 และ S_2 เปิดวงจร จะทำให้วงจรตามรูปที่ 5.2 จะกำเนิดวงม้วนที่อลวนจำนวน 2 วงม้วน กรณีที่ 2 สวิตช์ S_1 ปิดวงจรและ S_2 เปิดวงจร และปรับเพิ่มค่าความต้านทาน R จะกำเนิดวงม้วนอลวนที่จำนวน 4 วงม้วน และกรณีที่ 3 สวิตช์ S_1 และ S_2 ปิดวงจร

และทำการปรับเพิ่มค่าความต้านทาน R จะกำเนิดวงม้วนอลวนที่จำนวน 6 วงม้วน ส่วนกรณีในทดสอบจากการเปิด-ปิดสวิตช์ S1 และ S2 ที่ไม่ทำให้เกิดวงม้วนอลวนได้คือ กรณีที่สวิตช์ S1 เปิด วงจรและ S2 ปิดวงจร ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากวงโคจร (orbit) ไม่สามารถไกลตัวไปตามระนาบในสนามเวกเตอร์ของแรงดันได้อย่างต่อเนื่อง พลวัตของวงจรจึงขาดตอน ตารางที่ 5.1 แสดงการเปิด-ปิดของสวิตช์ในวงจรที่สัมพันธ์กับจำนวนของวงม้วนอลวนที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.1 การเปิด-ปิดสวิตช์ในวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่

สวิตช์		จำนวนวงม้วนอลวน
S1	S2	
0	0	2
0	1	ไม่เกิดวงม้วนอลวน
1	0	4
1	1	6

ตารางที่ 5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่

ความต้านทาน (R)	ตัวเก็บประจุ (C)	ออปแอมป์
$R_1 = R_2 = 100k\Omega$	$C = 470\mu F$	LM741
$R_3 = 2k\Omega$	Chua's circuit	
$R_4 = 1\Omega$	$C_1 = 5.05nF$	
$R_5 = 980k\Omega$	$C_2 = 47.9nF$	
$R_6 = 10k\Omega$	$C_3 = 0.01\mu F$	
$R_7 = R_8 = R_9 = 100\Omega$	Wien bridge oscillator	
$R = 1.65k\Omega$	$C_1 = 300pF$	
$R_{01} = R_{21} = R_{41} = R_{61} = R_{81} = R_{101} = 10k\Omega$	$C_2 = 47nF$	
$R_{02} = 6.4k\Omega$		
$R_{22} = 84.7k\Omega$		
$R_{42} = 101.1k\Omega$		
$R_{62} = 151.5k\Omega$		
$R_{82} = 253k\Omega$		
$R_{102} = 715k\Omega$		

ตารางที่ 5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่ (ต่อ)

ความต้านทาน (R)	ตัวเก็บประจุ (C)	ออปแอมป์
$R_{32} = 6.96k\Omega$		
$R_{52} = 9.43k\Omega$		
$R_{72} = 13.24k\Omega$		
$R_{92} = 23.7k\Omega$		
$R_{112} = 66.2k\Omega$		
$R_{31} = R_{51} = R_{71} = R_{91} = R_{111} = 1k\Omega$		

5.2.2 วงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่

การออกแบบเพื่อที่จะหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรม้วนอลวนจะมีหลักการคล้ายกับการออกแบบวงจรสร้างการม้วนอลวนที่มีจำนวนคู่ ซึ่งสามารถที่จะใช้สมการชุดเดียวกันในการคำนวณหาจุดพักแรงดันไฟฟ้าและค่าอุปกรณ์ในวงจร โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการคำนวณค่าในการสร้างวงม้วนแบบคู่สูงสุดที่ 7 วงม้วน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กำหนดให้แรงดันเริ่มต้น $E_1 = 0.2V$ ค่าความนำไฟฟ้า G จากสมการ $1/R$ ซึ่งจะมีเท่ากับ $0.6061S$ และกำหนดค่าความนำไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ที่ $G_0 = G_2 = G_4 = G_6 = -3.2mS$ และ $G_1 = G_3 = G_5 = -0.852mS$ การกำหนดค่าพารามิเตอร์นี้สามารถที่จะกำเนิดการม้วนอลวนสูงสุดได้ที่ 7 วงม้วน นั่นคือแสดงได้ที่ 3 5 และ 7 วงม้วน ตามลำดับ โดยมีวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบนิ้วและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นวงจรแกนกำเนิดสัญญาณอลวน การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$E_{i+1} = \frac{2 \sum_{j=1}^i (G_j - G_{j-1}) E_j}{(G - G_i)} - E_i \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (5.7)$$

จากสมการที่ (5.7) เป็นการหาค่าจุดพักแรงดันของวงจรสร้างการม้วนอลวนที่จำนวน 7 วงม้วน ซึ่งจะได้ค่าแรงดันที่จุดพักแรงดันดังนี้

$$\begin{aligned} E_i &= [E_1 \ E_2 \ E_3 \ E_4 \ E_5 \ E_6] \\ &= [0.2000 \ 0.6654 \ 1.0654 \ 1.5308 \ 1.9308 \ 2.3962] \text{ V.} \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ของวงจรสร้างการม้วนอลวน สามารถที่นำไปหาค่าความต้านทานในวงจรสร้างการม้วนอลวนได้ดังนี้

$$r_{2j} = \frac{R_{2j,2}}{R_{2j,1}} = \frac{E_{sat}}{E_{7-j}} - \frac{1+(-1)^j}{2} \quad (j=1,2,3,4,5,6) \quad (5.8)$$

$$G_6 = -\frac{1}{R_3} \left(\frac{R_{02}}{R_{01}} \right) \quad (5.9)$$

$$G_{6-j} = G_{7-j} + \frac{(-1)^j}{R_3} \left[\frac{1+(-1)^j}{2} + r_{2j} \right] \left(\frac{1}{1+r_{2j+1}} \right) \quad (5.10)$$

$$r_0 = \frac{R_{02}}{R_{01}} = -R_3 G_6 \quad (5.11)$$

$$r_{2j+1} = \frac{R_{2j+1,2}}{R_{2j+1,1}} = \frac{(-1)^j \left[\frac{1+(-1)^j}{2} + r_{2j} \right]}{R_3 (G_{6-j} - G_{7-j})} \quad (5.12)$$

จากสมการที่ (5.7) – (5.12) จะได้ค่าความต้านทานในวงจรสร้างการม้วนอลวนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} r_{2j} &= [r_0 \quad r_2 \quad r_4 \quad r_6 \quad r_8 \quad r_{10} \quad r_{12}] \\ &= [0.6400 \quad 5.9678 \quad 6.4063 \quad 9.3416 \quad 12.4223 \quad 21.4911 \quad 70.5000] \quad \Omega. \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} r_{2j+1} &= [r_3 \quad r_5 \quad r_7 \quad r_9 \quad r_{11} \quad r_{13}] \\ &= [3.1207 \quad 5.9608 \quad 7.7797 \quad 11.6149 \quad 19.1984 \quad 66.1992] \quad \Omega. \end{aligned}$$

เมื่อทราบค่าความต้านทาน r_{2j} และ r_{2j+1} แล้ว จึงนำไปสร้างเป็นวงจรโครงข่ายออปแอมป์ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรแสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 การเปิด-ปิดสวิตช์ในวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคี่

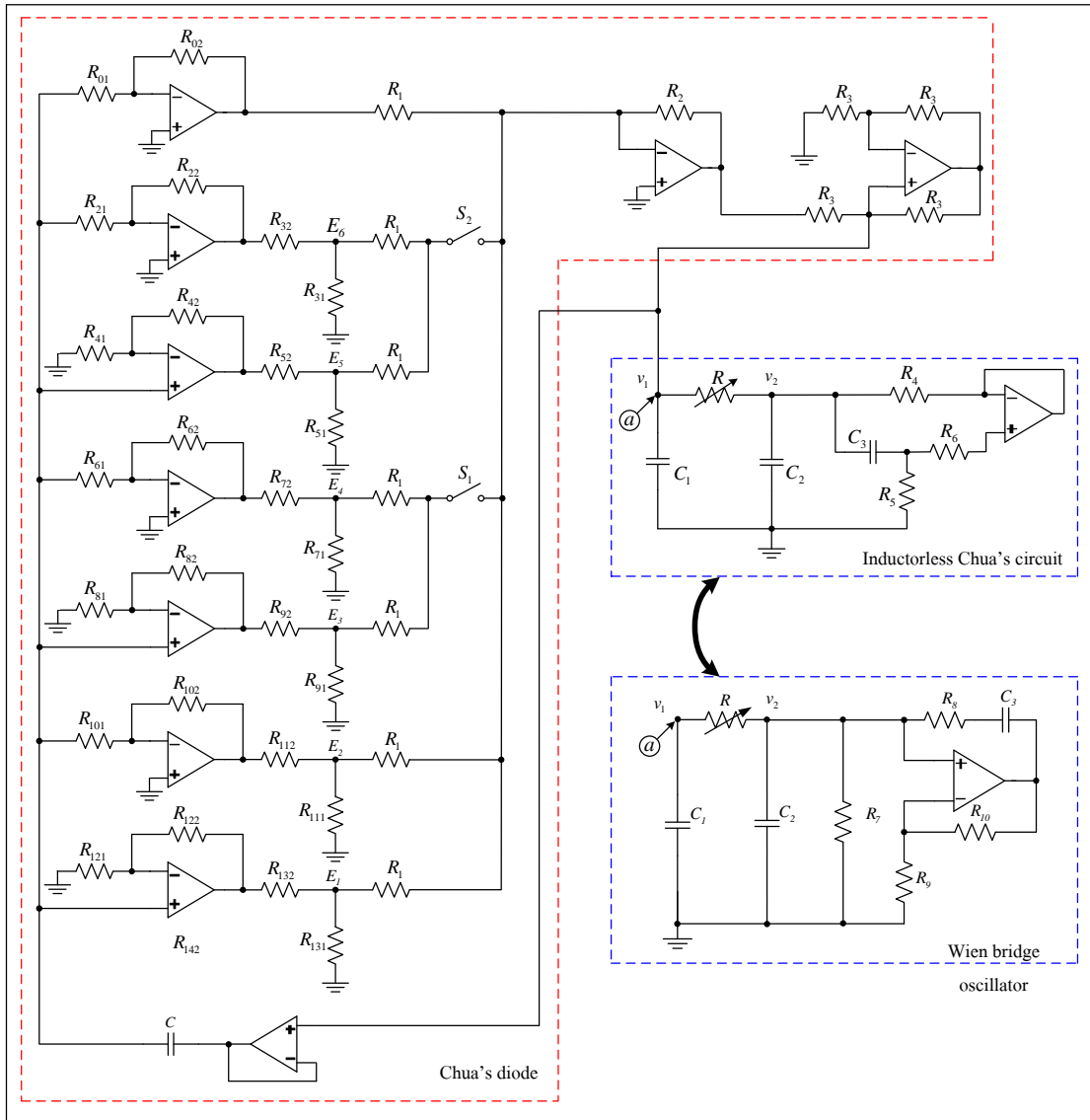
สวิตช์		จำนวนวงม้วนอลวน
S1	S2	
0	0	3
0	1	ไม่เกิดวงม้วนอลวน
1	0	5
1	1	7

ตารางที่ 5.4 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคี่

ความต้านทาน (R)	ตัวเก็บประจุ (C)	ออปแอมป์
$R_1 = R_2 = 100k\Omega$	$C = 470\mu F$	LM741
$R_3 = 2k\Omega$	Chua's circuit	
$R_4 = 1\Omega$	$C_1 = 5.05nF$	
$R_5 = 980k\Omega$	$C_2 = 47.9nF$	
$R_6 = 10k\Omega$	$C_3 = 0.01\mu F$	
$R_7 = R_8 = R_9 = 100\Omega$	Wien bridge oscillator	
$R = 1.65k\Omega$	$C_1 = 300pF$	
$R_{01} = R_{21} = R_{41} = \dots = R_{121} = 10k\Omega$	$C_2 = 47nF$	
$R_{02} = 6.4k\Omega$		
$R_{22} = 59.7k\Omega$		
$R_{42} = 64.1k\Omega$		
$R_{62} = 93.4k\Omega$		
$R_{82} = 124.3k\Omega$		
$R_{102} = 215k\Omega$		
$R_{122} = 705k\Omega$		
$R_{32} = 4.6k\Omega$		
$R_{52} = 6k\Omega$		
$R_{72} = 7.8k\Omega$		
$R_{92} = 11.6k\Omega$		
$R_{112} = 19.2k\Omega$		

ตารางที่ 5.4 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคี่ (ต่อ)

ความต้านทาน (R)	ตัวเก็บประจุ (C)	ออปแอมป์
$R_{132} = 66.2k\Omega$		
$R_{31} = R_{51} = R_{71} = \dots = R_{131} = 1k\Omega$		



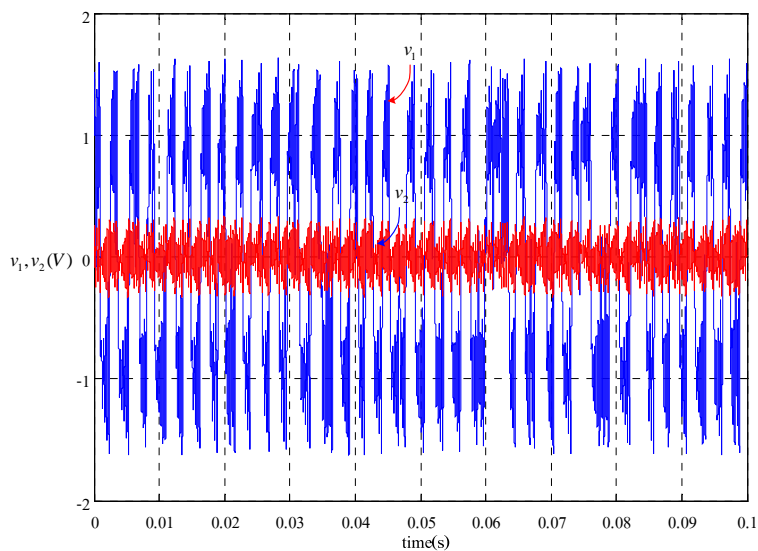
รูปที่ 5.3 วงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคี่

วงจรตามรูปที่ 5.3 เป็นวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคี่ที่สามารถกำเนิดการม้วนสูงสุดที่จำนวน 7 วงม้วน สังเกตพบว่าโครงข่ายของออปแอมป์มีการต่อแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟสสลับกัน หากคำนวณอัตราขยายของโครงข่ายออปแอมป์ตามรูปที่ 5.1 สำหรับค่าจุดพักแรงดันจาก $E_1 - E_6$ พบว่ามีค่าอัตราขยาย 70.5 21.5 13.43 9.34 7.41 และ 5.97 ตามลำดับ เมื่อคูณค่าแรงดัน $E_1 - E_6$ ด้วยอัตราขยายเหล่านี้ตามลำดับพบว่าผลคูณเท่ากับ 14.3 โวลต์ ซึ่งเป็นระดับอิมพัลส์ของเอาต์พุตของโครงข่ายพอดิ โดยมีวงจรแกนกำเนิดการม้วนอลวน 2 แบบคือ วงจรแบบนิ้วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเทียม และวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ซึ่งวงจรแกนกำเนิดสัญญาณอลวนนี้สามารถที่จะควบคุมการเกิดการม้วนอลวนภายใต้วงจรสร้างการม้วนอลวนเดียวกัน โดยการปรับความต้านทาน R ที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ของวงจรนิ้วหรือวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ซึ่งรูปแบบการม้วนอลวนของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนทั้งสองแบบนี้มีวงม้วนเกิดขึ้นเพียงสองวงม้วนเท่านั้น และเมื่อนำมารวมเป็นโครงสร้างของวงจรกำเนิดวงม้วนอลวนจะมีการกำเนิดวงม้วนเป็น 3 วงม้วน ซึ่งในการควบคุมการเกิดการม้วนอลวนจากวงจรสามารถที่จะกำหนดการเปิด-ปิดสวิทช์ $S1$ และ $S2$ ในวงจร โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีที่ 1 สวิทช์ $S1$ และ $S2$ เปิดวงจร จะทำให้วงจรตามรูปที่ 5.3 ให้กำเนิดวงม้วนอลวนจำนวน 3 วงม้วน กรณีที่ 2 สวิทช์ $S1$ ปิดวงจรและ $S2$ เปิดวงจร และปรับเพิ่มค่าความต้านทาน R จะกำเนิดวงม้วนอลวนจำนวน 5 วงม้วน และกรณีที่ 3 สวิทช์ $S1$ และ $S2$ ปิดวงจรและทำการปรับเพิ่มค่าความต้านทาน R จะกำเนิดวงม้วนอลวนจำนวน 7 วงม้วน ส่วนกรณีในทดสอบจากการเปิด-ปิดสวิทช์ $S1$ และ $S2$ ที่ไม่ทำให้เกิดวงม้วนอลวนได้คือ กรณีที่สวิทช์ $S1$ เปิดวงจรและ $S2$ ปิดวงจร ดังแสดงการเปิด-ปิดของสวิทช์ในวงจรตามตารางที่ 5.3 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากวงโคจรไม่สามารถไหลตัวไปตามระนาบในสนามเวกเตอร์ของแรงดันได้อย่างต่อเนื่อง พลวัตของวงจรจึงขาดตอนคล้ายกันกับการเกิดการม้วนอลวนแบบคู่

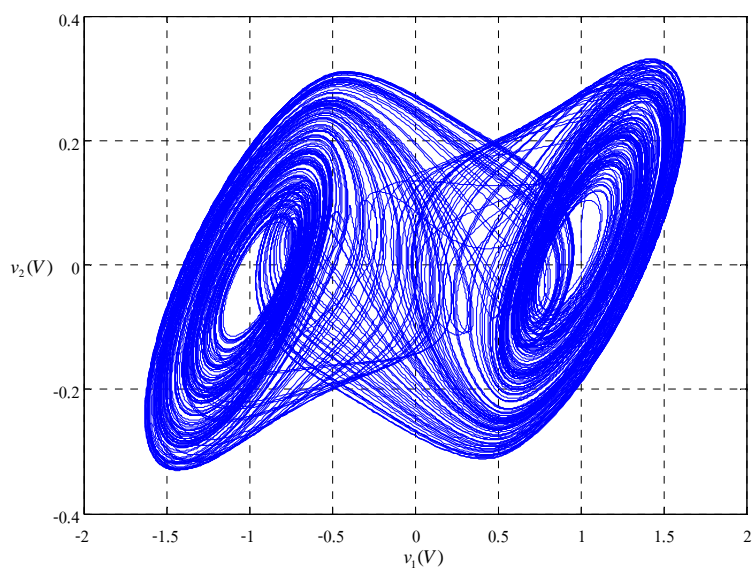
5.3 การจำลองสถานการณ์วงจรกำเนิดการม้วนอลวน

ในการจำลองผลของวงจรกำเนิดการม้วนอลวนแบบคู่และแบบคี่ตามวงจรในรูปที่ 5.2 และ 5.3 โดยโปรแกรม PSIM นั้น จะอาศัยการกำหนดค่าเริ่มต้นจากโปรแกรมโดยพิจารณาค่าแรงดันอินพุตของวงจร ซึ่งการจำลองสถานการณ์นี้จะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นในตัวโปรแกรมโดยการกำหนดแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ตัวเก็บประจุ C_1 ที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าเป็น 1 โวลต์ ให้กับวงจรทั้ง 2 กรณี ทั้งกรณีวงจรกำเนิดการม้วนอลวนที่มีวงจรแบบนิ้วและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแกนกำเนิดสัญญาณอลวน โดยในการทดสอบจะทำการเปิด-ปิดสวิทช์ $S1$ และ $S2$ ตามตารางที่ 5.1 และ 5.3 แล้วทำการปรับค่าความต้านทาน R ให้เหมาะสมที่สามารถแสดงเป็นวงม้วนที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งค่าความต้านทานที่ปรับตั้งจะกำเนิดการม้วนอลวนได้ดังต่อไปนี้

5.3.1 กรณีวงจรหัวเป็นแกนกำเนิดการม้วนอลวน

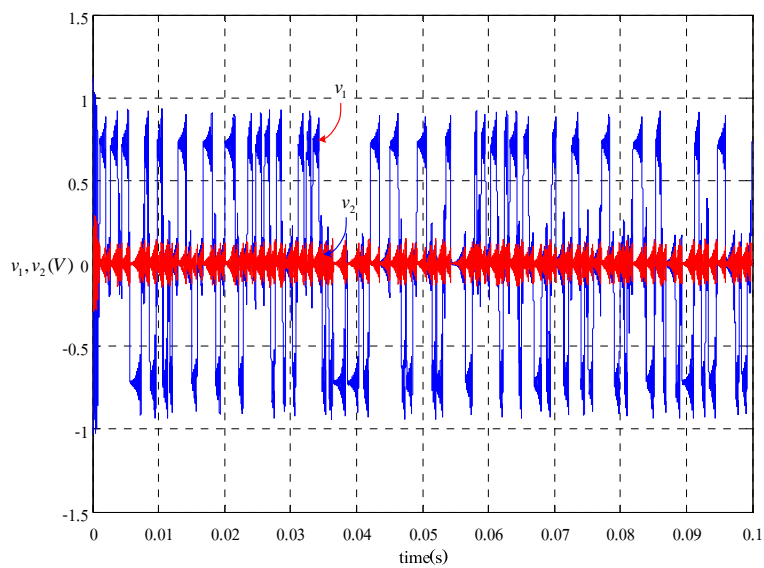


ก) ผลการจำลองวงจรแบบหัวในโดเมนเวลา

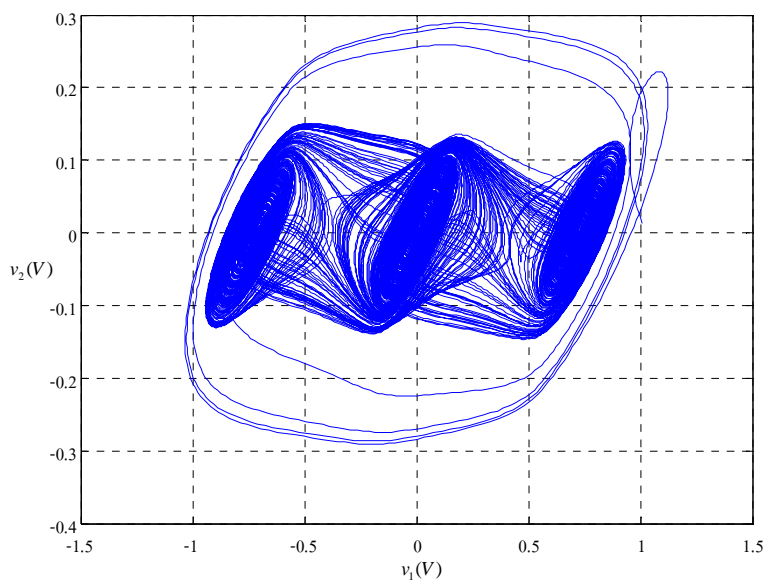


ข) ผลการจำลองวงจรแบบหัวในปริภูมิสเตต

รูปที่ 5.4 ผลจำลองการเกิด 2 วงม้วน กรณีวงจรหัวเป็นแกนกำเนิดการม้วน
ที่ความต้านทาน $R=1600\Omega$

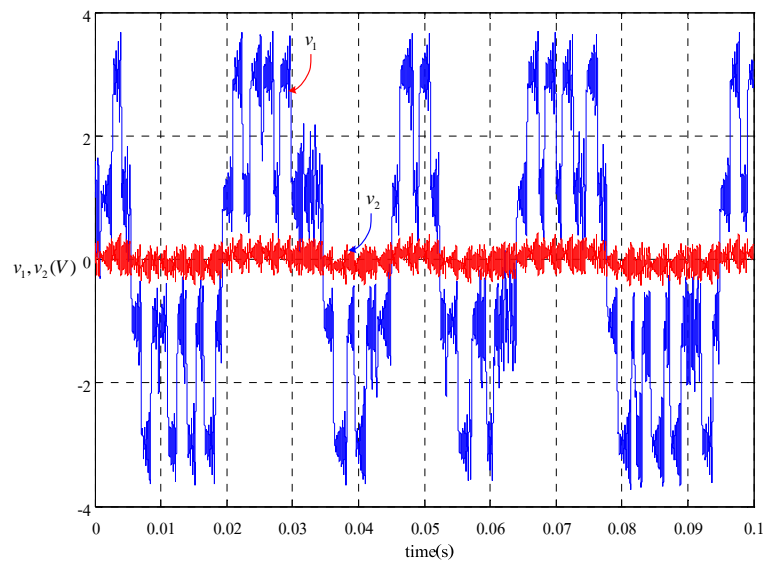


ก) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินาทีในโดเมนเวลา

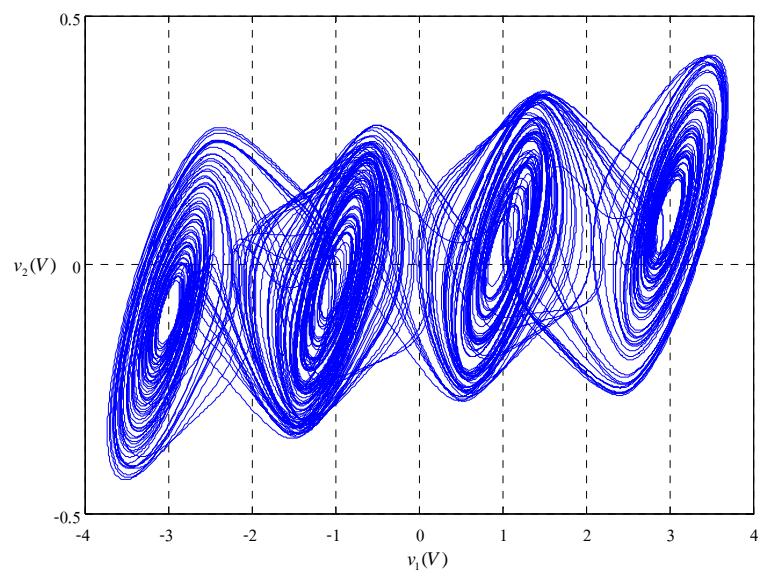


ข) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินาทีในปริภูมิสเตต

รูปที่ 5.5 ผลจำลองการเกิด 3 วงม้วน กรณีวงจรชั่วเป็นแกนกำเนิดการม้วน
ที่ความต้านทาน $R=1650\Omega$

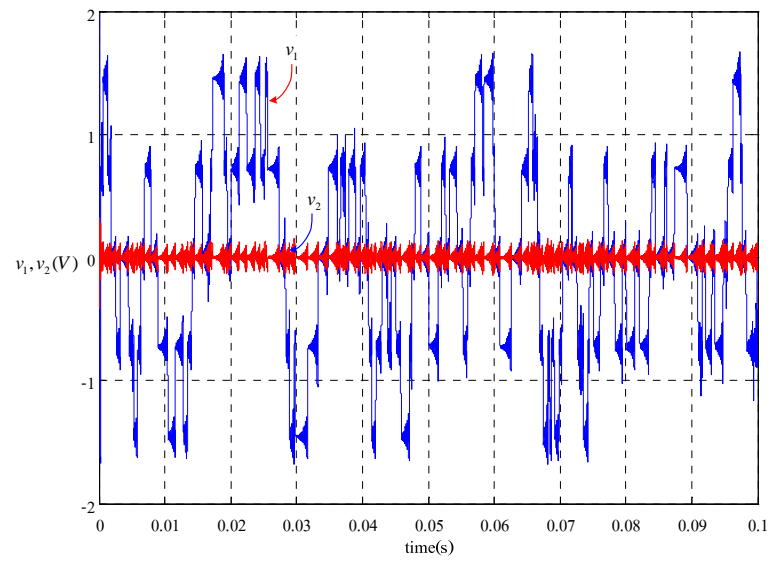


ก) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินาทีในโดเมนเวลา

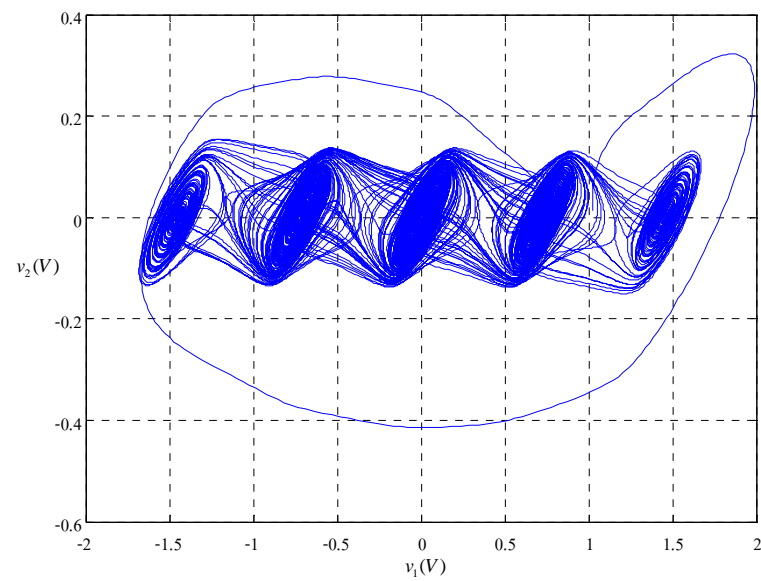


ข) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินาทีในปริภูมิสเตต

รูปที่ 5.6 ผลจำลองการเกิด 4 วงม้วน กรณีวงจรชั่วเป็นแกนกำเนิดการม้วน
ที่ความต้านทาน $R=1640\Omega$

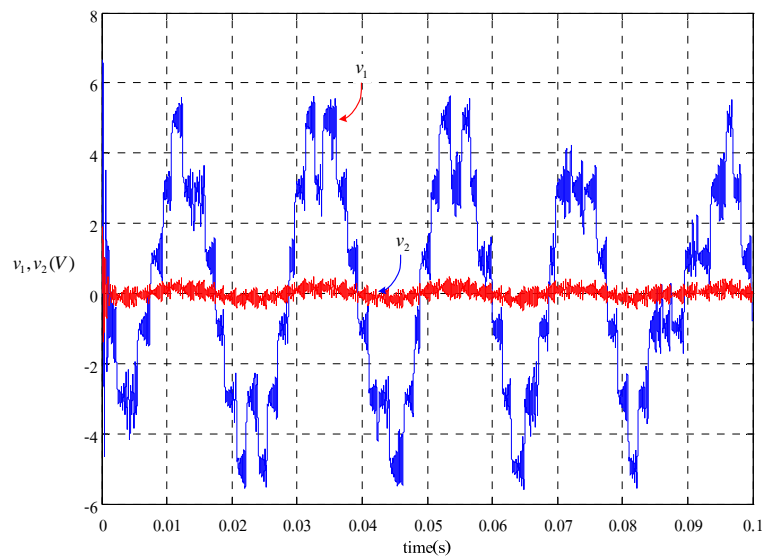


ก) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินาทีในโดเมนเวลา

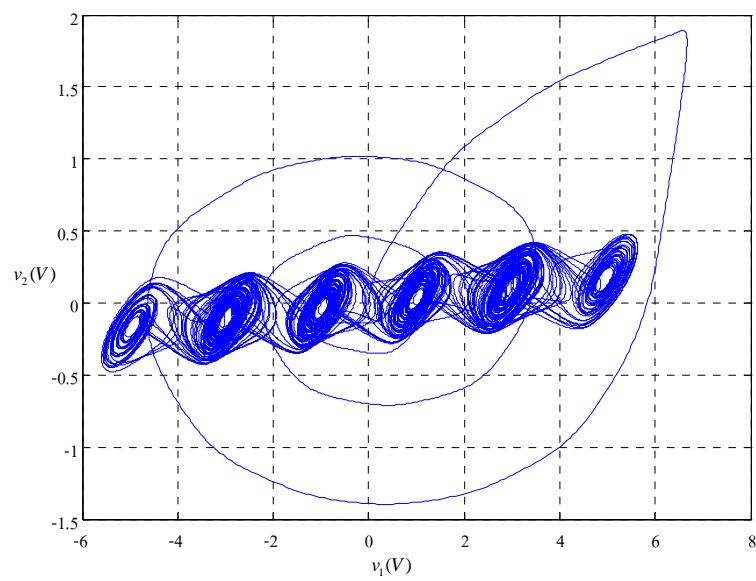


ข) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินาทีในปริภูมิสเตต

รูปที่ 5.7 ผลจำลองการเกิด 5 วงม้วน กรณีวงจรชั่วเป็นแกนกำเนิดการม้วน
ที่ความต้านทาน $R=1660\Omega$

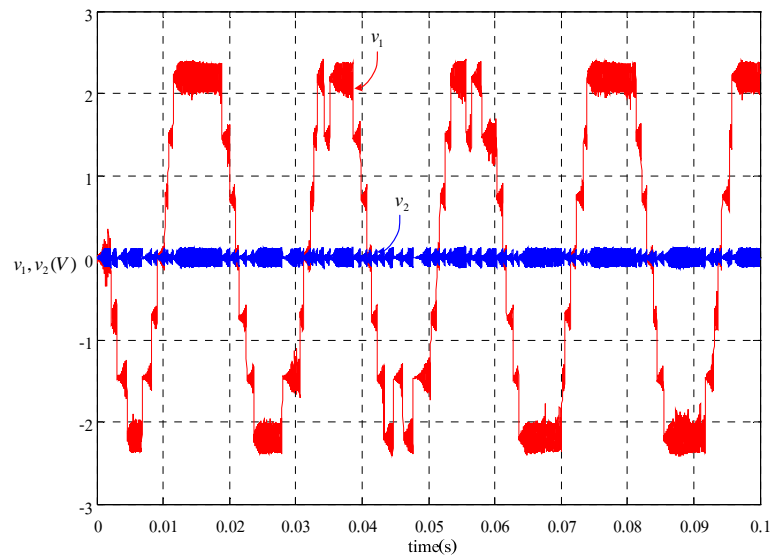


ก) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินโดเมนเวลา

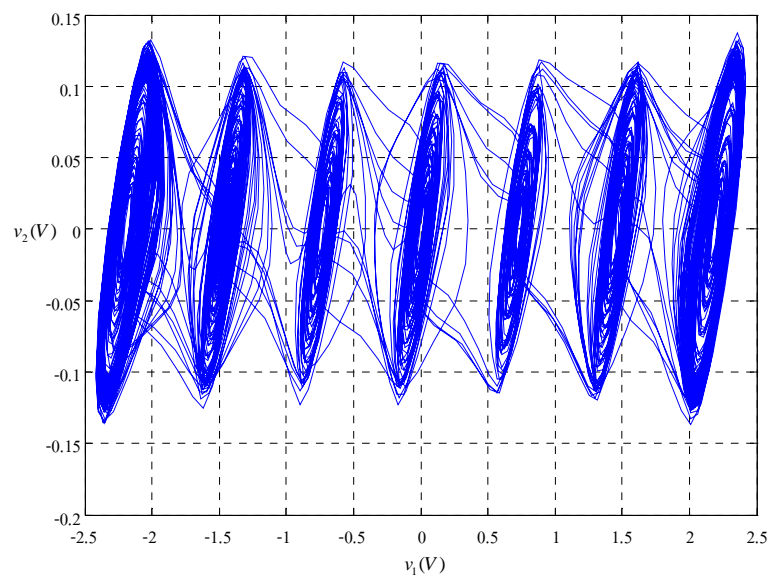


ข) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินโดเมนเฟส

รูปที่ 5.8 ผลจำลองการเกิด 6 วงม้วน กรณีวงจรลั่วเป็นแกนกำเนิดการม้วน
ที่ความต้านทาน $R=1650\Omega$



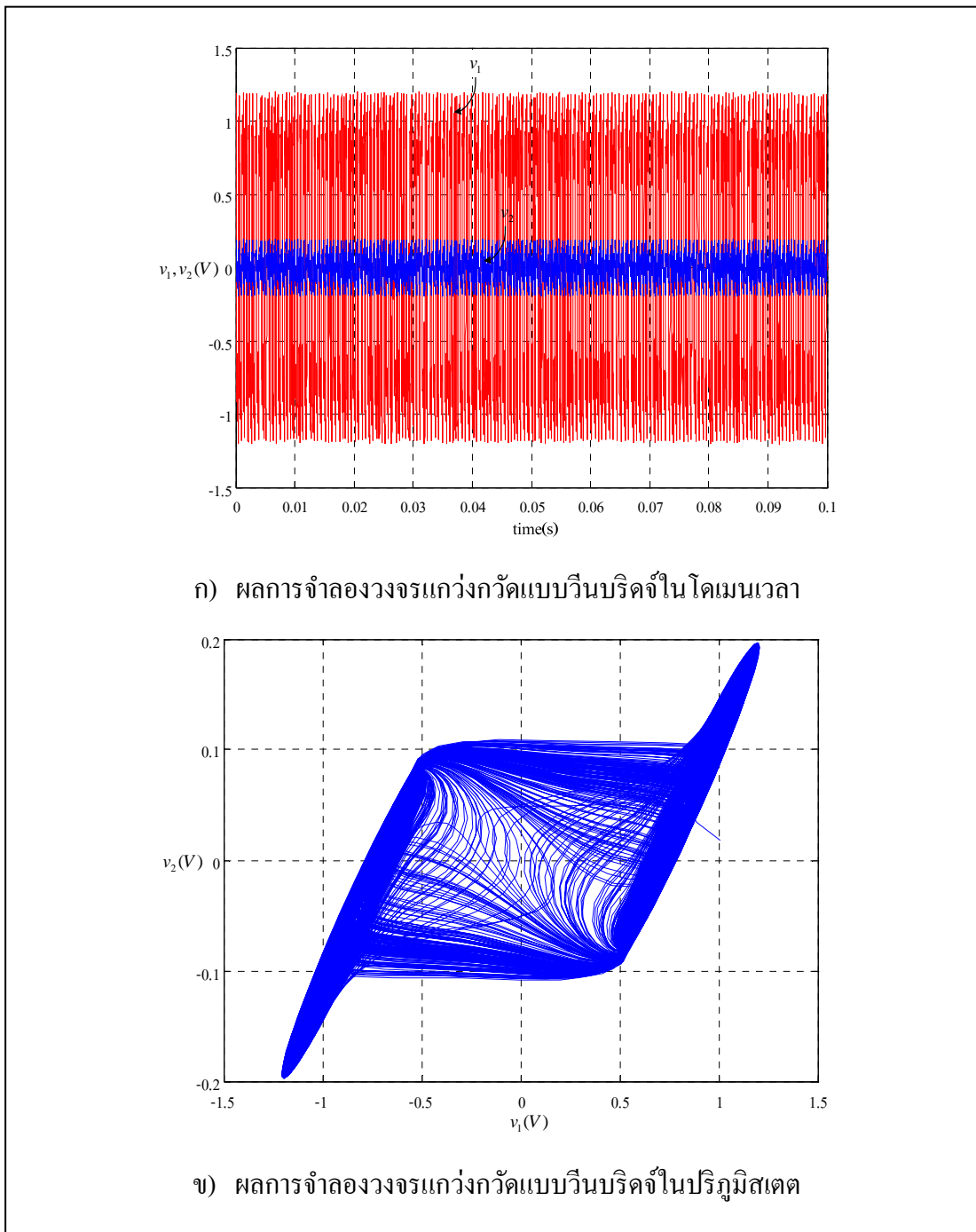
ก) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินาทีในโดเมนเวลา



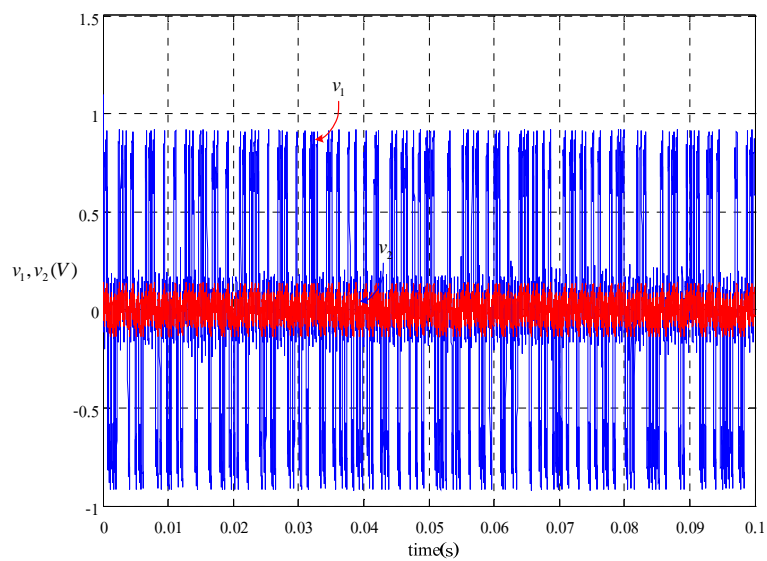
ข) ผลการจำลองวงจรแบบชั่ววินาทีในปริภูมิสเตต

รูปที่ 5.9 ผลจำลองการเกิด 7 วงม้วน กรณีวงจรชั่วเป็นแกนกำเนิดการม้วน
ที่ความต้านทาน $R=1655\Omega$

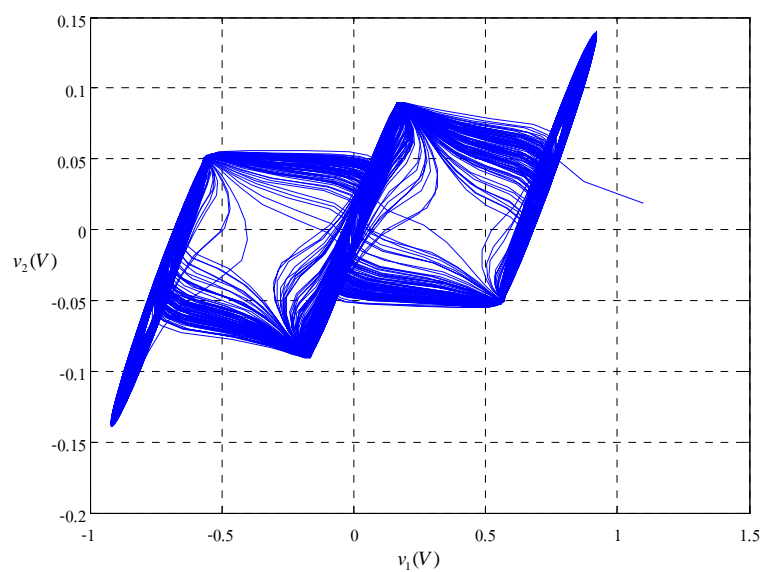
5.3.2 กรณีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแกนกำเนิดการม้วนอลวน



รูปที่ 5.10 ผลจำลองการเกิด 2 ม้วน กรณีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ เป็นแกนกำเนิดการม้วนที่ความต้านทาน $R=1500\Omega$

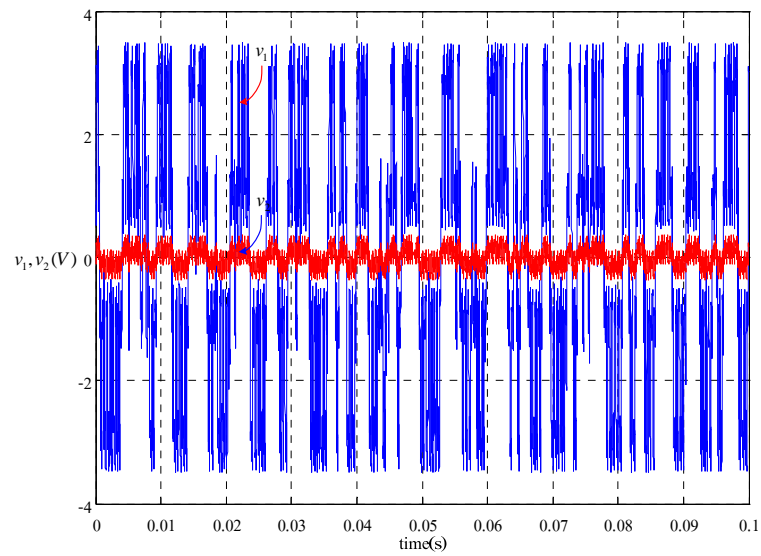


ก) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ในโดเมนเวลา

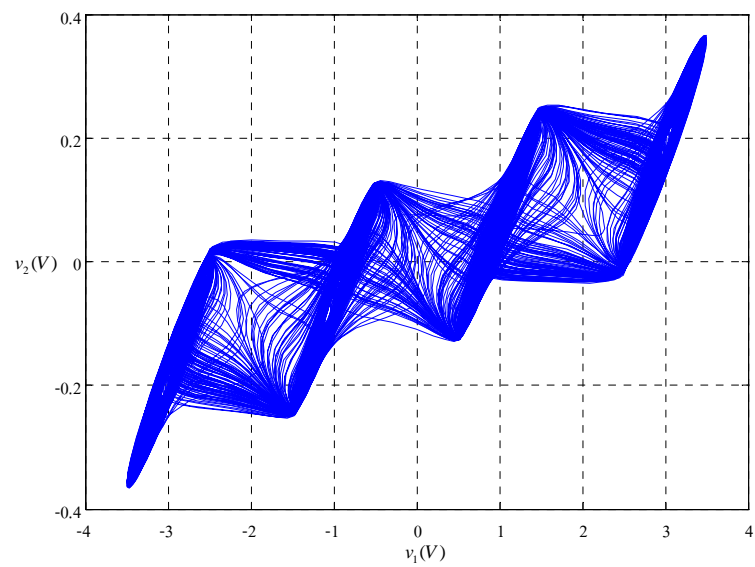


ข) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ในปริภูมิสเตต

รูปที่ 5.11 ผลจำลองการเกิด 3 วงม้วน กรณีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์
เป็นแกนกำเนิดการม้วนที่ความต้านทาน $R=1550\Omega$

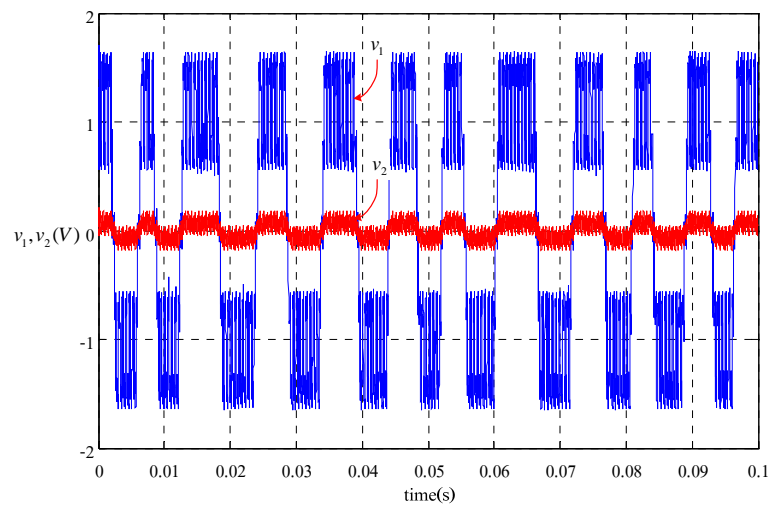


ก) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ใน โดเมนเวลา

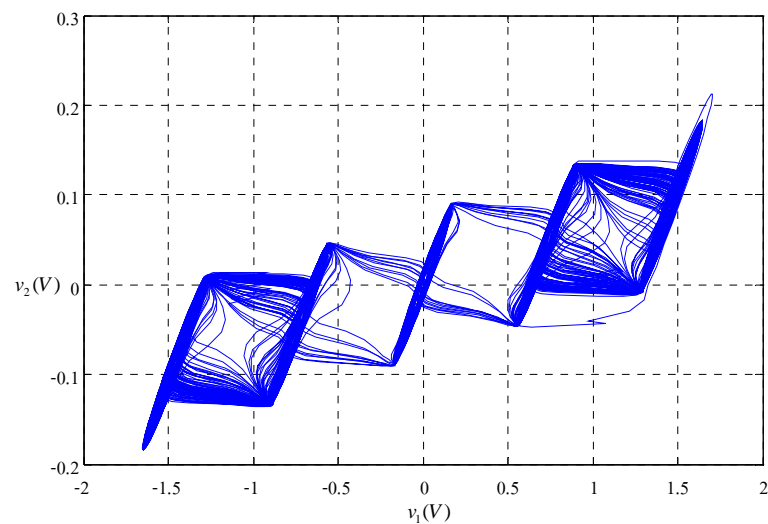


ข) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ในปริภูมิสเตต

รูปที่ 5.12 ผลจำลองการเกิด 4 วงม้วน กรณีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์
เป็นแกนกำเนิดการม้วนที่ความต้านทาน $R=1565\Omega$

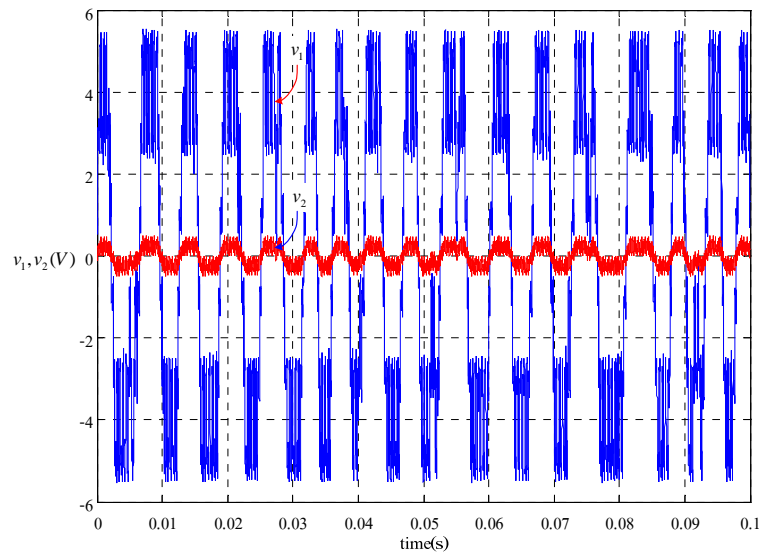


ก) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ใน โดเมนเวลา

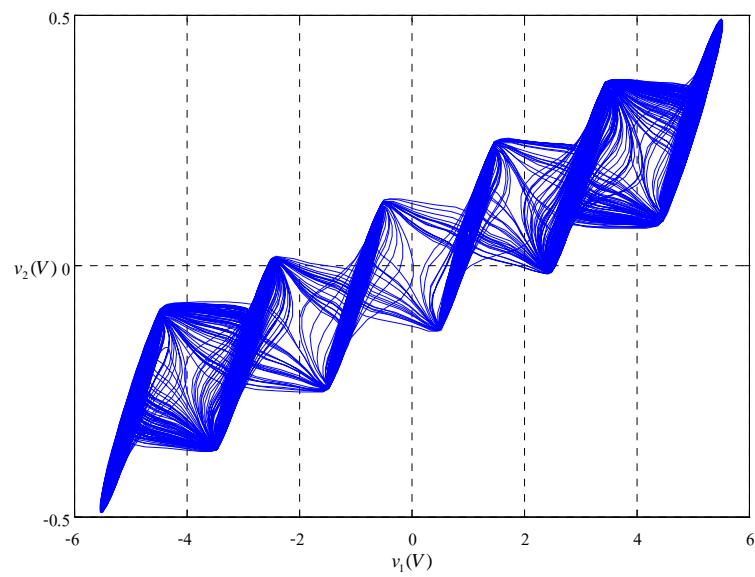


ข) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ในปริภูมิสเตต

รูปที่ 5.13 ผลจำลองการเกิด 5 วงม้วน กรณีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์
เป็นแกนกำเนิดการม้วนที่ความต้านทาน $R=1570\Omega$

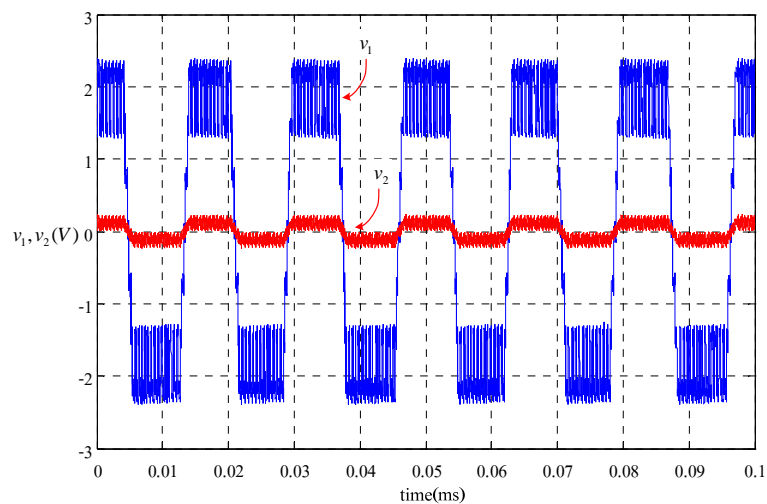


ก) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ใน โดเมนเวลา

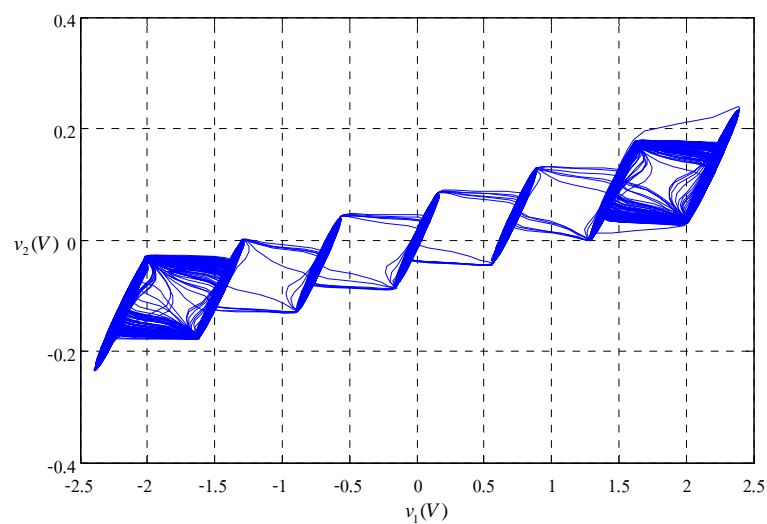


ข) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ในปริภูมิสเตต

รูปที่ 5.14 ผลจำลองการเกิด 6 วงม้วน กรณีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์
เป็นแกนกำเนิดการม้วนที่ความต้านทาน $R=1600\Omega$



ก) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ใน โดเมนเวลา



ข) ผลการจำลองวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ในปริภูมิสเตต

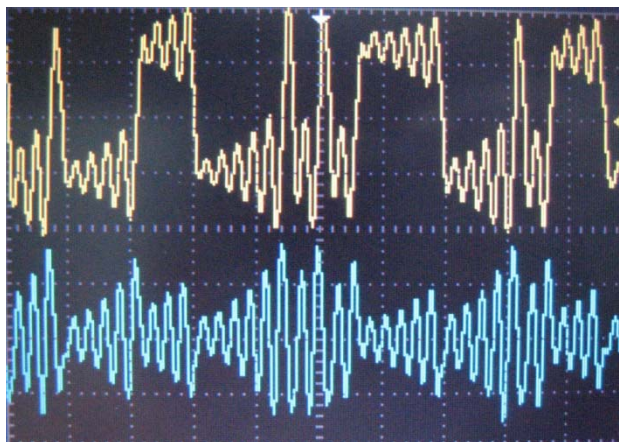
รูปที่ 5.15 ผลจำลองการเกิด 7 วงม้วน กรณีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์
เป็นแกนกำเนิดการม้วนที่ความต้านทาน $R=1555\Omega$

จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม PSIM นั้น จะเห็นได้ว่ามีความง่ายต่อการปรับตั้งค่าต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองจะออกมาในรูปแบบของโดเมนเวลาสามารถที่จะคาดเดาได้ว่าสภาวะขณะนั้นเกิดการม้วนอลวนขึ้นหรือไม่

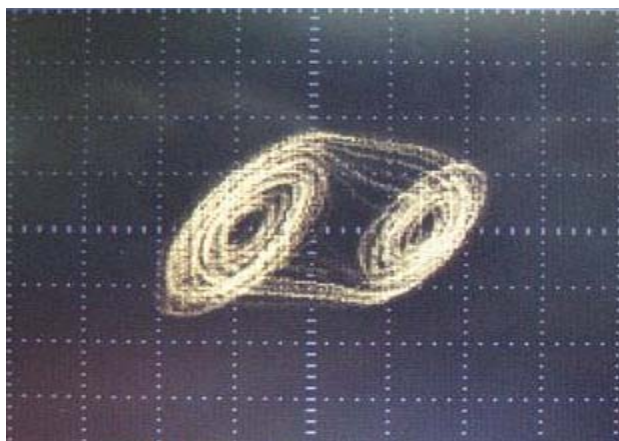
5.4 การทดสอบและอภิปรายผล

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบวงจรสร้างการม้วนอลวนที่มีวงจรแกนกำเนิดสัญญาณอลวน 2 แบบคือ วงจรแบบ斬ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ซึ่งทำการทดสอบ 2 ลักษณะได้แก่ การเกิดการม้วนที่มีจำนวนวงม้วนคู่และจำนวนวงม้วนคี่ โดยทำการทดสอบที่ 2 3 4 และ 5 วงม้วน จากวงจรแกนกำเนิดสัญญาณอลวนทั้งสองแบบ ทั้งนี้การดำเนินการทดสอบวงจรม้วนจะต้องมีการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นให้กับวงจร เนื่องจากเป็นวงจรที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการกำหนดแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นให้กับวงจรม้วนทำได้โดยการอัดประจุแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ที่ขนาดแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ โดยในการกำหนดแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นนี้จะอาศัยแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกคือ แบตเตอรี่ขนาดแรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์ ทั้งนี้ทุกครั้งที่ทำการทดสอบตามการเปิด-ปิดสวิตซ์ตามตารางที่ 5.1 และ 5.3 จะต้องทำการคายประจุ C_1 ทุกครั้ง แล้วทำการอัดประจุใหม่ทุกครั้ง เพื่อลดปัญหาเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ไม่เหมาะสม

วงจร斬ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนเป็นแกนกำเนิดสัญญาณอลวน ในการทดสอบวงจรม้วนนั้นเป็นการยืนยันผลที่เกิดขึ้นจริง โดยปรับตั้งออสซิลโลสโคปเพื่อทำการวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 โดย CH1 วัดที่ตัวเก็บประจุ C_1 และ CH2 วัดที่ตัวเก็บประจุ C_2 และใช้จุดกราวด์ร่วมจุดเดียวกัน ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

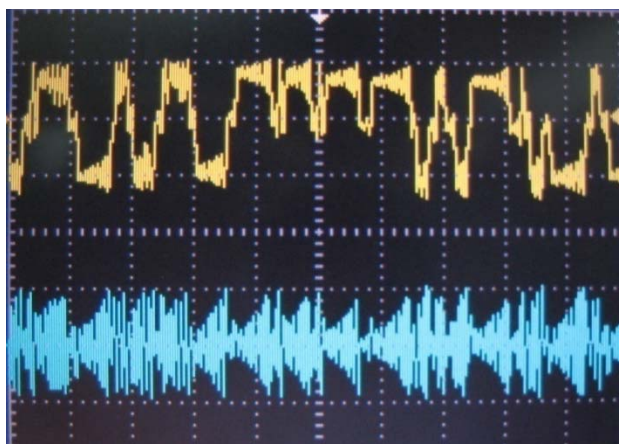


- ก) ผลการทดสอบวงจรนำคลื่นที่เกิด 2 วงม้วนในโดเมนเวลา แกนนอนคือ
 แกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดัน
 ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) ที่มาตราส่วน 5 V/div 2 V/div

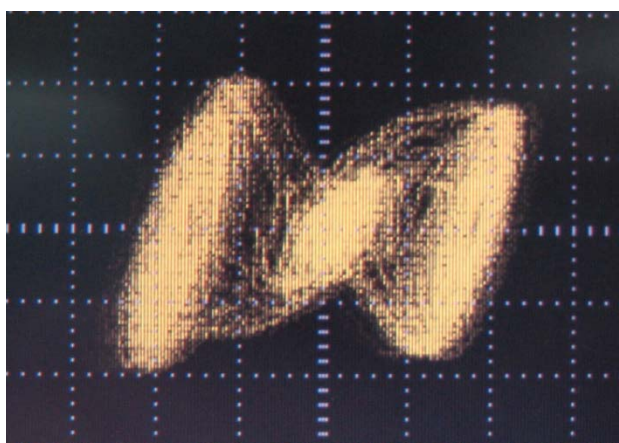


- ข) ผลการทดสอบวงจรนำคลื่นเกิด 2 วงม้วนในปริภูมิสเตต แกนนอนคือ
 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้งคือ
 ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div

รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบวงจรนำคลื่นเกิด 2 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1620\Omega$

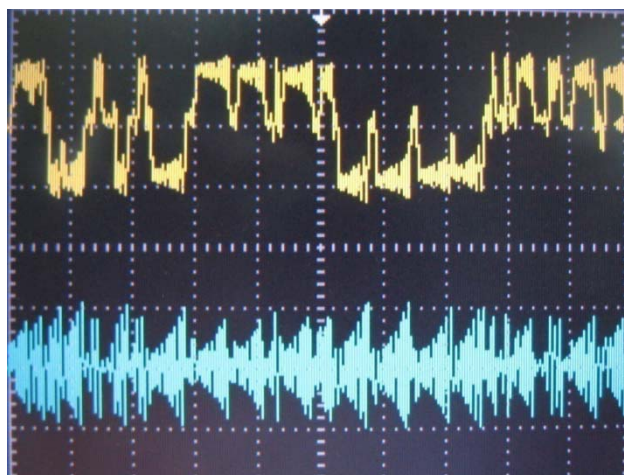


- ก) ผลการทดสอบวงจรชั่วครู่เกิด 3 วงม้วนในโดเมนเวลา แกนนอนคือ
แกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดัน
ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) ที่มาตราส่วน 5 V/div 2 V/div

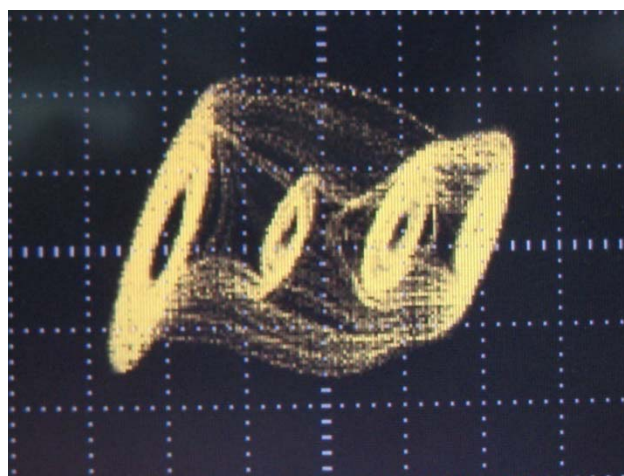


- ข) ผลการทดสอบวงจรชั่วครู่เกิด 3 วงม้วนในปริภูมิสเตต แกนนอนคือ
แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้งคือ
ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div

รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบวงจรชั่วครู่เกิด 3 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1645\Omega$

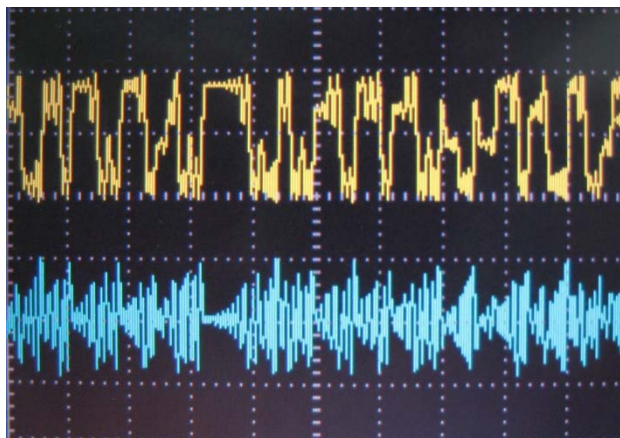


- ก) ผลการทดสอบวงจรชั่วกรณีเกิด 4 วงม้วนในโดเมนเวลา แกนนอนคือ
แกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดัน
ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) ที่มาตราส่วน 5 V/div 2 V/div

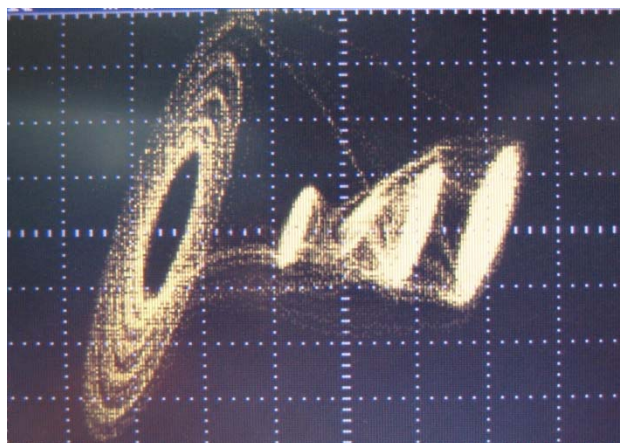


- ข) ผลการทดสอบวงจรชั่วกรณีเกิด 4 วงม้วนในปริภูมิสเตต แกนนอนคือ
แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้งคือ
ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div

รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบวงจรชั่วกรณีเกิด 4 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1640\Omega$



- ก) ผลการทดสอบวงจรชั่วกรณีเกิด 5 วงม้วนในโดเมนเวลา แกนนอนคือ
แกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดัน
ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) ที่มาตราส่วน 5 V/div 2 V/div



- ข) ผลการทดสอบวงจรชั่วกรณีเกิด 5 วงม้วนในปริภูมิสเตต แกนนอนคือ
แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้งคือ
ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div

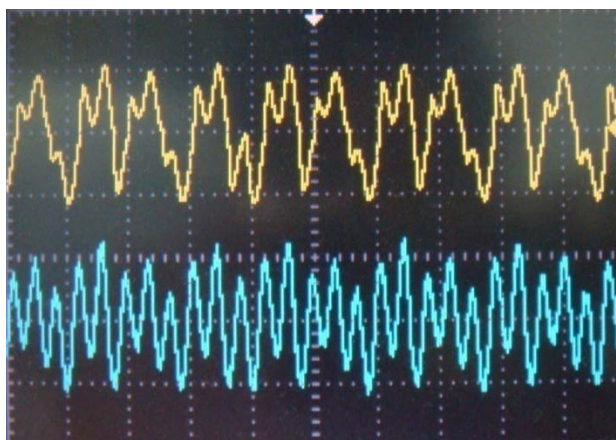
รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบวงจรชั่วกรณีเกิด 5 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1650\Omega$

จากการทดสอบวงจรสร้างการม้วนอลวนที่มีวงจรแบบลั่วเป็นแกนกำเนิดสัญญาณอลวนนั้น พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สามารถที่จะเกิดลักษณะการม้วนอลวนขึ้น การตรวจวัดสัญญาณจะต้องปรับตั้งออสซิลโลสโคปเพื่อให้สามารถจับสัญญาณที่มีความไวในการเปลี่ยนแปลงให้ได้ อีกทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานจะต้องมีคุณภาพดีและมีความละเอียดสูง จึงจะสามารถปรับจูนวงจรได้ง่าย

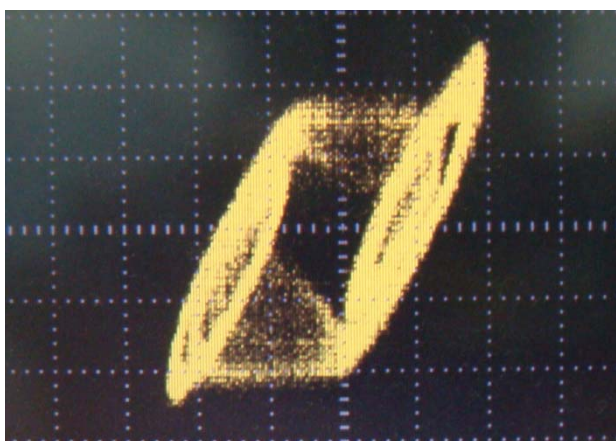
วงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแกนกำเนิดสัญญาณอลวนเช่นเดียวกันคือ ในการทดสอบวงจรนั้นเป็นการยืนยันผลที่เกิดขึ้นจริง โดยปรับตั้งออสซิลโลสโคปเพื่อทำการวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 โดย CH1 วัดที่ตัวเก็บประจุ C_1 และ CH2 วัดที่ตัวเก็บประจุ C_2 และใช้จุดคร่าววัดร่วมจุดเดียวกัน ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.20 ถึง 5.23

ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจากวงจรสร้างการม้วนอลวนที่มีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแกนกำเนิดสัญญาณอลวนสามารถที่จะควบคุมการเกิดการม้วนได้ง่ายกว่าแบบที่ใช้วงจรแบบลั่วเป็นแกนกำเนิดสัญญาณอลวน การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของวงจรกระทำได้ง่ายและวงจรเกิดพฤติกรรมลู่เข้าสู่การเกิดการม้วนอลวนได้เร็ว อีกทั้งโครงสร้างของวงจรก็ไม่ซับซ้อน

จากผลการทดสอบวงจรสร้างการม้วนอลวนจากวงจรแบบลั่วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์เป็นแกนกำเนิดสัญญาณอลวนนั้น เมื่อพิจารณาการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ซึ่งทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจร จะเห็นได้ว่าสามารถที่จะเริ่มต้นที่ขนาดแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ เป็นค่าที่เหมาะสมและสามารถปรับจูนค่าความต้านทานได้ง่าย และเมื่อทำการทดสอบโดยใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินกว่า 1 โวลต์ จะเป็นการยากที่จะควบคุมให้เกิดการม้วนอลวน พฤติกรรมการม้วนอลวนที่เกิดขึ้นนี้จะเริ่มต้นจากจุดเล็ก ๆ เท่านั้น โดยจะแสดงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่แสดงให้เห็นว่าเริ่มเกิดการม้วนอลวนขึ้นและจะปรากฏเป็นการม้วนอลวนที่สมบูรณ์เมื่อทำการปรับจูนค่าความต้านทานตามค่าที่แสดงในผลการทดสอบ ทั้งนี้ค่าความต้านทาน R ที่ทำการปรับจูนค่าเพื่อให้ลู่เข้าสู่การม้วนอลวนนั้นจะมีค่าที่ผิดพลาดไปจากค่าที่ใช้ในการจำลองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น มูลเหตุส่วนหนึ่งอาจจะมาจากความละเอียดในการปรับค่าของตัวต้านทานค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัด และผลที่อาจจะเกิดจากแผงวงจรที่ใช้การทดสอบด้วย

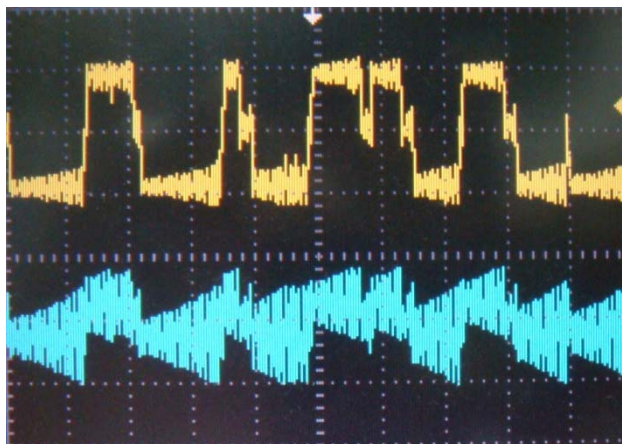


- ก) ผลการทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 2 วงม้วน ในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดัน ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) ที่มาตราส่วน 5 V/div, 2 V/div



- ข) ผลการทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 2 วงม้วน ในปริภูมิสเตต แกนนอนคือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้ง คือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div

รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 2 วงม้วน ที่ความต้านทาน $R=1445\Omega$

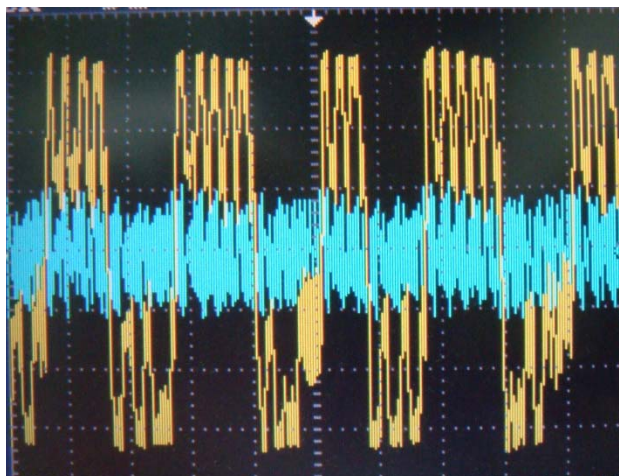


- ก) ผลการทดสอบวงจรวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 3 วงม้วน ในโดเมนเวลา
แกนนอนคือแกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดัน
ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) ที่มาตราส่วน 5 V/div 2 V/div

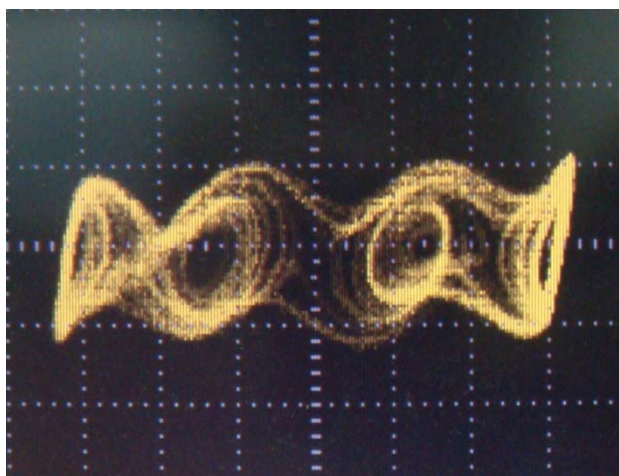


- ข) ผลการทดสอบวงจรวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 3 วงม้วนในปริภูมิสแตต
แกนนอนคือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้งคือ
ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div

รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบวงจรวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 3 วงม้วน
ที่ความต้านทาน $R = 1563\Omega$

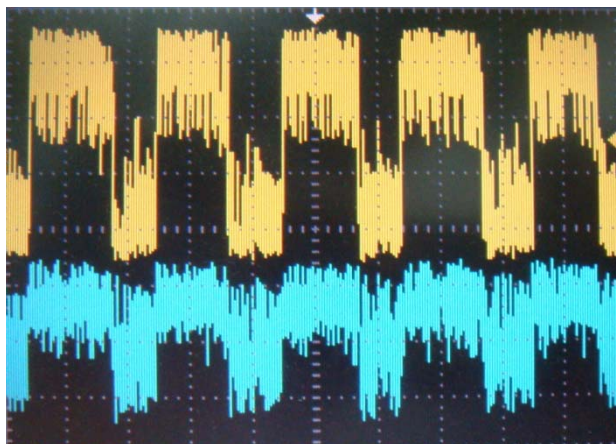


- ก) ผลการทดสอบวงจรวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 4 วงม้วน ในโดเมนเวลา
แกนนอนคือแกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดัน
ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) ที่มาตราส่วน 5 V/div 2 V/div

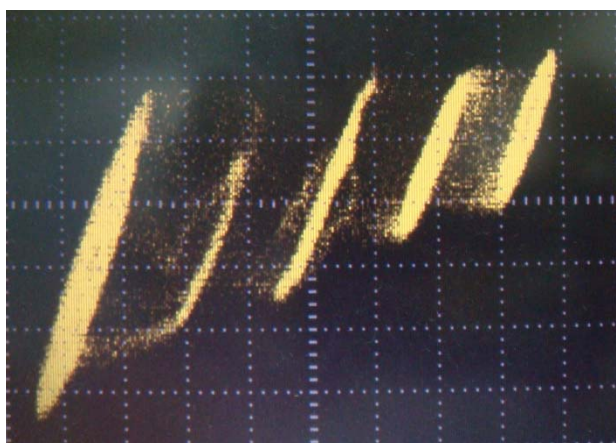


- ข) ผลการทดสอบวงจรวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 4 วงม้วนในปริภูมิสแตต
แกนนอนคือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้งคือ
ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div

รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบวงจรวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 4 วงม้วน
ที่ความต้านทาน $R=1570\Omega$



- ก) ผลการทดสอบวงจรวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 5 วงม้วน ในโดเมนเวลา
แกนนอนคือแกนเวลา (ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดัน
ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) ที่มาตราส่วน 5 V/div 2 V/div



- ข) ผลการทดสอบวงจรวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 5 วงม้วนในปริภูมิสเตต
แกนนอนคือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_1 (V) ที่มาตราส่วน 2 V/div และแกนตั้งคือ
ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม C_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div

รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบวงจรวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์กรณีเกิด 5 วงม้วน
ที่ความต้านทาน $R=1568\Omega$

5.5 สรุป

จากการศึกษาวงจรกำเนิดการม้วนอลวนพบว่า ลักษณะการเกิดขึ้นของการม้วนอลวนที่มีความซับซ้อนของสัญญาณนั้น สามารถที่จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการกำหนดค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมแก่วงจรนั้น หมายถึงมีการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุในวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน และทำการปรับค่าความต้านทาน R ที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ซึ่งจะมีผลในการควบคุมการเกิดสัญญาณอลวนในวงจร การปรับความต้านทาน R นี้ กรณีส่วนใหญ่ร้อยละ 80 ต้องปรับค่าความต้านทานให้สูงกว่าค่าความต้านทานที่คำนวณได้ ซึ่งต้องใช้ความต้านทานปรับค่าได้ที่มีความละเอียดสูง และส่วนของวงจรกำเนิดการม้วนอลวนสามารถที่จะทำการกำหนดการเกิดการม้วนได้โดยการเลือกตำแหน่งการปิด-เปิด สวิตช์ตามลักษณะโครงสร้างของวงจรที่สร้างขึ้น โดยในโครงสร้างวงจรกิจกำเนิดการม้วนแบบคู่และแบบคี่นั้นมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน

ในการเปลี่ยน โครงสร้างของวงจรกิจกำเนิดสัญญาณอลวนนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบจากวงจรกิจกำเนิดสัญญาณอลวน 2 แบบคือ วงจรกิจกำเนิดสัญญาณอลวนแบบนิ้วแบบที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน และวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ซึ่งทั้ง 2 วงจร สามารถที่จะปรับสัญญาณให้กำเนิดการม้วนอลวนแบบหลายวงม้วนได้ภายใต้วงจรกิจกำเนิดการม้วนอลวนชุดเดียวกัน ทั้งนี้จะต้องอาศัยการปรับตั้งความต้านทานที่วงจรกิจกำเนิดสัญญาณอลวนเป็นสำคัญ และในการทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบจากวงจรแบบนิ้วเป็นแกนกำเนิดที่ 2 3 4 และ 5 วงม้วน เช่นเดียวกันเมื่อทำการเปลี่ยนวงจรแกนกำเนิดจากวงจรแบบนิ้วเป็นวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ก็สามารถกำเนิดการม้วนอลวนที่จำนวน 2 3 4 และ 5 วงม้วนเช่นกัน

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาระบบที่เกิดพฤติกรรมอลวน ระบบพื้นฐานที่ศึกษาได้แก่ระบบแวนเดอร์โพล ลอเรนซ์ และรอสเลอร์ อีกทั้งได้ศึกษาพฤติกรรมอลวนที่เกิดขึ้นในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ พบว่ามีปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดพฤติกรรมอลวน ได้แก่ ค่าเริ่มต้นที่เหมาะสม ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่ประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และค่าความต้านทานที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 โดยจะมีผลในการกำหนดจุดพักแรงดันไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ในวงจร เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานในโครงข่ายออปแอมป์ ซึ่งเป็น โครงสร้างสำคัญในการนำไปสร้างการกำเนิดการม้วนอลวนจากสัญญาณอลวนที่มีแกนกำเนิดเป็นวงจรแบบจั่วและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ โครงสร้างโดยรวมของวงจรทั้งหมดประกอบด้วย วงจรแกนกำเนิดสัญญาณอลวน วงจรกลับสัญญาณ วงจรรวมสัญญาณ ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้งานโครงข่ายออปแอมป์

พฤติกรรมอลวนที่เกิดขึ้นนี้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับฟังก์ชันเชิงเส้นแบบต่อเนื่องเป็นช่วงจะทำให้พฤติกรรมอลวนที่เกิดขึ้นแสดงความคล้ายกับเป็นการม้วนแบบก้นหอย ซึ่งเรียกว่าการม้วนอลวน (chaotic scroll) การม้วนที่เกิดขึ้นนี้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงจุดสมดุลที่เป็นจุดทำงานและมีลักษณะลู่เข้าแต่ไม่สามารถคงสถานะสมดุลที่จุดทำงานใหม่ได้ ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และการม้วนอลวนที่เกิดขึ้นนี้แสดงได้ทั้งการม้วนอลวนที่มีจำนวนคู่และจำนวนคี่ ได้แก่ 2 3 4 และ 5 วงม้วน

ในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำโปรแกรม PSIM มาใช้จำลองสถานการณ์วงจรที่สามารถสร้างการม้วนอลวนได้ และนำโครงข่ายออปแอมป์มาใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันผลที่เกิดขึ้น โดยแบ่งวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนออกเป็น 2 แบบคือ วงจรอลวนแบบจั่ว และวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ ซึ่งทั้งสองวงจรนี้สามารถให้กำเนิดสัญญาณอลวนได้ และเมื่อนำมาผ่านกระบวนการในส่วนของวงจรสร้างการม้วนอลวนซึ่งเป็นโครงข่ายออปแอมป์ สามารถให้กำเนิดเป็นวงม้วน โดยที่ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบในวงจรสร้างการม้วนอลวนเลย ทั้งนี้สามารถปรับจูนค่าความต้านทานในวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนเพื่อหาจุดสมดุลที่สามารถเกิดเป็นการม้วนอลวนได้ การทดสอบผลที่เกิดขึ้นจริงนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบการเกิดการม้วนอลวนจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบจั่วและวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ดังนี้คือ กำเนิด

การม้วนอลวนที่จำนวน 2 3 4 และ 5 วงม้วน โดยแยกวงจรออกเป็นสองแบบ ได้แก่ วงจรที่กำหนด การม้วนอลวนแบบคู่ และวงจรกำหนดการม้วนอลวนแบบคี่ ดังรายละเอียดที่ได้อธิบายไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งพบว่าผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM อาจมีความแตกต่างกันบ้างในประเด็นที่ ในทางปฏิบัติการปรับแต่ให้วงม้วนอลวนมีสภาพสมมาตร กระทำได้ค่อนข้างยาก

6.2 ข้อเสนอแนะ

ตามลักษณะพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของระบบอลวนที่เกิดขึ้นคือ มีความไวต่อสภาวะเริ่มต้น เป็นปัจจัยที่ทำให้ระบบเกิดสภาวะอลวนได้ง่าย ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เกิดอุปสรรคในการทดสอบหลายอย่างที่เป็นมูลเหตุในการเกิดพฤติกรรมอลวน ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงได้สรุปปัญหาและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เช่น วงจรขยายสัญญาณ วงจรกำเนิดสัญญาณ เป็นต้น โครงสร้างของวงจรเหล่านี้มีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป โอกาสที่จะเกิดสภาวะอลวนจากวงจรเหล่านี้เป็นไปได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งสมมุติฐานเหล่านี้ผู้ทำวิจัยคาดหวังว่าจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาเพื่อที่จะได้ทราบว่า โครงสร้างของวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบอื่น ๆ สามารถที่จะเกิดสภาวะอลวนได้หรือไม่ ทั้งนี้ โครงสร้างของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบอื่นนั้นสามารถที่จะประยุกต์ให้เข้ากับเงื่อนไขการสร้างการม้วนอลวนได้หรือไม่ ลักษณะการเกิดการม้วนอลวนที่ได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถที่จะประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้ เช่น การนำไปประยุกต์ใช้งานทางการสื่อสารซึ่งอาจจะเป็นการเข้ารหัสลับในการสื่อสารข้อมูล นอกจากนั้นรูปแบบของสัญญาณอลวนที่แตกต่างไปจากการม้วนอลวนนี้ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 นั้น ผู้ทำวิจัยคาดหวังที่จะดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับการนำไปใช้งานทางวิศวกรรมด้านต่าง ๆ เช่น การควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ การประยุกต์เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า หรือการควบคุมการทำงานของแบตเตอรี่อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการจุลหอด โซเดียมความดันสูง เป็นต้น ซึ่งมูลเหตุเหล่านี้เหมาะที่จะทำการศึกษาและพัฒนาองค์ความรู้ด้านพลวัตอลวนต่อไป นอกจากนั้น การปรับโครงสร้างวงจรถูกกำหนดการม้วนให้เพิ่มจำนวนวงม้วนมากขึ้นจะเป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติต่อไป

รายการอ้างอิง

- กิติ ลิขิตอนุรักษ์ (2549). พื้นฐานวงจรอิเล็กทรอนิกส์แอนะล็อก. ตำราเรียน EE235.
- ชาญวัฒน์ ชาญเวช (2552). การประยุกต์สัญญาณออสซิลเลเตอร์แบบรวมหลอดแรงดัน. โครงการวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจอมจตุพรลาดกระบัง.
- ธีรชาติ อ่วมเปราะ และ สมบูรณ์ มงคลแมน (2546). การออกแบบและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณเคออสติกแบบมีความซับซ้อนมากแบบต่าง ๆ. โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Abdellah, A.G., and El-Nadi, A.M. (2007). Experimental observation of chaotic properties in a system of two coupled Wien-Bridge oscillator. **Chaos, Solit. Fract.** 32 : 988-995.
- Aissi, C., and Kazakos, D. (2008). An improved realization of the Chua's circuit using RC-OP AMPS. In **Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal Processing.** (pp.115-118).
- Hosokawa, Y., and Nishio, Y. (2005). Analysis of Chaotic Circuits using Wien Bridge Oscillator and a Resonator. **International Workshop on Nonlinear Circuit and Signal Processing (NCSP'05) Hawaii.** (pp.73-76).
- Kilic, R., and Yildirim, F. (2008). A survey of Wien bridge-based chaotic oscillators : Design and experimental issues. **Chaos, Solit. Fract.** 38 : 1394-1410.
- Lu, J., and Chen, G. (2006). Generating multiscroll chaotic attractor : theories, methods and applications. **International Journal of Bifurcation and Chaos.** 16(4) : 775-858.
- Morgul, O. (1995). Wien bridge based RC chaos generator. **IEE Electronics Letters.** 31(24) : 2058-2059.
- Mulukutla, M., and Aissi, C. (2002). Implementation of the Chua's circuit and its applications. **ASEE Gulf-Southwest Annual Conference.**
- Sparrow, C. (1983). An Introduction to the Lorenz Equations. **IEEE Transaction on circuits and system.** CAS-30(8) : 533-542.

- Wilson, G. (1990). Wien bridge oscillator with reduced amplifier gain-bandwidth product dependence. **IEE Proceedings**. 137(1) : 13-15.
- Yalcin, M.E., Suykens, J.A.K., and Vandewalle, J. (2000). Experimental confirmation of 3 and 5 scroll attractors from a generalized Chua's Circuit. **IEEE Transactions on Circuits and systems-Part I : Fundamental theory and applications**. 47(3) : 425-429.
- Yang, X., and Li, Q. (2003). Generate n-scroll attractor in linear system by scalar output feedback. **Chaos, Solit. Fract.** 18 : 25-29.
- Yu, S.M., Ma, Z.G., Qiu, S.S, Peng, S.G., and Lin, Q.H. (2004). Generation and synchronization of N-scroll chaotic and hyperchaotic attractors in fourth-order systems. **Phys. Chin.** 13(3) : 318-328.
- Yu, S.M., Qiu, S.S., and Lin, Q.H. (2003). New results of study on generating multiple-scroll chaotic attractors. **Sci. chin. (F)**. 46(2) : 104-115.
- Yu, S.M., Lu, J., and Chen, G. (2007). A family of n-scroll hyperchaotic attractors and their realization. **Physics Letters A** 364. 244–251

ภาคผนวก ก

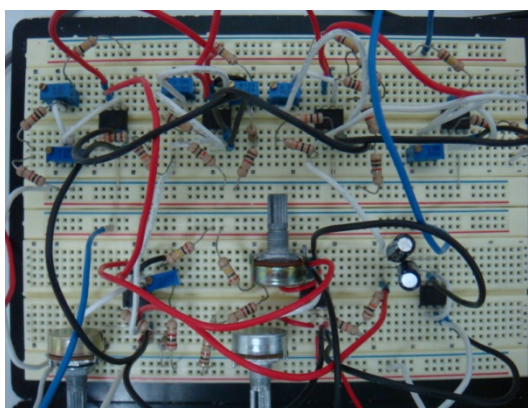
แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดพฤติกรรมอดวน

พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขณะทำการทดสอบ

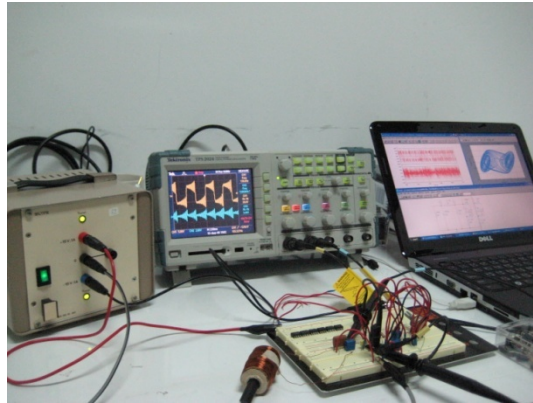
ในขณะที่ดำเนินการทดสอบวงจรการสร้างการม้วนอลวนทั้งแบบที่กำหนดจำนวนคู่และแบบที่กำหนดจำนวนคี่ ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งที่จะบ่งบอกได้ว่าวงจรที่กำลังดำเนินการทดสอบอยู่นั้นสามารถทำการปรับจูนให้เข้าสู่การม้วนอลวนได้หรือไม่ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้รวมลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มที่จะเกิดเป็นการม้วนอลวนไปจนถึงการเปลี่ยนแปลงที่หลุดจากเส้นทางโคจรของการม้วนอลวนดังแสดงในรูปต่อไปนี้



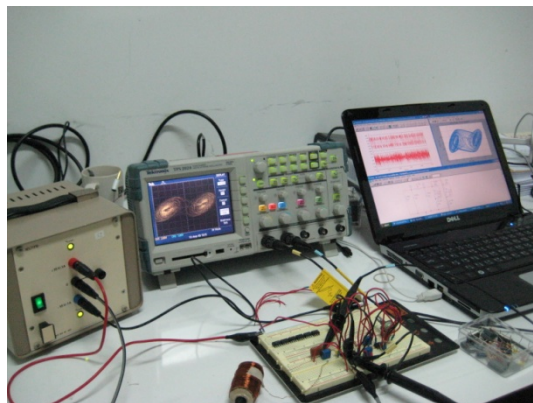
รูปที่ ก.1 อุปกรณ์ในการทดสอบการเกิดการม้วนอลวน



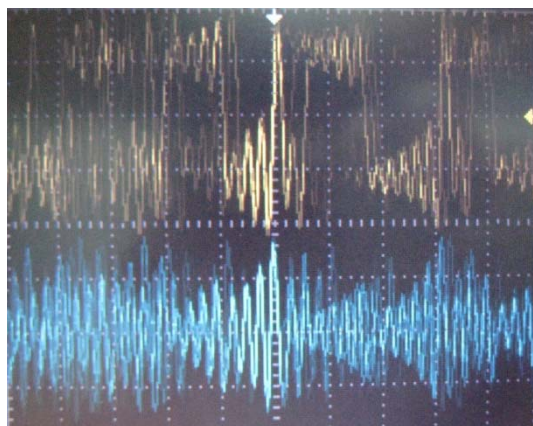
รูปที่ ก.2 ลักษณะการต่อวงจรทดสอบวงจรการม้วนอลวน



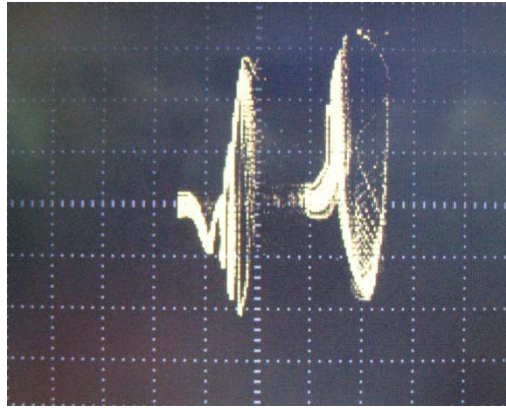
รูปที่ ก.3 การทดสอบวงจรหัวเปรียบเทียบผลการจำลองในโดเมนเวลา



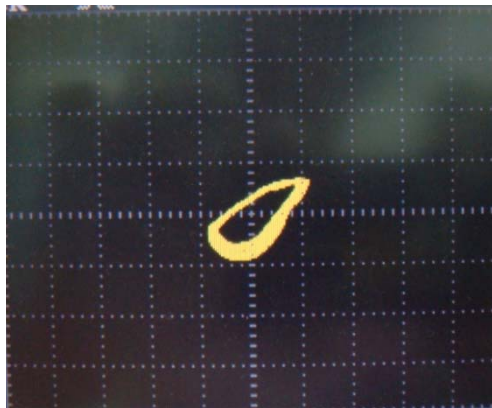
รูปที่ ก.4 การทดสอบวงจรหัวเปรียบเทียบผลการจำลองในปริภูมิสเตรต



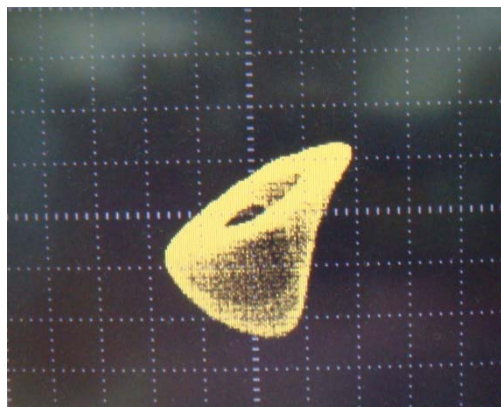
รูปที่ ก.5 ผลการทดสอบในโดเมนเวลาที่เข้าสู่การม้วนอลวนที่ 2 วงม้วน



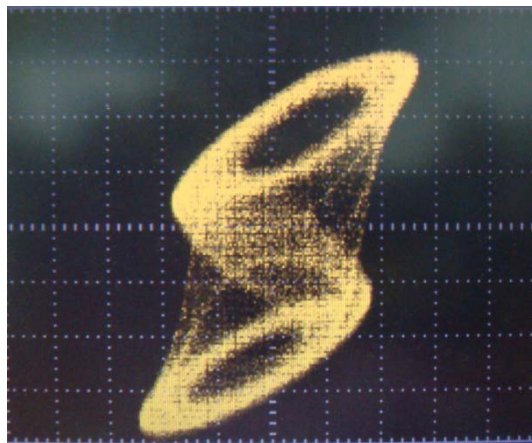
รูปที่ ก.6 ผลการทดสอบในปริภูมิสเตตที่เข้าสู่การม้วนอลวนที่ 2 วงม้วน



รูปที่ ก.7 ลักษณะเริ่มต้นของการเกิดการม้วนอลวนแบบ 2 วงม้วน



รูปที่ ก.8 ผลของการเกิดการม้วนอลวนแบบ 2 วงม้วน ที่เริ่มเกิดจากวงม้วนเดี่ยว



รูปที่ ก.9 ผลของการเกิดการม้วนอลวนแบบ 2 วงม้วน

ภาคผนวก ข

โปรแกรม MATLAB จำลองระบบแวนเดอร์โพล ตอเรนซ์ และรอสเลอร์

โปรแกรมจำลองระบบแวนเดอร์โพล

```

function dydt = vdpeq1(t,y)
% Evaluate the van der Pol ODEs for k = 0.2
dydt = [y(2); 0.2*(1-y(1)^2)*y(2)-y(1)];
% "Complex and Chaotic Nonlinear Dynamics.

function dydt = vdpeq2(t,y)
% Evaluate the van der Pol ODEs for k = 1
dydt = [y(2); (1-y(1)^2)*y(2)-y(1)];
% "Complex and Chaotic Nonlinear Dynamics.

function dydt = vdpeq3(t,y)
% Evaluate the van der Pol ODEs for k = 5
dydt = [y(2); 5*(1-y(1)^2)*y(2)-y(1)];
% "Complex and Chaotic Nonlinear Dynamics.

% The ODEs commands are as follows:
x0=[0.1 0.1];
[t,Q] = ode45('vdpeq1',[0 100],x0);
subplot(221);
plot(t,Q(:,1),'-',t,Q(:,2),'r-');grid on;
xlabel('time t');
ylabel('solution x1 and x2');
title('van der Pol with k=0.2');
axis([0 100 -2.5 2.5]);
subplot(222);
plot(Q(:,1),Q(:,2));grid on;
xlabel('x1');
ylabel('x2');
title('van der Pol with k=0.2');

```

```
axis([-2.5 2.5 -2.5 2.5]);

x0=[0.1 0.1];%x0=[0.9 0.9];
[t,W] = ode45('vdpeq2',[0 100],x0);
subplot(223);
plot(t,W(:,1),'-',t,W(:,2),'r-.');grid on;
xlabel('time t');
ylabel('solution x1 and x2');
title('van der Pol with k=1');
axis([0 100 -3 3]);

subplot(224);
plot(W(:,1),W(:,2));grid on;
xlabel('x1');
ylabel('x2');
title('van der Pol with k=1')
axis([-2.5 2.5 -3 3]);
```

โปรแกรมจำลองระบบลอเรนซ์

```

function Lorenz_exam
clear all;
close all;
clc;
tspan=[0 100]; xzero=[5;5;5];
options=odeset('AbsTol',1e-7,'RelTol',1e-4);
sigma=10; rho=28; beta=8/3;
[t,x]=ode45(@Lorenz,tspan,xzero,options,sigma,rho,beta);
figure(1),plot(x(:,1),x(:,3)),grid
xlabel('x1','fontSize',14)
ylabel('x3','fontSize',14)
title('Lorenz Simulation','fontSize',14)
figure(2),plot(t,x(:,1),'r',t,x(:,3),'b'),grid
xlabel('Time','fontSize',14)
ylabel('x1,x3','fontSize',14)
title('Lorenz Simulation','fontSize',14)

function xprime=Lorenz(t,x,sigma,rho,beta)
xprime=[-sigma*x(1)+sigma*x(2);rho*x(1)-x(2)-x(1)*x(3);-beta*x(3)+x(1)*x(2)];
end
end

```

โปรแกรมจำลองระบบรอสเลอร์

```

function rossler_exam
% ROSSLER_EXAM Run Rossler example

clear all;
close all;
clc;

tspan=[0 250]; yzero=[1;1;1];
options=odeset('AbsTol',1e-7,'RelTol',1e-4);
a=0.2; b=0.2;

c=2.5;
[t,y]=ode45(@rossler,tspan,yzero,options,a,b,c);
figure(1),subplot(221),plot3(y(:,1),y(:,2),y(:,3)),mytitle,zlabel('z','fontsize',14),grid
figure(1),subplot(223),plot(y(:,1),y(:,2)),mytitle,grid
figure(2),subplot(221),plot(t,y(:,3)),mytitle2,grid
figure(2),subplot(223),plot(t,y(:,1)),mytitle3,grid

c=5;
[t,y]=ode45(@rossler,tspan,yzero,options,a,b,c);
figure(1),subplot(222),plot3(y(:,1),y(:,2),y(:,3)),mytitle,zlabel('z','fontsize',14),grid
figure(1),subplot(224),plot(y(:,1),y(:,2)),mytitle,grid
figure(2),subplot(222),plot(t,y(:,3)),mytitle2,grid
figure(2),subplot(224),plot(t,y(:,1)),mytitle3,grid

function yprime=rossler(t,y,a,b,c)
yprime=[-y(2)-y(3);y(1)+a*y(2);b+y(3)*(y(1)-c)];
end

function mytitle

```

```
title(sprintf('c=%2.1f',c),'fontsize',14)
xlabel ('x','fontsize',14)
ylabel ('y','fontsize',14)
end

function mytitle2
title(sprintf('c=%2.1f',c),'fontsize',14)
xlabel ('Time (sec)','fontsize',14)
ylabel ('z','fontsize',14)
end

function mytitle3
title(sprintf('c=%2.1f',c),'fontsize',14)
xlabel ('Time (sec)','fontsize',14)
ylabel ('x','fontsize',14)
end
end
```

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Jantanate, W., Chaiyasena, P.A., and Sujitjorn, S. (2010). **Scroll Generation with Inductorless Chua's Circuit and Wien Bridge Oscillator**. Proc. 4th Int. Conf. Circuits, System and signal (CSS'10), Corfu Island, Greece, pp. 48-53, July 22-25, 2010.

Jantanate, W., Chaiyasena, P.A., and Sujitjorn, S. (2010). **Odd/Even Scroll Generation with Inductorless Chua's and Wien Bridge Oscillator Circuits**. WSEAS Trans. on Circuits and Systems. 7(9):473-482.

Scroll Generation with Inductorless Chua's Circuit and Wien Bridge Oscillator

Watcharin Jantanate, Peter A. Chaiyasena, and Sarawut Sujitjorn*

Abstract—An inductorless Chua's circuit, and a scroll generator are presented in this paper. The scheme employs only RCs and op-amps, and provides a very reliable generation of multiple chaotic scrolls. The design formulas and examples including simulation and practical results are illustrated. The principle is applied successfully to generate some odd scrolls with the Wien bridge oscillator.

Keywords—Chaos, Chua's circuit, inductorless, Wien bridge oscillator, scroll generation.

I. INTRODUCTION

CHAOTIC phenomenon has received much interest for a few decades. Such behaviour has been successfully applied to signal transmission and cryptography [1]-[3]. Several type of oscillators, for example Collpits, Wien bridge, Chua, Lorenz, etc., have been studied and used for generating chaotic attractors. Among those, Chua's circuit stands out and always provides a reliable result. The original Chua's circuit has been modified to have only RCs and op-amps [4]-[6], whose structures are compact and open for simple adjustments. After successful applications of the double scroll oscillators, n-scroll chaotic circuits producing a more complicated behaviour have been developed by introducing additional breakpoints into the characteristics of the Chua's circuit [7]-[9].

In this paper, the backgrounds of the Chua's and scroll generating circuits are reviewed in the next section. Section III presents the design examples, simulation and practical results based on the inductorless Chua's circuit as well as the Wien bridge oscillator. Conclusion follows in section IV.

II. BACKGROUNDS

A. The Chua's circuit

The Chua's circuit as shown in Fig.1 is a rich 3rd-order dynamical system. The NR stands for the nonlinear resistor which is commonly implemented via 2 op-amps and 6 resistors known as the Chua's diode.

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

The authors are with the School of Electrical Engineering, and the School of Mathematics, Suranaree University of Technology (SUT), Thailand. Financial supports from SUT and Rajamangala University of Technology Isan (Khonkaen Campus), Thailand, are greatly acknowledged.

*Corresponding author: sarawut@sut.ac.th.

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R}(v_1 - v_2) + i_3 \quad (2)$$

$$L \frac{di_3}{dt} = -v_2 \quad (3)$$

$$f(v_1) = G_1 v_1 + \frac{1}{2}(G_1 - G_0) \{|v_1 + E_1| - |v_1 - E_1|\} \quad (4)$$

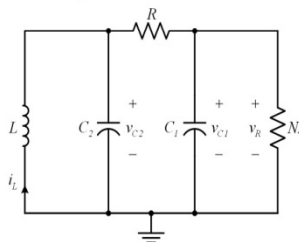


Fig.1 Chua's circuit.

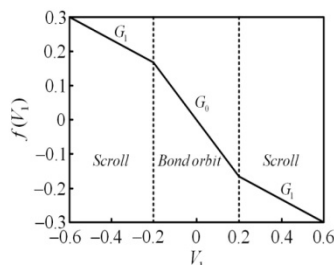


Fig. 2 V-I characteristic of Chua's diode.

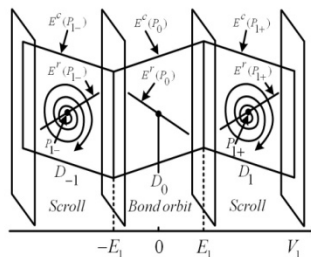


Fig. 3 Vector field regions of double scroll.

The dynamics of the Chua's circuit are expressed by Eqs. (1)-(3). Eq.(4) expresses the nonlinear function $f(v_1)$ whose characteristic curve is depicted in Fig. 2. Fig. 3 represents the vector regions of a double scroll case. The attractors D_1 and D_{-1} slide from one plane to another alternately through the bond orbit. The inductor in the original Chua's circuit can be replaced by a simulated inductor. Fig. 4 illustrates the inductorless Chua's circuit with its simulated behaviour using PSIM.

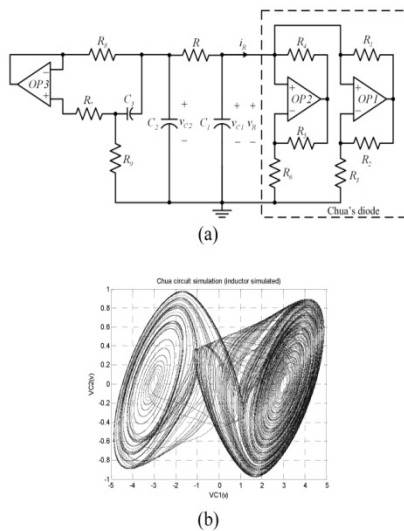


Fig. 4 An inductorless Chua's circuit: (a) the circuit diagram, (b) the simulation result.

B. The scroll generators

In the paper, it is shown that the inductorless Chua's circuit can be used as the core to generate the chaotic behaviour for multi-scroll generation. Referring to Fig. 3, the left and right boundaries of the bond orbit are separated by the breakpoint voltages, $-E_1$ and E_1 respectively. More breakpoints can be inserted to generate multiple attractors and bond orbits [8]-[9] based on the piecewise-linear function concept. According to this principle, the nonlinear function, $f(v_1)$, of the n-scroll chaotic attractor can be expressed by

$$f(v_1) = G_{n-1}v_1 + 0.5 \sum_{j=1}^{n-1} (G_{j-1} - G_j) \{ |v_1 + E_j| - |v_1 - E_j| \}$$

$$\begin{cases} G_0 v_1 \\ G_j v_1 + \sum_{j=1}^j (G_{j-1} - G_j) E_j \\ G_{n-1} v_1 + \sum_{j=1}^j (G_{j-1} - G_j) E_j \end{cases} \quad (5)$$

As an example, an 11-scroll attractor requires 21 segments of the piecewise-linear function as shown in Figs. 5 (a)-(b).

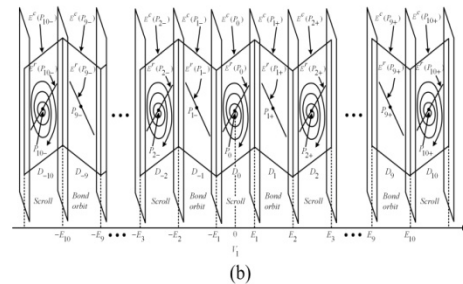
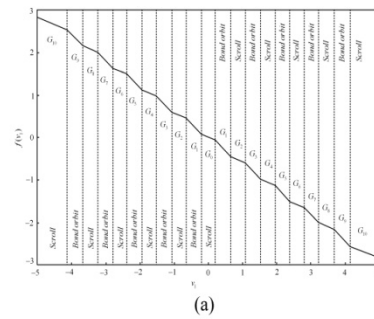


Fig. 5 An example of 11-scroll attractor: (a) the piecewise-linear function, (b) the vector field.

Referring to Fig. 5(b), the center manifold contains the attractor D_0 with the equilibrium point, $P_0 = 0$. For a given breakpoint E_j , the equilibrium points, P_{j+} and P_{j-} , in different regions can be calculated according to Eq. (6),

$$\begin{cases} P_{j+} = [v_{1+} \quad v_{2+} \quad i_{3j+}] \\ = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^j (G_{j-1} - G_j) E_j & -G \sum_{j=1}^j (G_{j-1} - G_j) E_j \\ (G + G_j) & (G + G_j) \end{bmatrix} \quad (6) \\ P_{j-} = [v_{1-} \quad v_{2-} \quad i_{3j-}] \\ = \begin{bmatrix} -\sum_{j=1}^j (G_{j-1} - G_j) E_j & G \sum_{j=1}^j (G_{j-1} - G_j) E_j \\ (G + G_j) & (G + G_j) \end{bmatrix} \end{cases}$$

where $i = 1, 2, 3, \dots$; and $v_{1i+}, v_{2i+}, i_{3i+}, v_{1i-}, v_{2i-}, i_{3i-}$ are the projections of the points P_{i+} and P_{i-} to the corresponding v_1, v_2 and i_3 axes, respectively. $E_i < v_{1i+} < E_{i+1}$ must hold for symmetrical scrolls, and the breakpoint voltages can be determined from (7) where $G=1/R = 1/1.65k = 0.6061 \text{ S}$.

$$E_{i+1} = \frac{2 \sum_{j=1}^i (G_j - G_{j-1}) E_j}{(G + G_i)} - E_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

III. REALIZATION, SIMULATIONS, AND EXPERIMENTS

Realization of the scroll generating circuit follows the procedures described in [7]. After specifying the conductance G_s , and the breakpoint E_1 , the other breakpoints can be calculated according to Eq.(7). The circuit uses op-amps, and R_s as shown in Fig. 6.

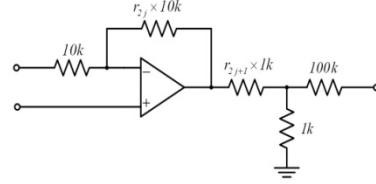


Fig. 6 Building block of the scroll generator.

The + and - input pins of the op-amp used as the building block are alternately tied to ground. The normalized resistor r_{2j} and r_{2j+1} can be calculated using the formulas in Eq. (8)-(10), respectively. Consequently, the following normalized resistors of the scroll generator can be obtained.

$$r_{2j} = \frac{R_{2j,2}}{R_{2j,1}} = \frac{E_{9-j}}{E_{1-j}} - \frac{1+(-1)^j}{2} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (8)$$

$$\begin{cases} G_8 = -\frac{1}{R_3} \left(\frac{R_{02}}{R_{01}} \right) & (|v_1| \geq E_8) \\ G_{8-j} = G_{9-j} + \frac{(-1)^j}{R_3} \left[\frac{1+(-1)^j}{2} + r_{2j} \right] \left(\frac{1}{1+r_{2j+1}} \right) & (E_{8-j} \leq |v_1| < E_{9-j}, j = 1, 2, 3, \dots, 10) \end{cases} \quad (9)$$

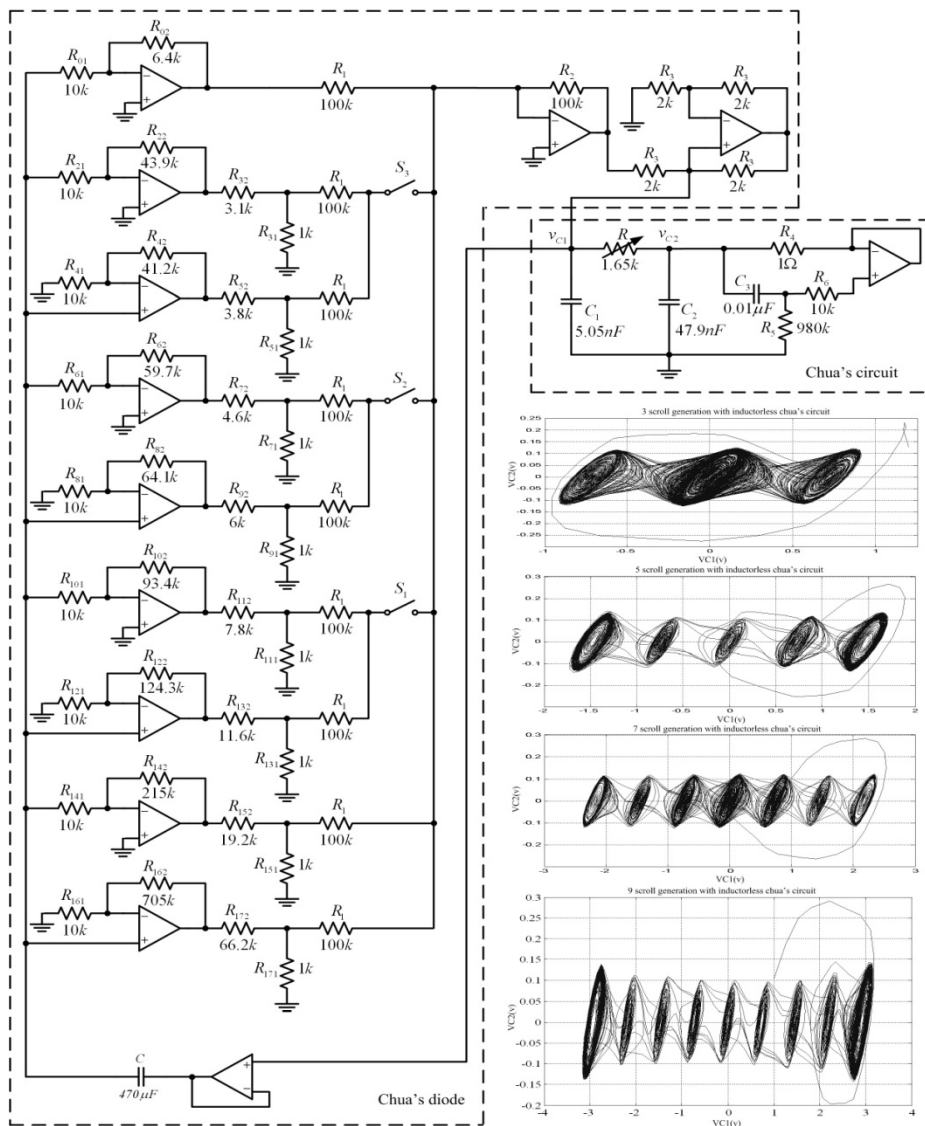
$$\begin{cases} r_0 = \frac{R_{02}}{R_{01}} = -R_3 G_8 \\ r_{2j+1} = \frac{R_{2j+1,2}}{R_{2j+1,1}} = \frac{(-1)^j \left[\frac{1+(-1)^j}{2} + r_{2j} \right]}{R_3 (G_{8-j} - G_{9-j})} - 1 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 10) \end{cases} \quad (10)$$

As an example, the components of the Chua's circuit are $C_1 = 5.06 \mu F, C_2 = 47.9 \mu F, R = 1.65 k \Omega$, and $L = 9.3 mH$. The inductor is realized by an op-amp with $C_3 = 0.01 \mu F, R_4 = 1 \Omega, R_5 = 980 k \Omega$, and $R_6 = 10 k \Omega$. To achieve the odd numbers of scroll of 3, 5, 7 and 9, based on the double scroll Chua's circuit, the following breakpoint (E_i), and the conductances are assigned: $E_1 = 0.2V, G_0 = G_2 = G_4 = \dots = G_8 = -0.32 mS$, and $G_1 = G_3 = \dots G_7 = -0.852 mS$. Hence, the obtained breakpoints are $E_i = [E_1, E_2, E_3, \dots, E_8]$
 $= [0.2000 \ 0.6654 \ 1.0654 \ 1.5308 \ 1.9308 \ 2.3962 \ 2.7962 \ 3.2616]$.

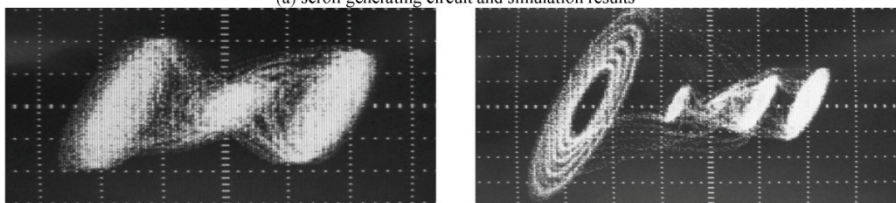
$$\begin{cases} r_{2j} = [r_0 \ r_2 \ r_4 \ r_6 \ r_8 \ r_{10} \ r_{12} \ r_{14} \ r_{16}] \\ \quad = [0.6400 \ 4.3844 \ 4.1141 \ 5.9678 \ 6.4063 \\ \quad \quad 9.3416 \ 12.4223 \ 21.4911 \ 70.5000] \\ r_{2j+1} = [r_3 \ r_5 \ r_7 \ r_9 \ r_{11} \ r_{13} \ r_{15} \ r_{17}] \\ \quad = [3.1207 \ 3.8065 \ 4.6089 \ 5.9608 \ 7.7797 \\ \quad \quad 11.6149 \ 19.1984 \ 66.1992] \end{cases}$$

Fig. 7 illustrates the scroll generating circuit to achieve 3, 5, 7 and 9 scrolls based on the inductorless Chua's circuit. The status of the switches (S_1, S_2, S_3) are as follows: (off, off, off) for 3, (on, off, off) for 5, (on, on, off) for 7, and (on, on, on) for 9 scrolls, respectively. Simulation and experimental results are also depicted in the same figure.

The same principle and the circuit are applied to the case of Wien bridge oscillator. As shown in Fig. 8, both simulation and experimental results confirm the successful applications of this scroll generator.

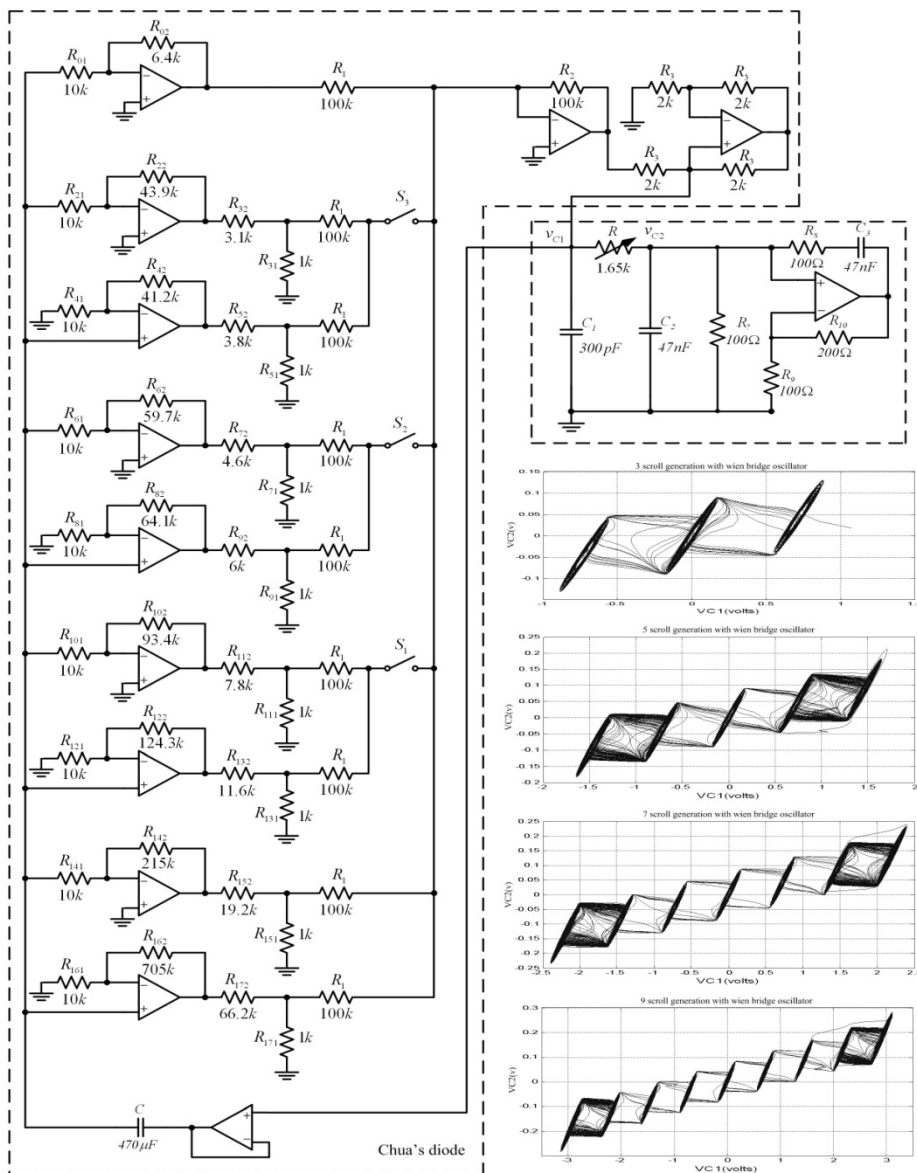


(a) scroll generating circuit and simulation results

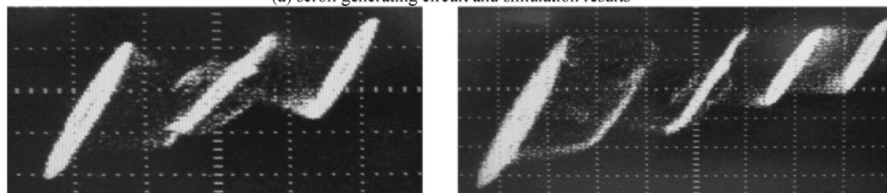


(b) experimental results

Fig. 7 Odd-scroll generating circuit based on the inductorless Chua's circuit.



(a) scroll generating circuit and simulation results



(b) experimental results

Fig. 8 Odd-scroll generating circuit based on the Wien bridge oscillator.

IV. CONCLUSION

The principles of the scroll generating circuit, and the Chua's circuits have been explained in the paper. The design of an odd-scroll generating circuit with simulation and practical results are presented. The cases of 3, 5, 7, and 9 scrolls based on the inductorless Chua's circuits, and the Wien bridge oscillator have been illustrated. The principles described herein can be readily applied for generating even-scrolls.

REFERENCES

- [1] G. Kolumban, M. P. Kennedy, and L. O. Chua, "The role of synchronization in digital communications using chaos-Part II: Chaotic modulation and chaotic synchronization," *IEEE Trans. Circuits Syst. (part-I)*, vol. 45, no.11, pp. 1129-1140, 1998.
- [2] T. Yang, C. W. Wu, and L. O. Chua, "Cryptography based on chaotic systems," *IEEE Trans. Circuits Syst. (part-I)*, vol. 44, no.5, pp. 469-472, 1997.
- [3] A. S. Dmitriev, A. I. Panas, S. O. Starkov, "Experiments on speech and music signals transmission using chaos," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 5, no. 4, pp. 1249-1254, 1995.
- [4] M. P. Kennedy, "Robust op amp realization of Chua's circuit," *FREQUENZ*, vol. 46, pp. 66-80, Apr. 1992.
- [5] O. Mergul, "Inductorless realization of Chua oscillator," *Electronics Letters*, vol. 31, pp.1403-1404, Aug. 1995.
- [6] C. Aissi and D. Kazakos, "An improved realization of the Chua's circuit using RC-op amps," in *Proc. 7th WSEAS Int. Conf. on Signal Processing*, 2008, pp. 115-118.
- [7] M. E. Yalcin, J. A. K. Suykens and J. Vandewalle, "Experimental confirmation of 3- and 5-scroll attractors from a generalized Chua's circuit," *IEEE Trans. Circuits Syst. (part-I)*, vol. 47, pp. 425-429, Mar. 2000.
- [8] Y. Simin, Q. Shuisheng and L. Qinghua, "New results of study on generating multiple-scroll chaotic attractors," *Science in China (Series F)*, vol. 46, no. 2, pp. 104-115, Apr. 2003.
- [9] Y. Simin, M. Zaiguang and Q. Shuisheng, "Generation and synchronization of N-scroll chaotic and hyperchaotic attractors in fourth-order systems," *Chinese Physics*, vol. 13, no. 3, pp. 317-328, Mar. 2004.

Odd/Even Scroll Generation with Inductorless Chua's and Wien Bridge Oscillator Circuits

Watcharin Jantanate¹, Peter A. Chaiyasena², and Sarawut Sujitjorn^{1*}

¹ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering

² School of Mathematics, Institute of Science

Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

*corresponding author: sarawut@sut.ac.th <http://www.sut.ac.th/engineering/electrical/carg>

Abstract: - An inductorless Chua's circuit, and a scroll generator are presented in this paper. The scheme employs only RCs and op-amps, and provides a very reliable generation of multiple odd and even chaotic scrolls. The design formulas and examples including simulation and practical results are illustrated. The principle has been applied successfully to generate some odd/even scrolls with the Wien bridge oscillator as illustrated by the simulation and the practical results.

Key-Words: - Chaos, Chua's circuit, inductorless, Wien bridge oscillator, scroll generation.

1 Introduction

CHAOTIC phenomenon has received much interest for a few decades. Such behaviour has been successfully applied to signal transmission and cryptography [1]-[3]. Several types of oscillators have been studied and applied for generating chaos, e.g. Collpits, Wien bridge, Chua, Lorenz, etc.. Among those, Chua's circuit stands out, and always provides a reliable result. The original Chua's circuit has been modified to have only RCs and op-amps [4]-[6], whose structures are compact and open for simple adjustments. More complicated dynamics of the Chua's circuit have been investigated. These include antimonotonicity, and bubble formation [7]-[8]. It is also possible to replace the piecewise linear characteristic of the Chua's diode with a smooth cubic function [9].

After successful applications of the double scroll oscillators, n-scroll chaotic circuits producing a more complicated behaviour have been developed. The key concept of the scroll generator is to add multiple breakpoints into the characteristics of the Chua's diode [10]-[12]. The generator has not been applied with the inductorless Chua's circuit, and the Wien bridge oscillator before. In this paper, the backgrounds of the Chua's, Wien bridge, and scroll generating circuits are reviewed in the next section. Section 3 presents the design examples, simulation and practical results based on the inductorless Chua's circuit as well as the Wien bridge oscillator. Conclusion follows in section 4.

2 Backgrounds

2.1 The Chua's circuit

The Chua's circuit as shown in Fig.1 is a rich 3rd-order dynamical system. The NR stands for the nonlinear resistor which is commonly implemented via 2 op-amps and 6 resistors known as the Chua's diode.

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

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R}(v_1 - v_2) + i_3 \quad (2)$$

$$L \frac{di_3}{dt} = -v_2 \quad (3)$$

$$f(v_1) = G_1 v_1 + \frac{1}{2}(G_1 - G_0)\{|v_1 + E_1| - |v_1 - E_1|\} \quad (4)$$

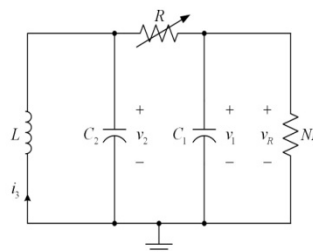


Fig.1 Chua's circuit.

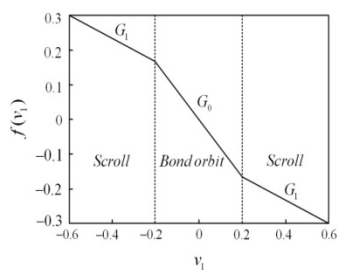


Fig. 2 V-I characteristic of Chua's diode.

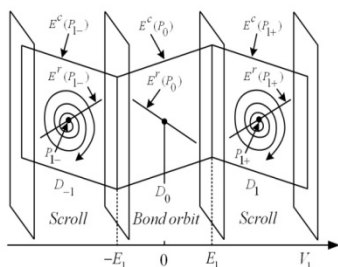


Fig. 3 Vector field regions of double scroll.

The dynamics of the Chua's circuit are described by Eqs. (1)-(3). Eq. (4) expresses the nonlinear function $f(v_1)$ whose characteristic curve is depicted in Fig. 2. Fig. 3 represents the vector regions of a double scroll case. The attractors D_1 and D_{-1} slide from one plane to another alternately through the bond orbit. The inductor in the original Chua's circuit can be replaced by a simulated inductor. Fig. 4 illustrates the inductorless Chua's circuit with its simulated behaviour obtained from PSIM.

2.2 The chaotic Wien bridge oscillator

Wien bridge is a very well-known oscillator. When it is connected to the Chua's diode, the circuit is represented by the diagram in Fig. 5, and produces a double scroll chaotic behaviour. The circuit is very sensitive to initial conditions while the interconnected resistor, R , plays a key role for the adjustment of the initial conditions. The dynamic of the circuit can be represented by Eqs. (5)-(7). The previously described piecewise linear characteristic of the Chua's diode is still applied. The simulated responses of the circuit are shown in Fig. 6.

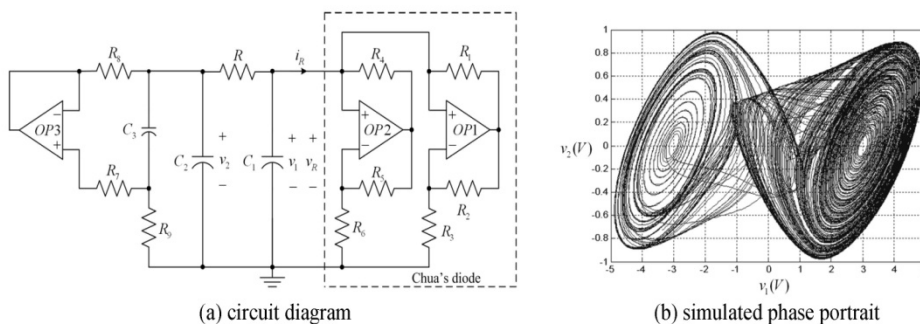


Fig. 4 An inductorless Chua's circuit.

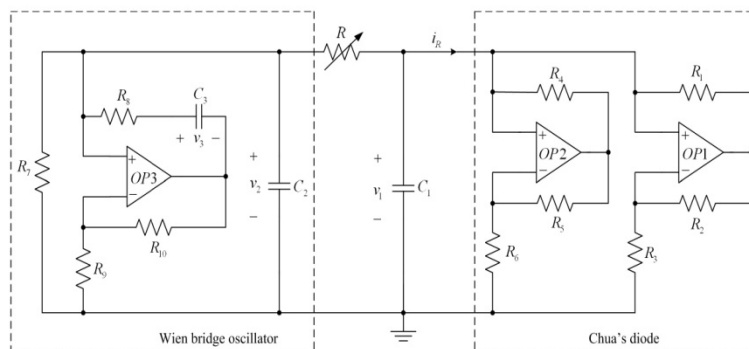
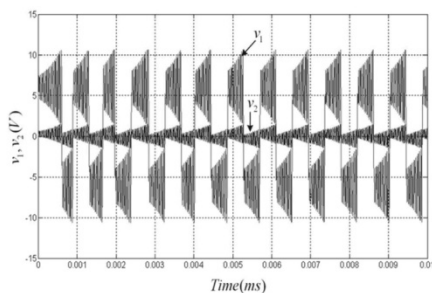


Fig. 5 A chaotic Wien bridge oscillator.

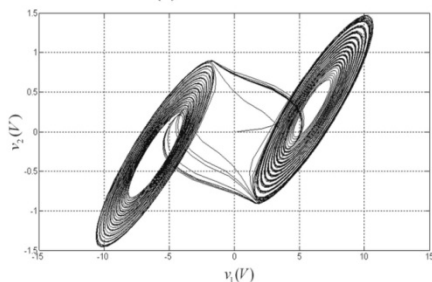
$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R}(v_1 - v_2) - f(v_1) \quad (5)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R}(v_1 - v_2) + \frac{1}{R_8}v_3 \quad (6)$$

$$C_3 \frac{dv_3}{dt} = -\frac{R_3}{R_1 R_4}v_2 - \frac{1}{R_1}v_3 \quad (7)$$



(a) time-domain



(b) phase portrait

Fig. 6 Dynamic responses of the Wien bridge oscillator.

2.3 The scroll generators

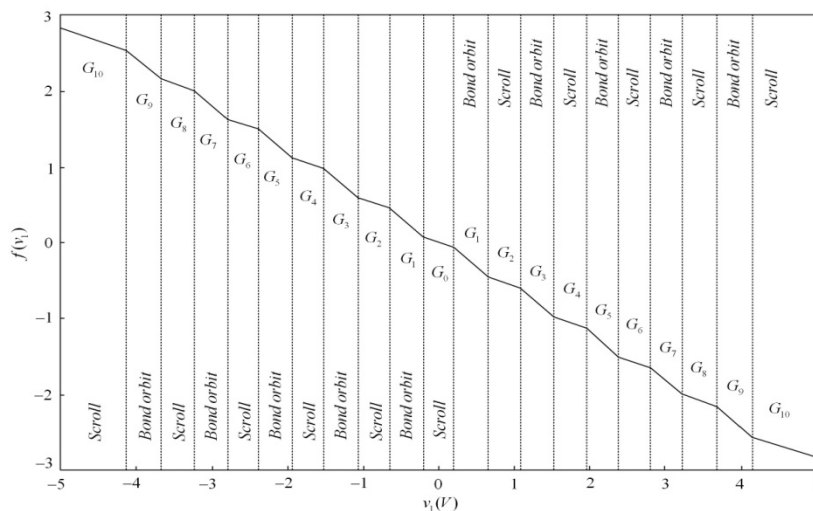
In the paper, it is shown that the inductorless Chua's circuit can be used as the core to generate the chaotic behaviour for multi-scroll generation. Referring to Fig. 3, the left and right boundaries of the bond orbit are separated by the breakpoint voltages, $-E_1$ and E_1 respectively. More breakpoints can be inserted to generate multiple attractors and bond orbits based on the piecewise linear function concept [11]-[12]. According to this principle, the nonlinear function, $f(v_1)$, of the n -scroll chaotic attractor can be expressed by

$$f(v_1) = G_{n-1}v_1 + 0.5 \sum_{i=1}^{n-1} (G_{i-1} - G_i) \{ |v_1 + E_i| - |v_1 - E_i| \}$$

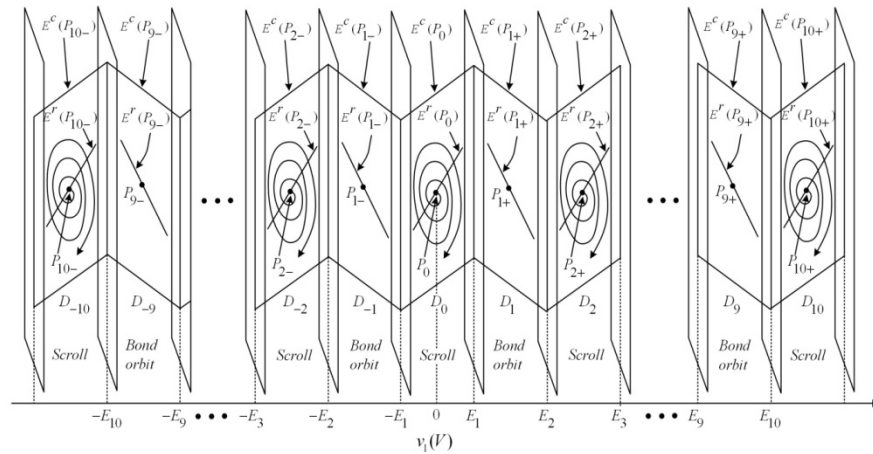
$$= \begin{cases} G_0 v_1 \\ G_i v_1 + \sum_{j=1}^i (G_{j-1} - G_j) E_j \\ G_{n-1} v_1 + \sum_{j=1}^i (G_{j-1} - G_j) E_j \end{cases} \quad (8)$$

As an example, an 11-scroll attractor requires 21 segments of the piecewise-linear function as shown in Figs. 7(a)-(b).

Referring to Fig. 7(b), the center manifold contains the attractor D_0 with the equilibrium point $P_0 = 0$. For a given breakpoint E_j , the equilibrium points, P_{i+} and P_{i-} , in different regions can be calculated according to Eq. (9),



(a) piecewise linear function



(b) vector field

Fig. 7 The vector manifold of 11-scroll attractor.

$$\begin{cases}
 P_{i+} = [v_{1+}, v_{2+}, i_{3+}] \\
 = \left[\begin{array}{cc} \sum_{j=1}^i (G_{j-1} - G_j) E_j & -G \sum_{j=1}^i (G_{j-1} - G_j) E_j \\ (G + G_i) & (G + G_i) \end{array} \right] \\
 P_{i-} = [v_{1-}, v_{2-}, i_{3-}] \\
 = \left[\begin{array}{cc} -\sum_{j=1}^i (G_{j-1} - G_j) E_j & G \sum_{j=1}^i (G_{j-1} - G_j) E_j \\ (G + G_i) & (G + G_i) \end{array} \right]
 \end{cases} \quad (9)$$

where $i = 1, 2, 3, \dots$; and $v_{1+}, v_{2+}, i_{3+}, v_{1-}, v_{2-}, i_{3-}$ are the projections of the points P_{i+} and P_{i-} to the corresponding v_1, v_2 and i_3 axes, respectively. The condition $E_i < v_{i+} < E_{i+1}$ must hold for symmetrical scrolls, and the breakpoint voltages can be determined from (10) where $G = 1/R = 1/1.65k = 0.6061$ S.

$$E_{i+1} = \frac{2 \sum_{j=1}^i (G_j - G_{j-1}) E_j}{(G + G_i)} - E_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

3 Realization, Simulations, and Experiments

Realization of the scroll generating circuit follows the procedures described in [10]. After specifying the conductance G_s , and the breakpoint E_1 , the other breakpoints can be calculated

according to Eq. (10). The circuit uses op-amps, and R_s as the building block shown in Fig. 8.

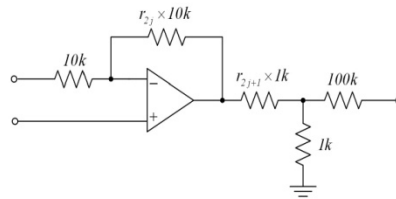


Fig. 8 Building block of the scroll generator.

As an example, the components of the Chua's circuit are $C_1 = 5.06 \mu F, C_2 = 47.9 \mu F, R = 1.65k \Omega$, and $L = 9.3mH$. The inductor is realized by an op-amp with $C_3 = 0.01 \mu F, R_4 = 1 \Omega, R_5 = 980k \Omega$, and $R_6 = 10k \Omega$. To achieve the odd numbers of scroll of 3, 5, 7 and 9, based on the double scroll Chua's circuit, the following breakpoint (E_1), and the conductances are assigned: $E_1 = 0.2V, G_0 = G_2 = G_4 = \dots = G_8 = -0.32mS$, and $G_1 = G_3 = \dots G_7 = -0.852mS$. Hence, the obtained breakpoints are $E_i = [E_1 E_2 E_3 \dots E_8] = [0.2000 0.6654 1.0654 1.5308 1.9308 2.3962 2.7962 3.2616]$.

$$r_{2j} = \frac{R_{2j,2}}{R_{2j,1}} = \frac{E_{out}}{E_{in-j}} - \frac{1+(-1)^j}{2} \quad (j=1,2,3,\dots,10) \quad (11)$$

$$\begin{cases} G_0 = -\frac{1}{R_3} \left(\frac{R_{02}}{R_{01}} \right) & (|v_1| \geq E_0) \\ G_{9-j} = G_{9-j} + \frac{(-1)^j}{R_3} \left[\frac{1+(-1)^j}{2} + r_{2j} \right] \left(\frac{1}{1+r_{2j+1}} \right) & (E_{9-j} \leq |v_1| < E_{9-j}, j=1,2,3,\dots,10) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} r_0 = \frac{R_{02}}{R_{01}} = -R_3 G_0 \\ r_{2j+1} = \frac{R_{2j+1,2}}{R_{2j+1,1}} = \frac{(-1)^j \left[\frac{1+(-1)^j}{2} + r_{2j} \right]}{R_3 (G_{9-j} - G_{9-j})} - 1 \quad (j=1,2,3,\dots,10) \end{cases} \quad (13)$$

The + and - input pins of the op-amp used as the building block are alternately tied to ground. The normalized resistances r_{2j} and r_{2j+1} can be calculated using the formulas in Eqs. (11)-(13), respectively. Consequently, the following normalized resistances of the scroll generator can be obtained.

$$\begin{cases} r_{2j} = [r_0 \ r_2 \ r_4 \ r_6 \ r_8 \ r_{10} \ r_{12} \ r_{14} \ r_{16}] \\ \quad = [0.6400 \ 4.3844 \ 4.1141 \ 5.9678 \ 6.4063 \\ \quad \quad 9.3416 \ 12.4223 \ 21.4911 \ 70.5000] \\ r_{2j+1} = [r_3 \ r_5 \ r_7 \ r_9 \ r_{11} \ r_{13} \ r_{15} \ r_{17}] \\ \quad = [3.1207 \ 3.8065 \ 4.6089 \ 5.9608 \ 7.7797 \\ \quad \quad 11.6149 \ 19.1984 \ 66.1992] \end{cases}$$

Fig. 9 illustrates the scroll generating circuit to achieve 3, 5, 7 and 9 scrolls based on the inductorless Chua's circuit. The statuses of the switches (S_1, S_2, S_3) are as follows: (off, off, off) for 3, (on, off, off) for 5, (on, on, off) for 7, and (on, on, on) for 9 scrolls, respectively. Simulation and experimental results are also depicted in the same figure. The same principle and the circuit are applied to the case of Wien bridge oscillator. As shown in Fig. 10, both simulation and experimental results confirm the successful applications.

The circuit structure as well as the design formulas can be readily applied to generate even numbers of scroll. Consider the cases of 4 and 6

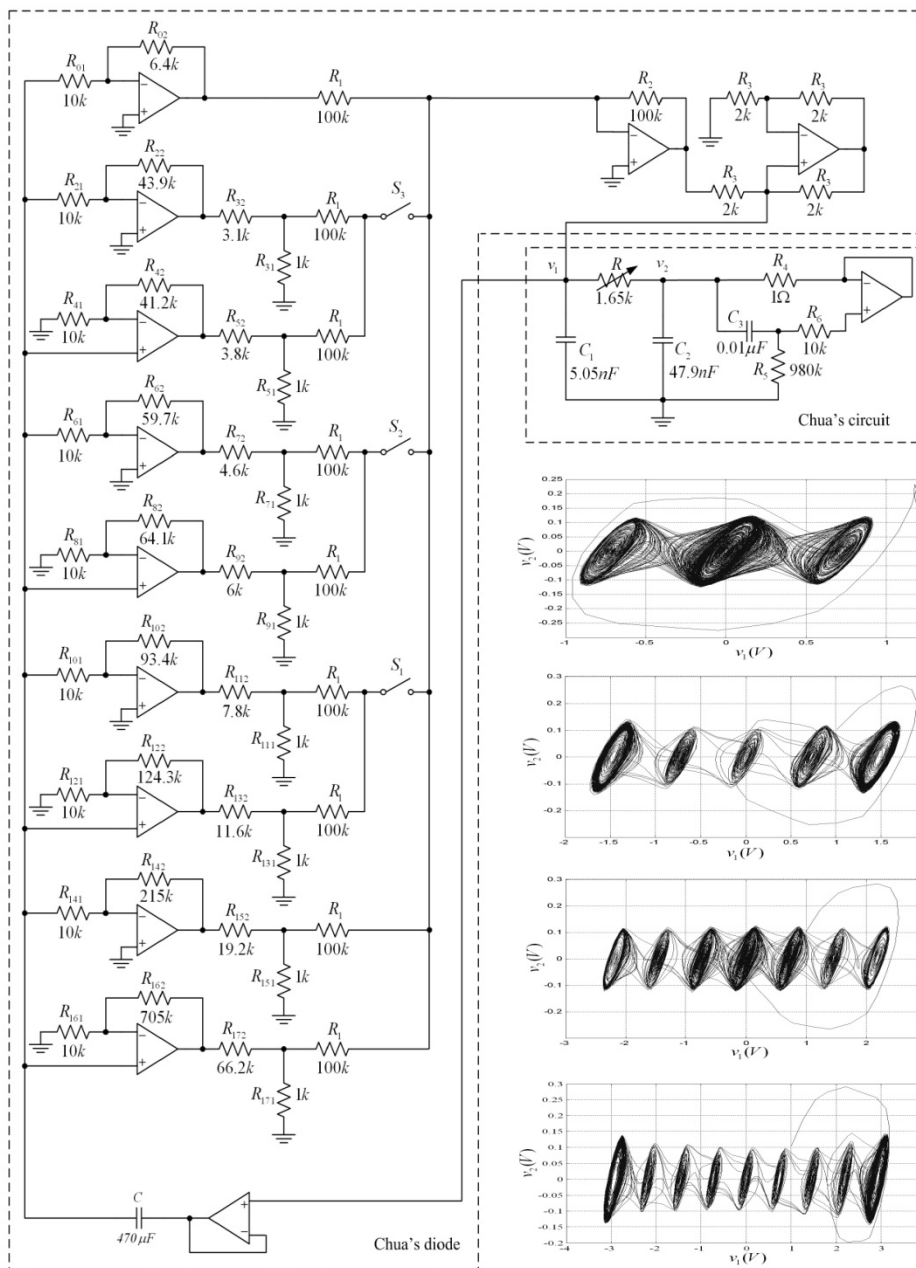
scrolls, the following conductances are assigned: $G_0 = G_2 = G_4 = -0.852mS$, and $G_1 = G_3 = G_5 = -0.32mS$. Eqs. (10)-(13) are applied to calculate the breakpoints, and the normalized resistances obtained as: $E_r = [E_1 \ E_2 \ E_3 \dots E_9] = [0.2000 \ 0.5441 \ 0.9441 \ 1.2881 \ 1.6881]$, and

$$\begin{cases} r_{2j} = [r_0 \ r_2 \ r_4 \ r_6 \ r_8 \ r_{10}] \\ \quad = [0.6400 \ 8.4736 \ 10.1060 \ 15.1516 \ 25.2966 \\ \quad \quad 71.5000] \\ r_{2j+1} = [r_3 \ r_5 \ r_7 \ r_9 \ r_{11} \ r_{13} \ r_{15} \ r_{17}] \\ \quad = [6.9639 \ 9.4380 \ 13.2402 \ 23.7149 \ 66.1992]. \end{cases}$$

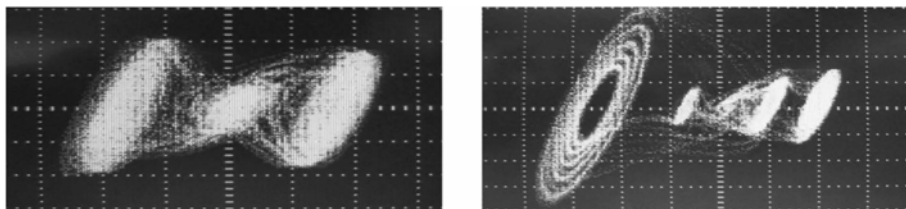
Using the same building block shown in Fig. 8, one can realize the even scroll generating circuit as illustrated in Fig. 11. The circuit diagrams in the insets of Fig. 11(a) represent the Chua's diode, the inductorless Chua's circuit, and the Wien bridge oscillator. The first chaotic core is the inductorless Chua's circuit of which simulated responses are depicted in Fig. 11(b). When the Wien bridge oscillator is in use, the inductorless Chua's circuit is disconnected at the point "a" at which the Wien bridge oscillator is connected instead. There are 2 main switches for scroll generation. To generate 4 and 6 scrolls, the switches ($S1, S2$) must be (on,off), and (on,on), respectively. Fig. 12 illustrates the experimental results of even scroll generation with the inductorless Chua's circuit, and the Wien bridge oscillator used as the chaotic core circuits. Both

simulated and experimental results show very nice agreements, and confirm the successful applications of the scroll generating technique. During the experiments, setting up the initial conditions

through adjusting the corresponding components was not difficult providing that good quality components were used.

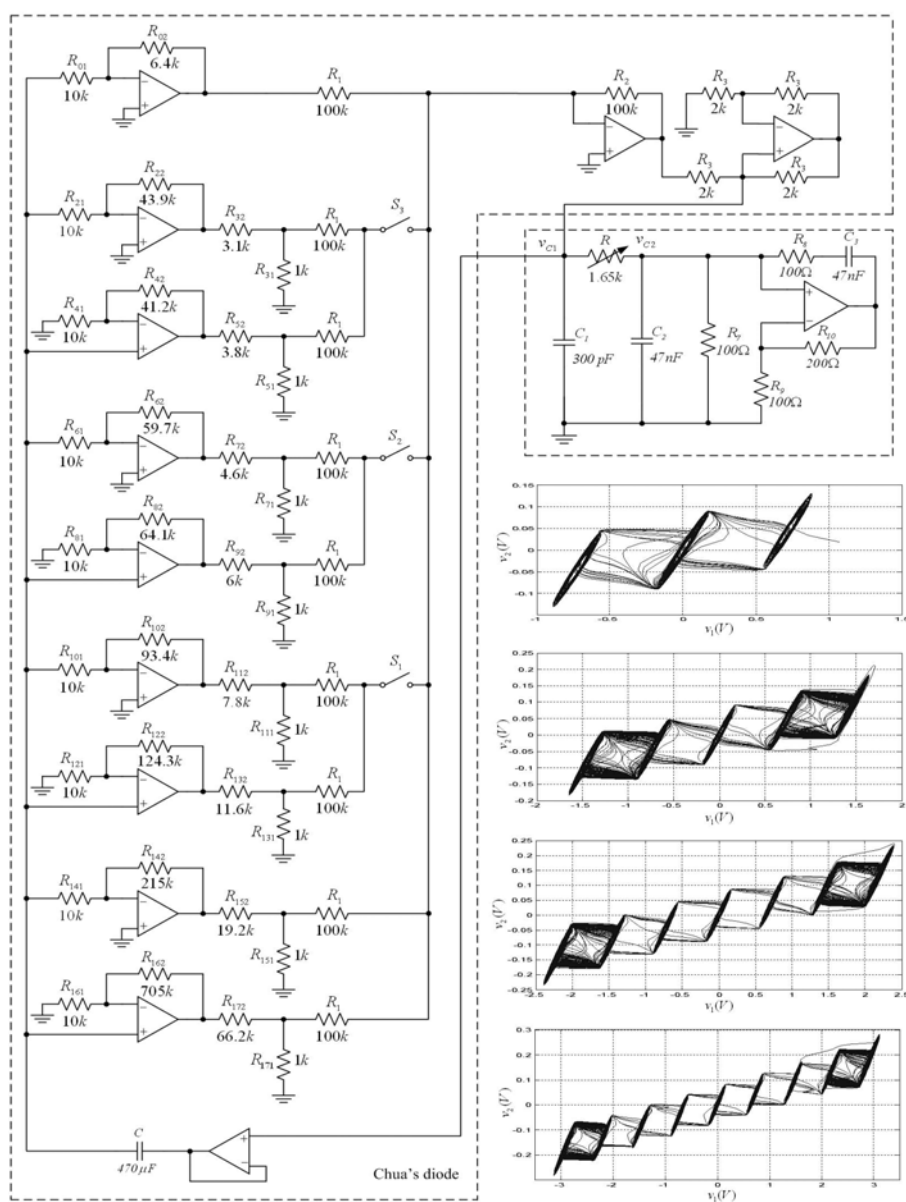


(a) scroll generating circuit and simulation results

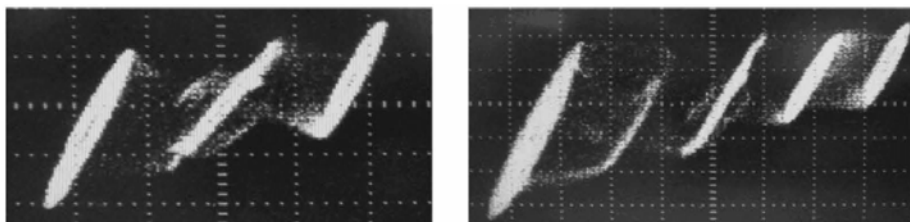


(b) experimental results

Fig. 9 Odd-scroll generating circuit based on the inductorless Chua's circuit.

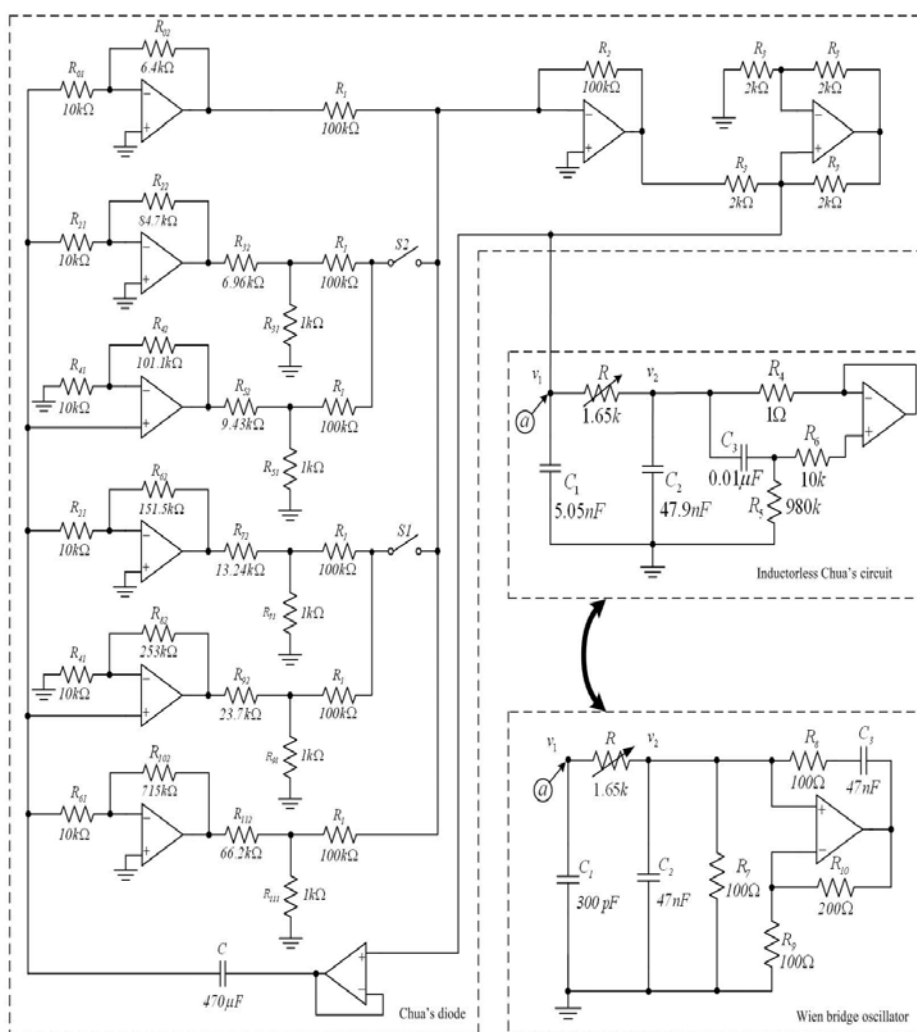


(a) scroll generating circuit and simulation results

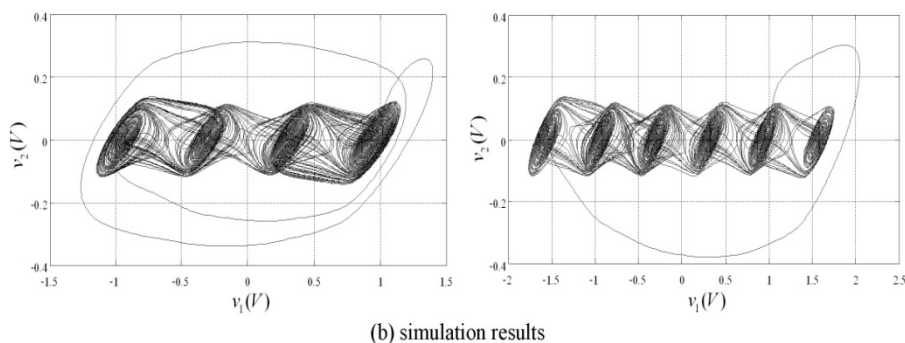


(b) experimental results

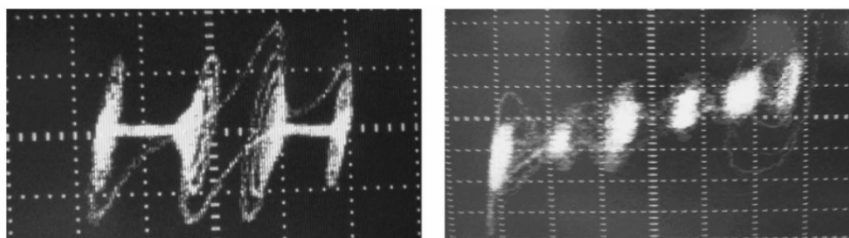
Fig. 10 Odd-scroll generating circuit based on the Wien bridge oscillator.



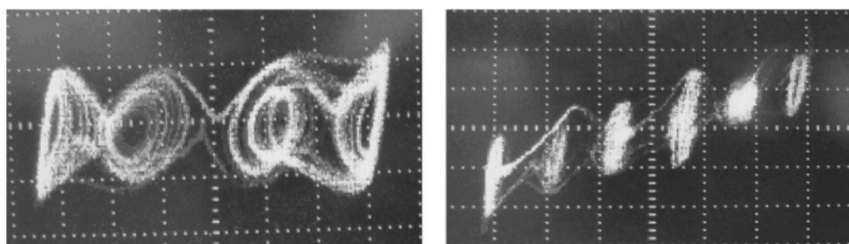
(a) scroll generating circuit



(b) simulation results
 Fig. 11 Even-scroll generating circuit based on the inductorless Chua's circuit and the Wien bridge oscillator.



(a) 4 and 6 scrolls generated from the inductorless Chua's circuit.



(b) 4 and 6 scrolls generated from the Wien bridge oscillator.

Fig.12 Experimental results.

4 Conclusion

The principles of the scroll generating circuit, the Chua's circuits, and the Wien bridge oscillator have been explained in the paper. The paper presents the development of scroll generating circuits capable of generating both odd and even numbers of scroll. Both simulation and practical results are illustrated for successful scroll generations with the inductorless Chua's circuit, and the Wien bridge oscillator. Setting up the initial conditions for the circuits can be simply done through adjusting some interconnected resistances.

References:

- [1] G. Kolumban, M. P. Kennedy, and L. O. Chua, "The role of synchronization in digital communications using chaos-Part II: Chaotic modulation and chaotic synchronization," *IEEE Trans. Circuits Syst. (part-I)*, vol. 45, no.11, pp. 1129-1140, 1998.
- [2] T. Yang, C. W. Wu, and L. O. Chua, "Cryptography based on chaotic systems," *IEEE Trans. Circuits Syst. (part-I)*, vol. 44, no.5, pp. 469-472, 1997.
- [3] A. S. Dmitriev, A. I. Panas, S. O. Starkov, "Experiments on speech and music signals transmission using chaos," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 5, no. 4, pp. 1249-1254, 1995.

- [4] M. P. Kennedy, "Robust op amp realization of Chua's circuit," *FREQUENZ*, vol. 46, pp. 66-80, Apr. 1992.
- [5] O. Morgul, "Inductorless realization of Chua oscillator," *Electronics Letters*, vol. 31, pp.1403-1404, Aug. 1995.
- [6] C. Aissi and D. Kazakos, "An improved realization of the Chua's circuit using RC-op amps," in *Proc. 7th WSEAS Int. Conf. on Signal Processing*, 2008, pp. 115-118.
- [7] I. M. Kyprianidis, "New chaotic dynamics in Chua's canonical circuit," *WSEAS Trans. Circuits and Systems*, vol. 5, no. 11, pp. 1626-1633, 2006.
- [8] I. N. Stouboulos, I. M. Kyprianidis and M. S. Papadopoulou, "Chaotic dynamics in a modified Chua's circuits," *ibid*, pp. 1640-1646.
- [9] I. M. Kyprianidis and M. E. Fotiadou, "Complex dynamics in Chua's canonical circuit with a cubic nonlinearity," *WSEAS Trans. Circuits and Systems*, vol. 5, no. 7, pp. 1036-1043, 2006.
- [10] M. E. Yalcin, J. A. K. Suykens and J. Vandewalle, "Experimental confirmation of 3- and 5-scroll attractors from a generalized Chua's circuit," *IEEE Trans. Circuits Syst. (Part-I)*, vol. 47, pp. 425-429, Mar. 2000.
- [11] Y. Simin, Q. Shuisheng and L. Qinghua, "New results of study on generating multiple-scroll chaotic attractors," *Science in China (Series F)*, vol. 46, no. 2, pp. 104-115, Apr. 2003.
- [12] Y. Simin, M. Zaiguang and Q. Shuisheng, "Generation and synchronization of N-scroll chaotic and hyperchaotic attractors in fourth-order systems," *Chinese Physics*, vol. 13, no. 3, pp. 317-328, Mar. 2004.

ประวัติผู้เขียน

นายวัชรินทร์ จันทะเนตร เกิดเมื่อวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2524 ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 123 หมู่ที่ 6 ตำบลหัวตะพาน อำเภอหัวตะพาน จังหวัดอำนาจเจริญ สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิคอำนาจเจริญ เมื่อปี พ.ศ. 2543 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาไฟฟ้าอุตสาหกรรม ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2545 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2548 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ตำแหน่งอาจารย์อัตราจ้าง สังกัดสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเมื่อปี พ.ศ. 2551 ได้รับอนุมัติทุนบุคคลภายนอกให้ศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในระหว่างที่ทำการศึกษาได้เผยแพร่บทความทางวิชาการเรื่อง **“Scroll Generation with Inductorless Chua’s Circuit and Wien Bridge Oscillator”** ในงานสัมมนาวิชาการนานาชาติ CSS’10 (International Conference Circuits, System and Signal) ระหว่างวันที่ 22-25 กรกฎาคม พ.ศ. 2553 ณ เกาะคอร์ฟู ประเทศกรีซ และบทความตีพิมพ์ในวารสารเรื่อง **“Odd/Even Scroll Generation with Inductorless Chua’s and Wien Bridge Oscillator Circuits”**