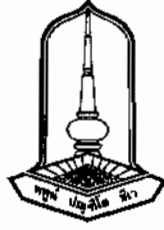


ชุดทดลองวงจรนิวสำหรับเรียนรู้ปรากฏการณ์โกลาหล

ศิรินันท์ ธรรมวิเศษ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
พฤษภาคม 2555
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

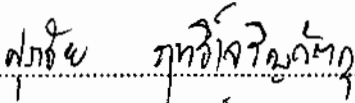


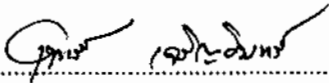
ชุดทดลองวงจรฉั่วสำหรับเรียนรู้ปรากฏการณ์โกลาหล


ศรินันท์ ธรรมวิเศษ

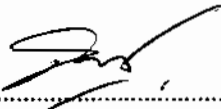
รายงานวิชาโครงการฟิสิกส์ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

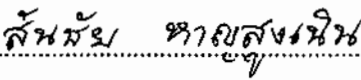
คณะกรรมการสอบ :


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศุภชัย ฤทธิ์เจริญวัตถุ)

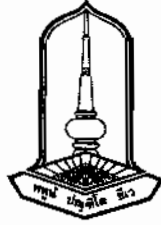

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อุทธี เจริญอินทร์)


..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ปรเมษฐ์ จันทรเพ็ง)


..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ)


..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สันชัย หาญสูงเนิน)

วันที่.....เดือน พฤษภาคม พ.ศ.2555



Chua's Circuit Kit for Learning Chaotic Effects

Sirinan Thamviset

The physics project has been approved to be a partial fulfillment of the requirements for the Bachelor Degree of Science in Applied Physics.

Examining Committee :

..... *Supachai Ritjareonwath* Chairperson
(Dr. Supachai Ritjareonwathu)

..... *Urit Charoen-In* Member
(Dr. Urit Charoen-In)

..... *P. Chumpang* Member and Co-advisor
(Dr. Poramate Chumpang)

..... *[Signature]* Member and Co-advisor
(Asst. Prof. Teerawong Laosuwan)

..... *Sanchai Harnsoongnoen* Member and Advisor
(Dr. Sanchai Harnsoongnoen)

Date.....May 2012

กิตติกรรมประกาศ

โครงการปัญหาพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก อาจารย์ ดร. สันชัย หาญสูงเนิน อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ปรเมษฐ์ จันทร์เพ็ง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ศุภชัย ฤทธิเจริญวัตถุ ประธานกรรมการสอบและอาจารย์ ดร. อุฤทธิ์ เจริญอินทร์ กรรมการสอบ ซึ่งได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตรวจสอบแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้โครงการปัญหาพิเศษฉบับนี้ถูกต้อง มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอน ตลอดจนให้ คำปรึกษาในเรื่องการทำงานทุกอย่างให้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการทำ โครงการปัญหาพิเศษนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาฟิสิกส์ทุกคนที่ให้ความสนใจในการทำโครงการปัญหาพิเศษ ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับบิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ให้ความสนใจและ สนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด และขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องทำให้โครงการปัญหาพิเศษ ครั้งนี้สำเร็จไปด้วยดี

ศิรินันท์ ธรรมวิเศษ

เรื่อง	ชุดทดลองวงจรฉั่วสำหรับเรียนรู้ปรากฏการณ์โกลาหล
นิสิต	นางสาวศิรินันท์ ธรรมวิเศษ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.สันชัย หาญสูงเนิน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ปรเมษฐ์ จันทร์เพ็ง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรพงศ์ เหล่าสุวรรณ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.) สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2555

บทคัดย่อ

ทฤษฎีความโกลาหลเป็นหัวข้อที่กำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับศาสตร์ความรู้ต่างๆ ทุกแขนงทั้งด้านวิทยาศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ สังคมศาสตร์ หรือ ศิลปกรรมศาสตร์ เป็นต้น แต่ในปัจจุบันทฤษฎีความโกลาหลยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ดังนั้นในโครงการปัญหาพิเศษนี้จึงต้องการศึกษาและพัฒนาชุดทดลองสำหรับเรียนรู้ปรากฏการณ์โกลาหลโดยใช้วงจรฉั่ว ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างง่ายที่ประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานไม่เชิงเส้น โดยในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำเสมือนขึ้นเพื่อใช้ประกอบเป็นวงจรฉั่วสำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง ตัวต้านทานไม่เชิงเส้นถูกออกแบบโดยใช้โครงข่ายออปแอมป์ ส่วนตัวเหนี่ยวนำเสมือนนั้นออกแบบตามวงจรของ Gopakumar จากการจำลองและทดลองจริงพบว่าวงจรฉั่วที่ประกอบด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ได้ทำการออกแบบสามารถสร้างสัญญาณโกลาหลได้ทั้งที่เป็นวงม้วนเดี่ยวและวงม้วนคู่ เมื่อนำผลการจำลองและทดลองจริงมาเปรียบเทียบกับพบว่ามีคล้ายคลึงกัน จะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

TITLE	Chua's Circuit Kit for Learning Chaotic Effects
AUTHOR	Miss Sirinan Thamviset
ADVISOR	Dr. Sanchai Harnsoongnoen
CO - ADVISOR	Dr. Poramate Chaunpang
CO - ADVISOR	Asst. Prof. Teerawong Laosuwan
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics
University	Maharakham University DATE 2012

ABSTRACT

Chaos theory is a field of study in mathematics, with applications in several disciplines including physics, engineering, economics, biology, and philosophy. Chaos theory generally focuses on of dynamic systems that are highly sensitive to initial conditions. This effect is referred to as the butterfly effect. However, chaos theory is limited to a few people. Therefore, the aim of this project is to study and develop Chua's circuit kit for investigating chaotic effects. Chua's circuits are simple and consist of a linear resistor, an inductor, a nonlinear resistor and two capacitors. In this study, the nonlinear resistor and inductor were designed to implement the chua's circuit that can generate the chaotic signal. The nonlinear resistor was implemented using an op-amps network and the virtual inductor was based on the circuit proposed by Gopakumar. The results from simulation show that the designed Chua circuit can create two types of chaotic signals, the single scroll and the double scroll. The experiment results agree to the simulation results.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	จ
บทคัดย่อภาษาไทย	ฉ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
สารบัญ	ซ
สารบัญรูปภาพ	ญ
สารบัญตาราง	ฎ
1. บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ผลที่ได้รับ	2
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	3
2.2 ประวัติความเป็นมาของทฤษฎีโกลาหลโดยย่อ	3
2.3 ระบบพลวัตที่เกิดพฤติกรรมโกลาหล	8
2.4 วงจรฉั่ว	13
3. วิธีการดำเนินงานและวิธีการทดลอง	
3.1 การออกแบบตัวด้านทานไม่เชิงเส้น	27
3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเสมือน	28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4. ผลการทดลอง	
4.1 การออกแบบตัวต้านทานไม่เชิงเส้น	30
4.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเสมือน	32
4.3 วงจรฉั้วที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้น	40
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
บรรณานุกรม.....	45
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก รูปประกอบการจำลองและทดลองจริง.....	47
ประวัติผู้ศึกษา.....	63

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาพฤติกรรมความโกลาหล	4
2.2 พฤติกรรมโกลาหลแบบมีขอบเขตของเซน	5
2.3 พฤติกรรมโกลาหลแบบไม่มีขอบเขตของอาร์	6
2.4 พฤติกรรมที่ไม่ใช่แบบโกลาหลของระบบวงกลม	6
2.5 พฤติกรรมแบบโกลาหลของระบบลอเรนซ์	7
2.6 อนุกรมเวลาและอำนาจ	7
2.7 แผนภาพจุดแยกสองราก	8
2.8 พฤติกรรมของระบบแวนเดอร์โพลเปลี่ยนแปลงตามค่า $k=0.2$ และ 1	9
2.9 พฤติกรรมของระบบลอเรนซ์.....	11
2.10 ผลการจำลองสมการรอสเลอร์ในโดเมนเวลา	12
2.11 ผลการจำลองสมการรอสเลอร์ในปริภูมิสเตต ($x y z$)	13
2.12 วงจรฉั่วแบบพื้นฐาน	13
2.13 ช่วงความชันของความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น	14
2.14 โครงข่ายออปแอมป์ที่ใช้เป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น	15
2.15 วงจรความต้านทานเชิงลบ	15
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 2.15.....	17
2.17 โครงข่ายออปแอมป์ที่คุณลักษณะความไม่เชิงเส้นแบบ 5 ส่วน.....	18
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของความต้านทานเชิงลบ.....	18

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 วงจรฉั้วที่ใช้ตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่สร้างมาจากออปแอมป์	19
2.20 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน.....	20
2.21 วงจรฉั้วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน.....	21
2.22 สัญญาณโกลาทจากวงจรฉั้วแบบวงม้วนเดี่ยว	23
2.23 สัญญาณโกลาทจากวงจรฉั้วแบบวงม้วนคู่.....	24
3.1 วิธีการดำเนินงานและวิธีการทดลอง.....	26
3.2 ตัวต้านทานไม่เชิงเส้น.....	27
3.3 ตัวเหนี่ยวนำเสมือน	28
3.4 วงจรฉั้วที่ประกอบขึ้นจากตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำเสมือน ที่ได้ทำการออกแบบ.....	29
4.1 ตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่ออกแบบโดยใช้โครงข่ายออมแอมป์	30
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่สร้าง จากโครงข่ายออปแอมป์	31
4.3 วงจรฉั้วที่ประกอบด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำขนาด 20mH	33
4.4 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (K. Gopakumar, 2011)	34
4.5 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน.....	35
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่โชนแนซของวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน	36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน.....	38
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่รีโซแนนซ์ของวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน.....	39
4.9 วงจรฉว้ที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้น.....	40

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าอุปกรณ์ภายในวงจรตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่สร้างจากโครงข่ายออมแอมป์	31
4.2 ค่าอุปกรณ์ภายในวงจรฉั้วที่ประกอบด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้น และตัวเหนี่ยวนำค่า 20mH	32
4.3 ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในทดสอบวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนของ K. Gopakumar	34
4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน.....	39
4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรฉั้วที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือน	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

จากคำกล่าวของ ดร. สมเกียรติ ตั้งกิจวานิชย์ ที่กล่าวไว้ว่า “แม้ว่าปัจจุบันเรื่อง ทฤษฎีความโกลาหล จะไม่ใช่แนวความคิดที่ใหม่อะไรอีกต่อไปแล้ว แต่ก็ยังดูเหมือนว่ามีผู้เข้าใจมันน้อยเหลือเกิน” นั้นก็บ่งบอกได้ว่าในสังคมไทยยังมีคนที่เข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีความโกลาหลอย่างแท้จริงน้อยมาก และที่เข้าใจก็มีจำนวนไม่น้อยที่เข้าใจแบบไม่ถูกต้อง จากคำกล่าวประโยคนี้ของท่าน ดร. สมเกียรติ ตั้งกิจวานิชย์ จึงทำให้ผู้วิจัยมีแนวความคิดและแรงบันดาลใจที่จะสร้างชุดทดลองเพื่อใช้ในการเรียนรู้ปรากฏการณ์โกลาหลขึ้น ความโกลาหลเป็นระบบที่ประกอบด้วยคุณลักษณะที่สำคัญดังต่อไปนี้ มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ไม่ได้เกิดแบบสุ่ม (deterministic) ไวต่อสภาวะเริ่มต้น ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าในระยะยาวได้ นอกจากคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ระบบความโกลาหลยังมีคุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่สำคัญ คือ คุณสมบัติคล้ายกับตัวเอง (self similarity) หรือที่เรียกว่า แฟร็กทัล (fractal) ระบบความโกลาหลเป็นระบบที่มีความสำคัญมากเพราะระบบต่างๆ ในธรรมชาติ ล้วนแล้วแต่เป็นระบบที่ไม่เชิงเส้นและมีความไวต่อสภาวะตั้งต้นด้วยกันทั้งนั้นซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของความโกลาหล ทฤษฎีความโกลาหลมีความสำคัญและมีประโยชน์มากมาย ที่เห็นได้เด่นชัดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ด้าน คือ ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคตของระบบต่างๆในธรรมชาติ ใช้ในการควบคุมและสร้างเสถียรภาพให้กับระบบควบคุมต่างๆและใช้ในการสร้างระบบความโกลาหลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสาร นอกจากนี้ทฤษฎีความโกลาหลยังสามารถนำไปใช้ในงานทางด้านสังคม และเศรษฐศาสตร์ได้อีกด้วย ดังนั้นเพื่อให้เกิดการเรียนรู้ทฤษฎีความโกลาหลสามารถทำได้ง่ายขึ้น เห็นภาพชัดเจนมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการพัฒนาชุดทดลองเพื่อใช้ประกอบในการอธิบายปรากฏการณ์โกลาหลให้เข้าใจง่ายขึ้น โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของวงจรฉั้วมาช่วยในการสร้างและอธิบาย

1.2 วัตถุประสงค์

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีความโกลาหล
2. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวงจรฉั้ว และองค์ประกอบต่างๆ ที่สำคัญของวงจรฉั้ว
3. ออกแบบและสร้างชุดทดลองประกอบการเรียนรู้ทฤษฎีความโกลาหลโดยใช้วงจรฉั้ว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ชุดทดลองประกอบการเรียนรู้ทฤษฎีความโกลาหลที่ทำการพัฒนาในครั้งนี้จะใช้วงจรฉั่วเป็นพื้นฐานในการพัฒนา
2. การจำลองผลการทำงานของวงจรฉั่วที่ทำการออกแบบจะจำลองโดยใช้โปรแกรม Multisim

1.4 ผลที่ได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีความโกลาหลมากยิ่งขึ้น
2. ได้ชุดทดลองประกอบการเรียนรู้เกี่ยวกับทฤษฎีความโกลาหล ทำให้มองเห็นภาพและทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ทฤษฎีความโกลาหล (chaos theory) เป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงลักษณะพฤติกรรมของระบบพลวัต (ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป) โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระบบที่เรียกว่าโกลาหลนี้ จะมีลักษณะที่ปั่นป่วนจนดูคล้ายว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นแบบสุ่มหรือไร้ระเบียบ (random/stochastic) ระบบโกลาหลนี้เป็นระบบแบบไม่สุ่มหรือระบบที่มีระเบียบ ในทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ให้คำจำกัดความของระบบโกลาหลไว้ว่า โกลาหลเป็นระบบแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear system) ประเภทหนึ่งที่มีความไวต่อสภาวะเริ่มต้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ถ้าระบบ 2 ระบบนั้นเริ่มต้นจากสภาวะที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยหรือเกือบจะเหมือนกันทุกประการ เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปสักระยะหนึ่งสภาวะของระบบทั้งสองที่เราสังเกตได้เมื่อเวลาผ่านไปจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เรามักจะได้ยินคำพูดที่นิยมพูดกันอย่างกว้างขวางที่ว่า “เด็ดดอกไม้สะเทือนถึงดวงดาว” หรือ “ผีเสื้อขยับปีกทำให้เกิดพายุ” (จาก “butterfly effect”) ซึ่งมีคนจำนวนไม่น้อยที่ตีความในลักษณะของขนาดความรุนแรงของผลลัพธ์เท่านั้น ระบบโกลาหลนั้นไม่จำเป็นจะต้องแตกต่างกัน ในแง่ของขนาดของผลลัพธ์เสมอไป แต่อาจแตกต่างในแง่ของพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงก็ได้จากตัวอย่างข้างต้น การเปลี่ยนแปลงของระบบทั้งสองนั้นจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมากในขณะที่เริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

2.2 ประวัติความเป็นมาของทฤษฎีความโกลาหลโดยย่อ

ทฤษฎีความโกลาหลถูกศึกษาโดยนักวิทยาศาสตร์หลายๆท่าน โดยศึกษาปัญหาในสาขาที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะไม่มีความเกี่ยวข้องกันในแต่ละปัญหา แต่ปัญหาเหล่านั้นมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีความโกลาหลเหมือนกัน ยกตัวอย่างเช่นว่า ปวงกาเร (Poincare, J.H.) ได้ทำการศึกษาสนามแรงดึงดูดระหว่างกันของวัตถุสามชิ้นที่เรียกว่าปัญหาสามวัตถุ (three-body problem) และค้นพบว่าวงโคจรของวัตถุมีลักษณะไม่เป็นรายคาบ คือไม่มีทางวิ่งซ้ำเป็นวงรอบโดยอาจจะขยายเป็นวงกว้างขึ้นเรื่อย ๆ หรือลู่อื่นเข้าหาจุดใดจุดหนึ่งของปริภูมิ ต่อมาได้มีการศึกษาถึงปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเกี่ยวกับทฤษฎีโกลาหลนี้ โดย เบอร์กอฟ (Birkhoff, G.D.) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาวัตถุสามชิ้น เช่นเดียวกับปวงกาเร แต่เป็นการศึกษาโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น คอลโมโกรอฟ (Kolmogorov, A.N.) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความปั่นป่วนและปัญหาเกี่ยวกับดาราศาสตร์ ส่วนคาร์ทไรท์ (Cartwright, M.L.) และลิตเติลวูด (Littlewood, J.E.) ได้ทำการศึกษาปัญหาทางวิศวกรรมการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุเป็นต้น แต่สำหรับนักวิทยาศาสตร์ที่เป็นผู้

บุกเบิกทฤษฎีความโกลาหลคือ ลอเรนซ์ (Lorenz, E.N.) โดยได้สังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลองทางด้านพยากรณ์อากาศ ในปี ค.ศ. 1961 ลอเรนซ์ได้นำคอมพิวเตอร์มาสร้างแบบจำลองสภาพอากาศ ซึ่งในการคำนวณครั้งถัดมาไม่ต้องการเริ่มการจำลองจากจุดเริ่มต้น เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลก่อนหน้านี้เป็นค่าเริ่มต้น ซึ่งผลที่ได้ปรากฏว่าค่าที่คำนวณมีความแตกต่างจากเดิมโดยสิ้นเชิง เขาพบว่าสาเหตุเกิดจากการปัดเศษของการคำนวณซึ่งมีขนาดน้อยมาก แต่กลับนำไปสู่ความแตกต่างอย่างมากมายซึ่งเรียกว่า ไวต่อสภาวะเริ่มต้น รูปนักวิทยาศาสตร์ทั้ง 6 ท่านได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1



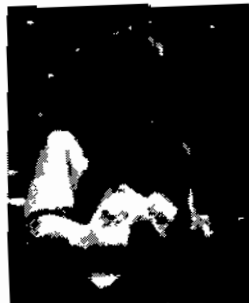
(ก) Jules Henri Poincaré

(1854-1912)



(ข) George David Birkhoff

(1884-1944)



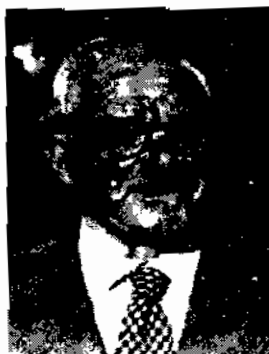
(ค) Andrey Nikolaevich Kolmogorov

(1903-1987)



(ง) Mary Lucy Cartwright

(1900-1998)



(จ) John Edensor Littlewood

(1885-1977)



(ฉ) Edward Norton Lorenz

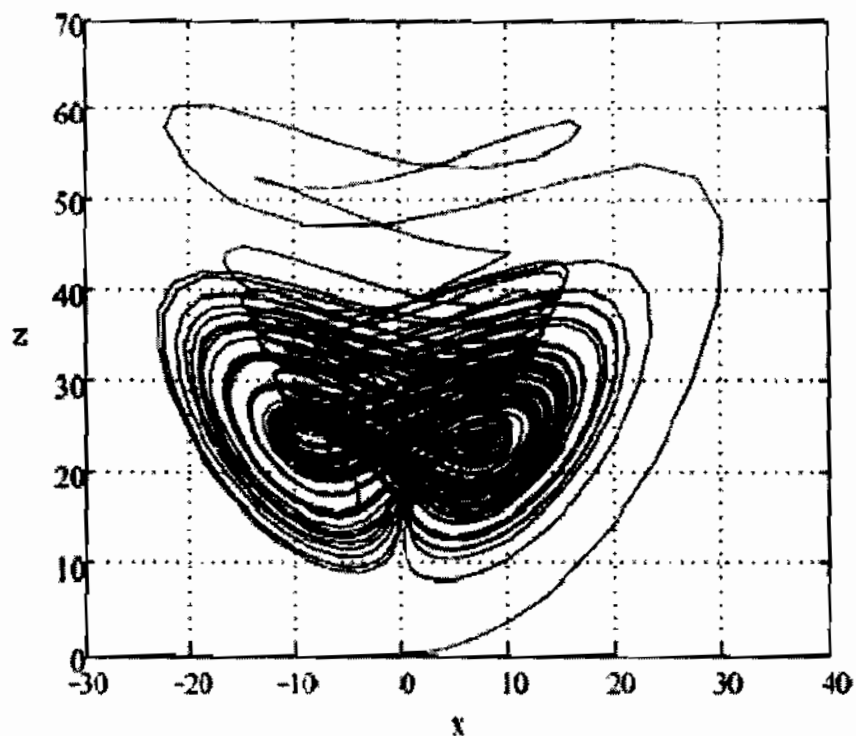
(1917-2008)

รูปที่ 2.1 นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาพฤติกรรมความโกลาหล

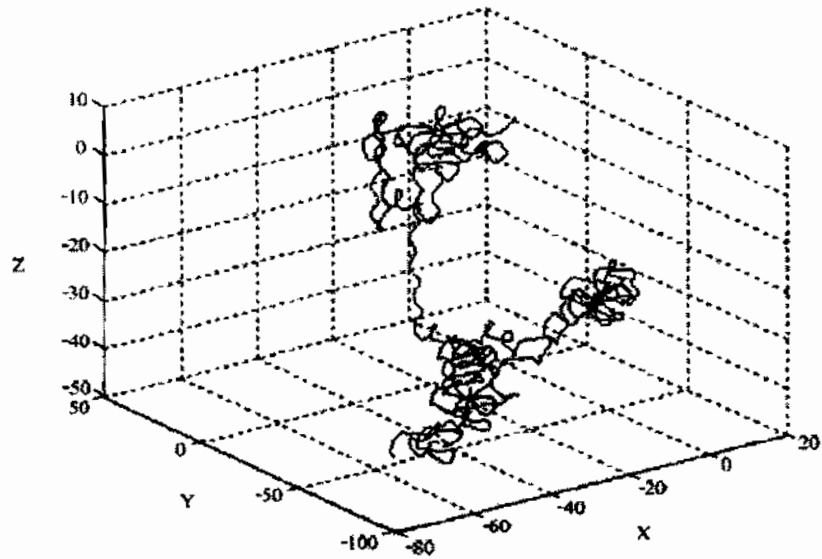
พฤติกรรมของระบบโกลาหลที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ปัจจัยคือ สมการเชิงพลศาสตร์ที่ขึ้นกับเวลา สัมประสิทธิ์ของสมการระบบ (จะมีผลต่อระบบมากสำหรับการเกิดพฤติกรรมโกลาหล) และเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการระบบ (มีผลต่อเส้นทางโคจรของพฤติกรรมโกลาหล) จากปัจจัยที่ทำให้เกิดพฤติกรรมโกลาหลสามารถแบ่งลักษณะการเกิดพฤติกรรมโกลาหลได้เป็น 2 แบบ คือ

1. พฤติกรรมโกลาหลแบบมีขอบเขต หมายถึง พฤติกรรมโกลาหลที่มีการเกิดของจุดใหม่ที่ไม่เกาะกลุ่ม ไม่กระจัดกระจาย สามารถระบุขอบเขตได้อย่างชัดเจน เช่น พฤติกรรมโกลาหลของเชน (Chen) พฤติกรรมโกลาหลของฉว (Chua) พฤติกรรมโกลาหลของลอเรนซ์ (Lorenz) พฤติกรรมโกลาหลของรอสเลอร์ (Rossler) และพฤติกรรมโกลาหลของสปรอตต์ (Sprott) เป็นต้น รูปแบบพฤติกรรมโกลาหลลักษณะนี้แสดงในรูปที่ 2.2

2. พฤติกรรมโกลาหลแบบไม่มีขอบเขต หมายถึง พฤติกรรมโกลาหลที่มีการเกิดของจุดใหม่ที่ไม่เกาะกลุ่ม กระจัดกระจาย ไม่สามารถระบุขอบเขตได้ เช่น พฤติกรรมโกลาหลของอาร์โนลด์ (Arnold) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีพฤติกรรมโกลาหลที่คล้ายการล่องลอยของควีนไฟและการไหลโกลาหลในของไหล เป็นต้น



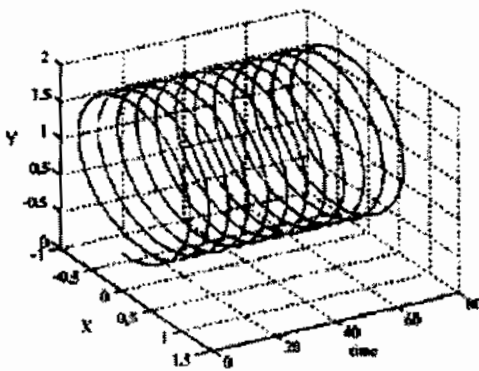
รูปที่ 2.2 พฤติกรรมโกลาหลแบบมีขอบเขตของเชน



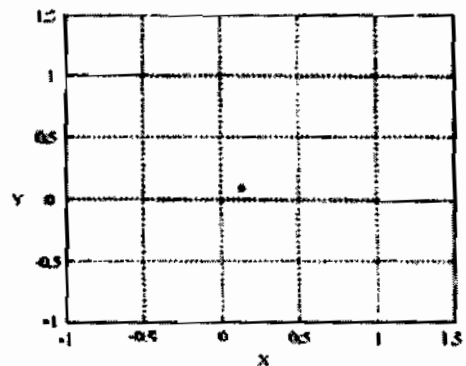
รูปที่ 2.3 พฤติกรรมโกลาหลแบบไม่มีขอบเขตของอาร์โนลด์

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความโกลาหล

1. แผนภาพปวงกาเร (Poincare) เป็นแผนภาพที่ใช้แสดงจุดของเส้นทางการโคจรที่มีแกนประกอบเป็น 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 เช่นแผนภาพปวงกาเรของสมการวงกลมที่ไม่แสดงพฤติกรรมโกลาหล แผนภาพที่ได้จะแสดงเป็นจุดเพียงจุดเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่สำหรับระบบที่แสดงพฤติกรรมโกลาหลแผนภาพปวงกาเรที่ได้จะมีหลายจุดดังแสดงในรูปที่ 2.5



(ก)

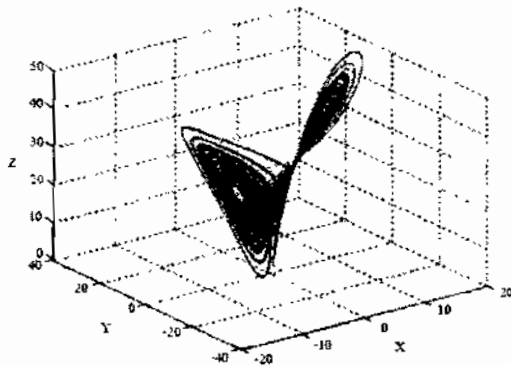


(ข)

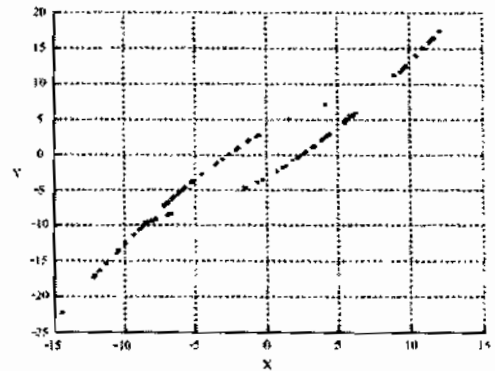
รูปที่ 2.4 พฤติกรรมที่ไม่ใช่แบบโกลาหลของระบบวงกลม

(ก) พฤติกรรมของระบบวงกลม

(ข) แผนภาพปวงกาเรของระบบวงกลม



(ก)



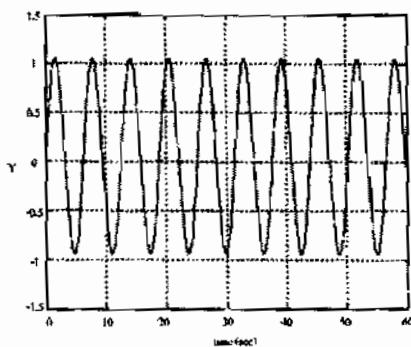
(ข)

รูปที่ 2.5 พฤติกรรมแบบโกลาหลของระบบลอเรนซ์

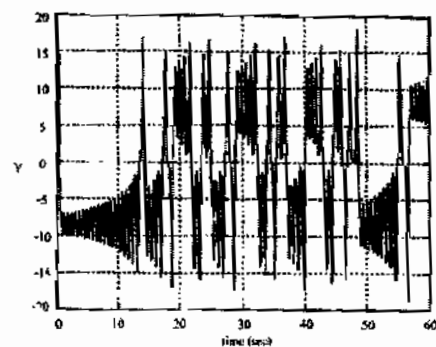
(ก) พฤติกรรมของระบบวงกลม

(ข) แผนภาพปวงกาเรของระบบวงกลม

2. อนุกรมเวลา (time series) และอำพัน (amplitude) แผนภาพอนุกรมเวลาและอำพันเป็นแผนภาพที่ใช้เพื่อสังเกตพฤติกรรมโกลาหลที่เกิดขึ้นของระบบในลักษณะของความถี่และระดับสัญญาณ เช่น อนุกรมเวลาและอำพันของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ไม่ใช่พฤติกรรมโกลาหล และอนุกรมเวลาและอำพันในแกน X, Y และ Z ของลอเรนซ์ ซึ่งมีพฤติกรรมโกลาหลเกิดขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงทางความถี่และอำพันตลอดเวลา รูปที่ 2.6 แสดงรูปคลื่นไซน์และสัญญาณในอนุกรมเวลาที่เกิดพฤติกรรมโกลาหลเพื่อเปรียบเทียบกัน



(ก)



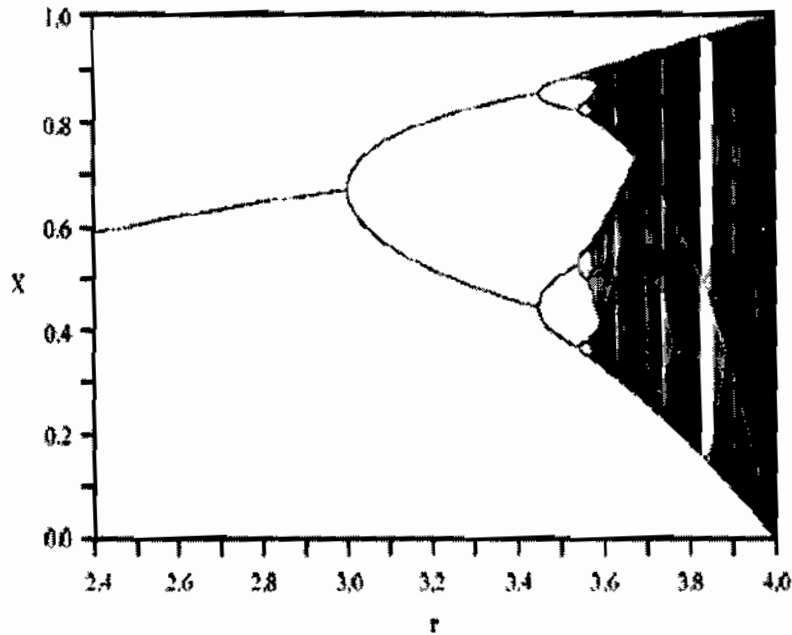
(ข)

รูปที่ 2.6 อนุกรมเวลาและอำพัน

(ก) สัญญาณรูปคลื่นไซน์

(ข) รูปคลื่นของสัญญาณที่แสดงพฤติกรรมโกลาหลตามระบบลอเรนซ์

3. จุดแยกสองราก (bifurcation) แผนภาพในรูปที่ 2.7 เป็นแผนภาพที่ใช้ในการสังเกตพฤติกรรมของการเกิดผลเฉลยของระบบที่เป็นแบบคงเดิม เมื่อสัมประสิทธิ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไป สภาวะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดแบบนี้เรียกว่า สภาวะโกลาหล



รูปที่ 2.7 แผนภาพจุดแยกสองราก

4. ไลยาปูนอฟเอกโปเนนท์ (Lyapunov exponent) เป็นดัชนีระบุการลู่เข้าหรือลู่ออกของระบบภายใต้การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น และการทำงานของระบบผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง โดยแสดงได้ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นโดยอเล็กซานเดอร์ มิเคล โลวิช ไลยาปูนอฟ (Alexander Mikhailovich Lyapunov)

2.3 ระบบพลวัตที่เกิดพฤติกรรมโกลาหล

2.3.1 ระบบแวนเดอร์โพล

ระบบแวนเดอร์โพล เป็นระบบหนึ่งที่สามารถนำมาศึกษาเกี่ยวกับการเกิดพฤติกรรมโกลาหลได้ ในการศึกษาพฤติกรรมนี้สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ k ในสมการแวนเดอร์โพล ซึ่งมีผลทำให้เกิดพฤติกรรมโกลาหลขึ้น สมการแวนเดอร์โพลมีรูปแบบดังนี้

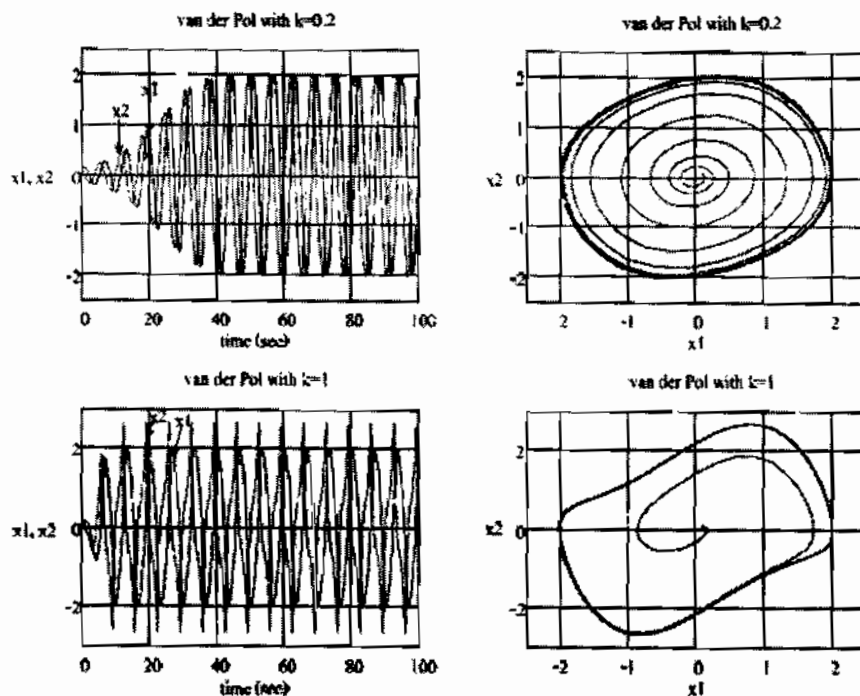
$$\frac{d^2x}{dt^2} - k(1 - x^2) \frac{dx}{dt} + x = 0 \quad (2.1)$$

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 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมในกรณีที่ $k = 0.2$ และ $k = 1$ จะสังเกตได้ว่าเมื่อพารามิเตอร์ k มีค่าสูงขึ้นจะมีผลทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะเสถียร



รูปที่ 2.8 พฤติกรรมของระบบแวนเดอร์โพลเมื่อกำหนดให้ $k = 0.2$ และ 1

2.3.2 ระบบลอเรนซ์

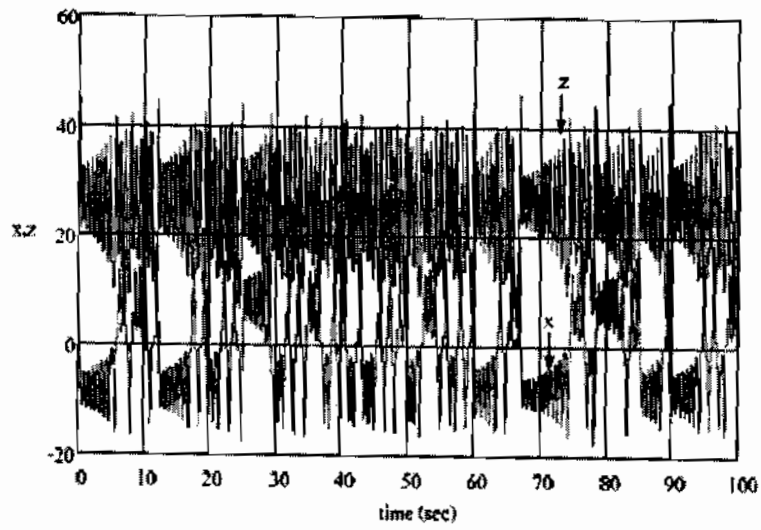
ตัวดึงดูดลอเรนซ์ (Lorenz attractor) เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากสมการลอเรนซ์ ซึ่งคิดค้นโดยเอ็ดเวิร์ด ลอเรนซ์ (Edward Lorenz) ในปี ค.ศ. 1963 เป็นระบบพลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้น ระบบนี้จะแสดงพฤติกรรมโกลาหลสำหรับค่าพารามิเตอร์บางค่าเท่านั้น ซึ่งบางครั้งระบบดังกล่าวนี้แสดงลักษณะที่เรียกว่า ตัวดึงดูดแบบประหลาด (strange attractor) ซึ่งพิสูจน์โดย ทูเคอร์ (W. Taker) ในปี ค.ศ. 2001 ระบบที่ปรากฏพฤติกรรมตามแบบจำลองนี้ได้แก่ เลขเซอร์ ไดนาโมและกังหันน้ำบางชนิด เป็นต้น ตัวดึงดูดลอเรนซ์เขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

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

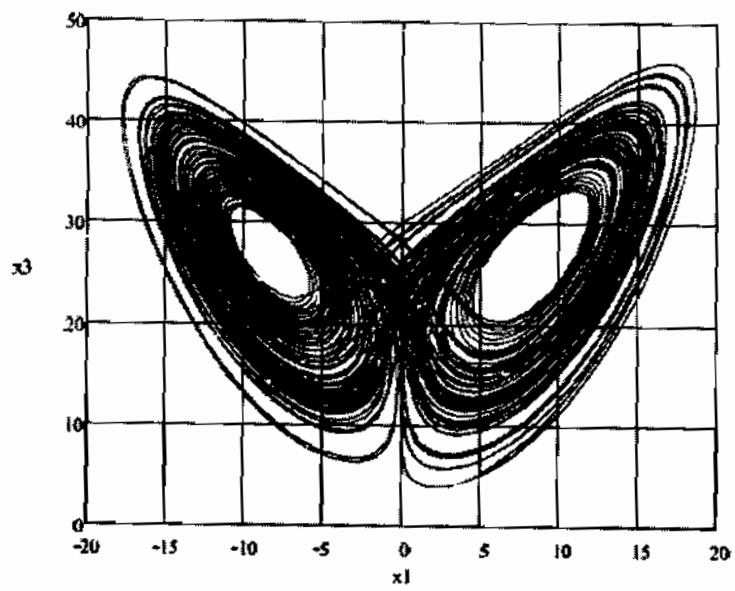
$$\frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y \quad (2.5)$$

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

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



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 พฤติกรรมของระบบลอเรนซ์

(ก) ผลการจำลองสมการลอเรนซ์ในโดเมนเวลา

(ข) ผลการจำลองสมการลอเรนซ์ในปริภูมิสามมิติ

2.3.3 ระบบรอสเลอร์

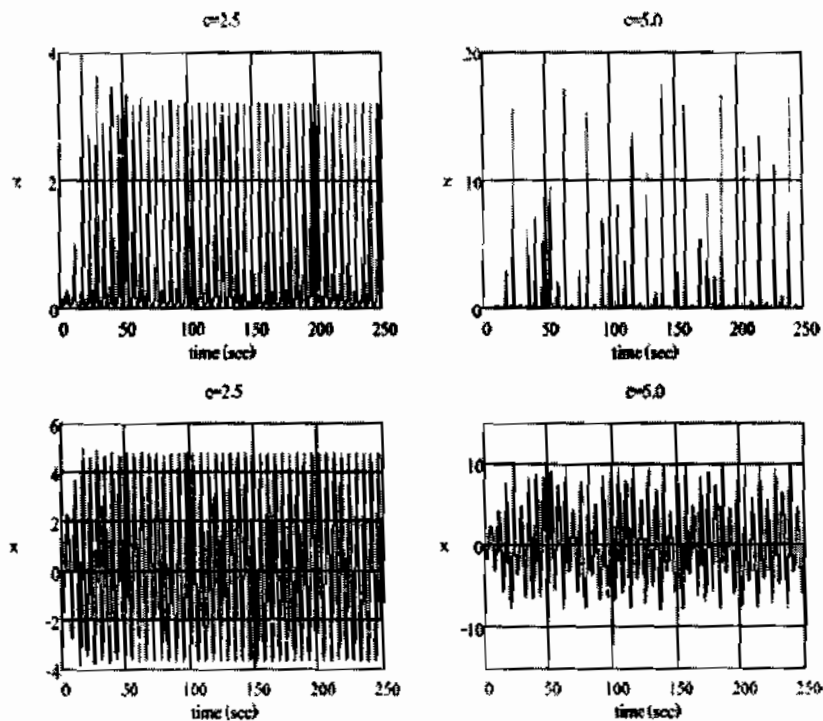
แบบจำลองของรอสเลอร์มีความง่ายกว่าแบบจำลองของลอเรนซ์และมีรูปแบบของสมการดังนี้

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

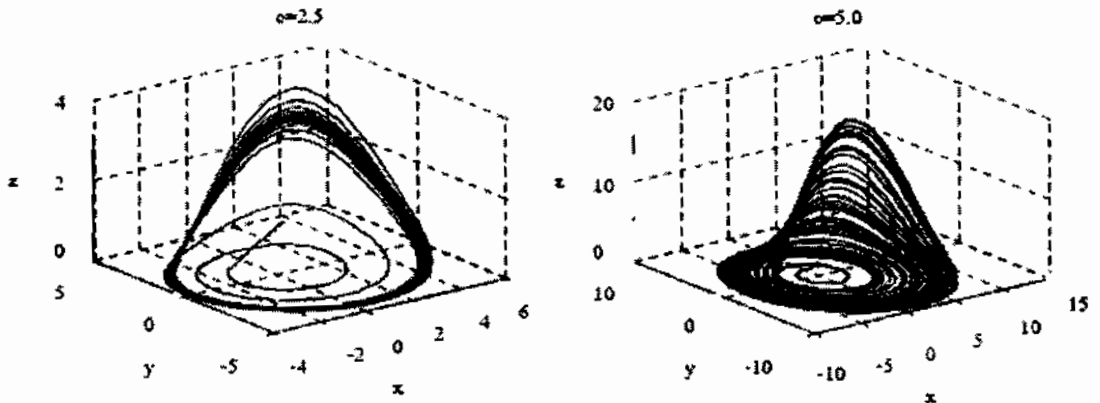
$$\frac{dy}{dt} = x + ay \quad (2.8)$$

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

ซึ่งมีตัวแปรพลวัตของระบบคือ x , y และ z โดยมีพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ xz และมี a , b , c เป็นพารามิเตอร์ การศึกษาสภาวะโกลาหลทำได้โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ a และ b มีค่าคงที่เท่ากับ 0.2 ทั้งคู่ และปรับแปรพารามิเตอร์ c จนกว่าจะเกิดสภาวะโกลาหล พบว่าตัวแปร z เกิดสภาวะโกลาหลเมื่อ $c=2.5$ และ $c=5.0$ ทั้งนี้ได้แสดงผลการจำลองในโดเมนเวลาไว้ในรูปที่ 2.10 และแสดงผลในปริภูมิสเตตไว้ในรูปที่ 2.11



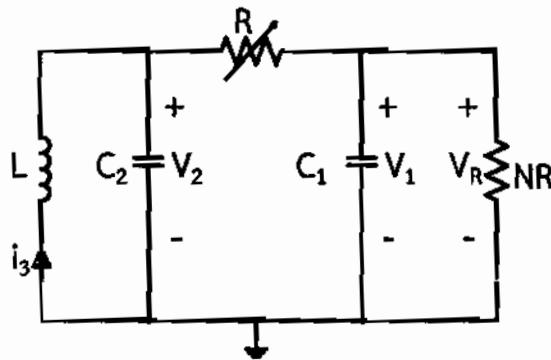
รูปที่ 2.10 ผลการจำลองสมการรอสเลอร์ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.11 ผลการจำลองสมการรอสเลอร์ในปริภูมิสเตต (x, y, z)

2.4 วงจรฉั่ว

วงจรฉั่ว (chua's circuit) เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถสร้างสัญญาณที่เรียกว่าพฤติกรรมโกลาหลได้ วงจรประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานไม่เชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของวงจรที่ส่งผลต่อการเกิดพฤติกรรมโกลาหลคือ ความต้านทานไม่เชิงเส้นหรือที่เรียกว่าฉั่วไดโอด ตัวต้านทานไม่เชิงเส้นนี้ ในทางปฏิบัติสามารถสร้างขึ้นได้จากโครงข่ายออปแอมป์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 รูปที่ 2.19 เป็นการแสดงวงจรฉั่วที่เกิดจากการแทนที่ตัวต้านทานไม่เชิงเส้นด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่สร้างมาจากออปแอมป์



รูปที่ 2.12 วงจรฉั่วแบบพื้นฐาน

วงจรนี้ให้กำเนิดสัญญาณโกลาหล มีสมการพลวัตทางไฟฟ้าดังต่อไปนี้

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R} (v_2 - v_1) - f(v_R) \quad (2.10)$$

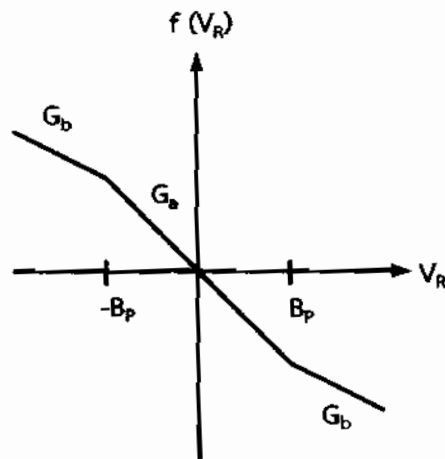
$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R} (v_1 - v_2) + i_L \quad (2.11)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = -v_2 \quad (2.12)$$

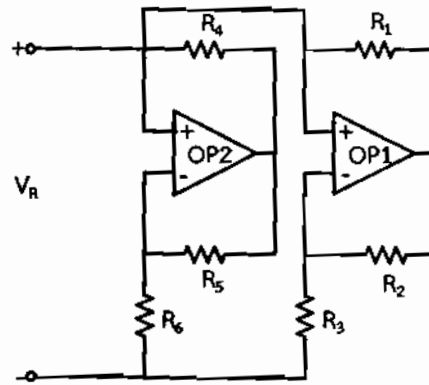
เมื่อ v_1 , v_2 และ i_L คือแรงดันตกคร่อม C_1 , C_2 และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ตามลำดับ ส่วน $f(v_R)$ คือ สมการที่แสดงลักษณะสมบัติของความต้านทานไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.13)

$$f(v_R) = G_b v_R + \frac{1}{2} (G_a - G_b) (|v_R - B_p| - |v_R + B_p|) \quad (2.13)$$

เมื่อ G_a และ G_b คือ ความชันของกราฟลักษณะสมบัติ $f(v_R)$ ช่วงด้านในและด้านนอก ตามลำดับ โดยมี B_p เป็นจุดสิ้นสุดช่วงที่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 2.13

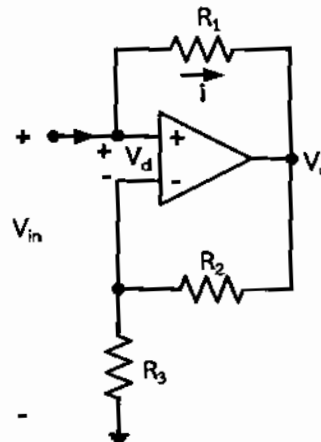


รูปที่ 2.13 ช่วงความชันของความต้านทานแบบไม่เชิงเส้น



รูปที่ 2.14 โครงข่ายออปแอมป์ใช้เป็นตัวต้านทานไม่เชิงเส้น

จากโครงข่ายออปแอมป์ที่ใช้เป็นตัวต้านทานไม่เชิงเส้นสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรความต้านทานเชิงลบ

จากวงจรในรูปที่ 2.15 สมมติให้ออปแอมป์เป็นออปแอมป์ในอุดมคติ ซึ่งกระแส i จะไม่สามารถไหลผ่านเข้าไปในขั้วบวกของออปแอมป์ได้ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณกระแส i ได้ดังนี้

$$i = \frac{V_{in} - V_o}{R_1} \quad (2.14)$$

ในอีกทางหนึ่ง กระแส i ก็ไม่สามารถไหลผ่านเข้าไปยังขั้วลบของออปแอมป์ได้เช่นกันดังนั้นจึงสามารถคำนวณแรงดัน V_{in} ได้ดังนี้

$$V_{in} = V_d + \frac{R_3}{(R_2 + R_3)} V_o \quad (2.15)$$

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_d , V_o และ อัตราขยาย A_v ได้ว่า

$$V_o = A_v V_d$$

เมื่อแทน V_d ที่ได้จากสมการ (2.16) ลงในสมการ (2.15) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_{in} &= \frac{V_o}{A_v} + \frac{R_3}{(R_2 + R_3)} V_o \\ &= \frac{V_o (R_2 + R_3) + R_3 A_v V_o}{A_v (R_2 + R_3)} \\ &= \frac{R_2 + V_o R_3 + R_3 A_v V_o}{A_v (R_2 + R_3)} \\ V_{in} &= \frac{(R_2 + (1 + A_v) R_3) V_o}{A_v (R_2 + R_3)} \end{aligned} \quad (2.16)$$

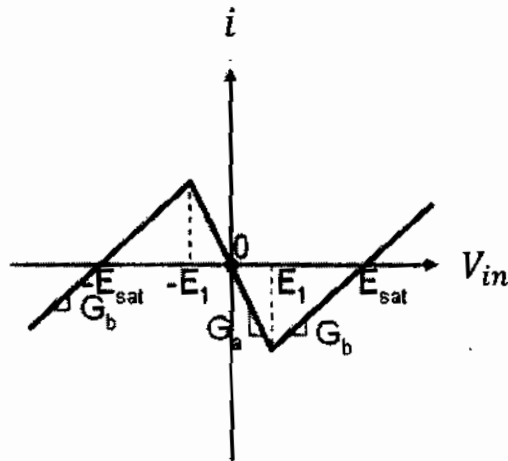
จากความสัมพันธ์ระหว่าง V_o กับ V_{in} สามารถปรับให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมและนำไปแทนในสมการที่ (2.14) ดังนี้

$$i = \frac{((1 + A_v) R_2 + R_3)}{R_2 + R_3 + A_v R_3} V_{in} \quad (2.17)$$

เมื่ออัตราขยายแบบลูปเปิดของออปแอมป์มีค่าสูงมากๆ ($A_v \rightarrow \infty$) ประกอบกับกำหนดให้ $R_1 = R_2$ สมการที่ (2.17) จะกลายเป็น

$$i = -\frac{1}{R_3} V_{in} \quad (2.18)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.18) ไปพร้อมหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{in} กับ i จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นความต้านทานเชิงลบ



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 2.15

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ V_{in} มีค่าสูงขึ้น ความต้านทานก็จะเริ่มมีค่าเป็นบวก เมื่อออปแอมป์เริ่มเกิดการอิ่มตัวในฝั่งบวก ($V_o = E_{sat}$) ซึ่งกระแส i สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.19)

$$i = \frac{V_{in} - E_{sat}}{R_1} \quad (2.19)$$

โดยจุดแบ่งความชัน (E_1) ของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.16 สามารถคำนวณได้จาก

$$E_1 = \frac{R_2 + R_3(1 - A_V)}{A_V(R_2 + R_3)} E_{sat}$$

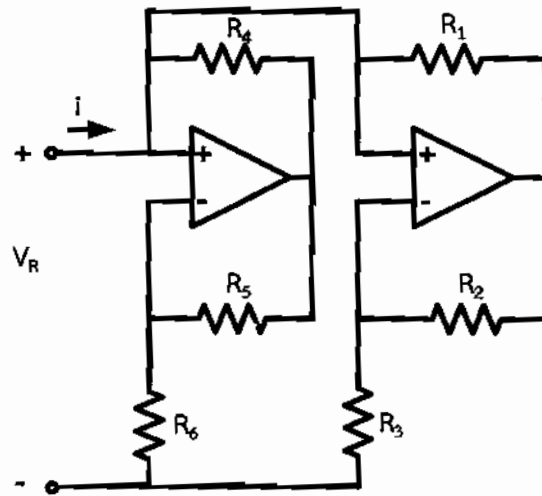
เมื่อพิจารณาให้ ($A_V \rightarrow \infty$) จะได้ว่า

$$E_1 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} E_{sat}$$

เมื่อพิจารณาที่ฝั่งลบ จะได้ว่า

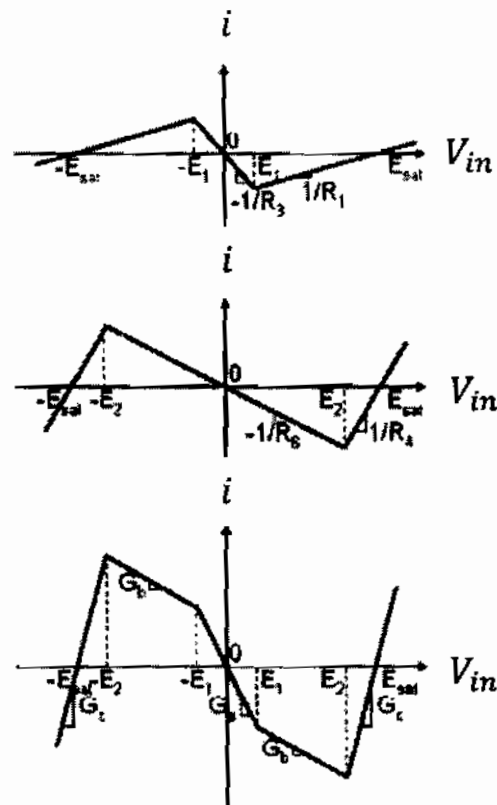
$$E_1 = -\frac{R_3}{R_2 + R_3} E_{sat}$$

แต่สำหรับการศึกษาในครั้งนี้จะสร้างวงจรฉั่วโดยการนำวงจรตัวต้านทานเชิงลบที่แสดงในรูปที่ 2.15 มาต่อขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 โครงข่ายออปแอมป์ที่แสดงคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 5 ส่วน

จากรูปที่ 2.17 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าแบบไม่เชิงเส้นได้จากรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของความต้านทานเชิงลบ

โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

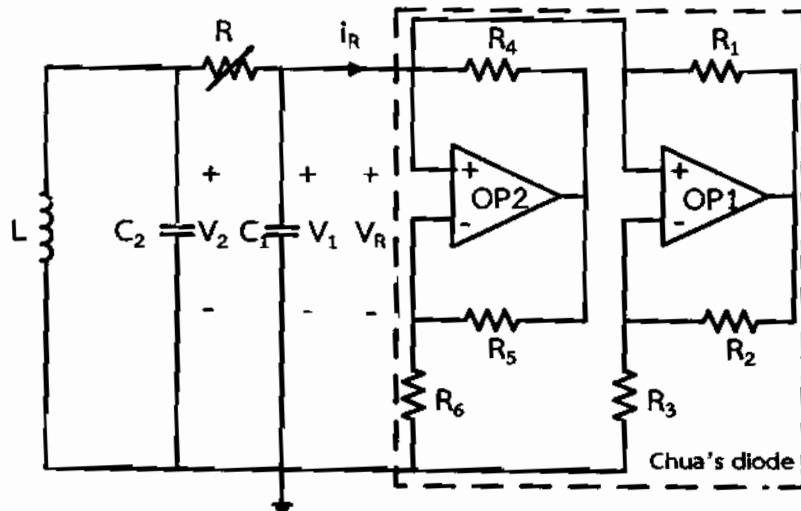
$$G_a = -\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_6}$$

$$G_b = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_6}$$

$$G_c = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4}$$

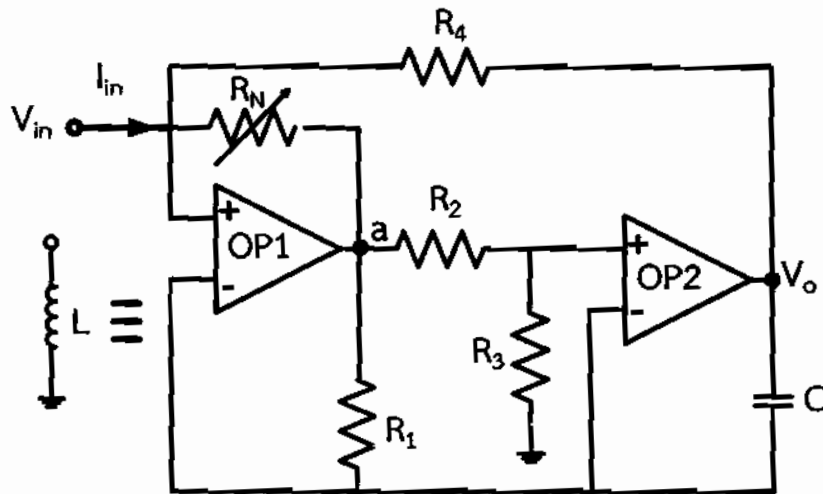
$$E_1 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} E_{sat}$$

$$E_2 = \frac{R_6}{R_5 + R_6} E_{sat}$$



รูปที่ 2.19 วงจรฉนวนที่ใช้ตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่สร้างมาจากออปแอมป์

ความถี่ของสัญญาณโกลาหลที่ได้จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ หากต้องการสัญญาณความถี่ต่ำ ต้องเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ แต่จะประสบปัญหาเกี่ยวกับขนาดทางกายภาพของตัวเหนี่ยวนำที่โตขึ้นด้วย ซึ่งทำให้การสร้างเป็นไปได้ยากและไม่สะดวกในการใช้งาน จากปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (gyrator หรือ simulated inductor) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และเมื่อรวมวงจรเข้าด้วยกันจะได้วงจรอ้วที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำเสมือนดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน

จากวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่แสดงในรูปที่ 2.20 สามารถหาเงื่อนไขความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{V_{in}-V_o}{R_4} + \frac{V_{in}-V_a}{R_N} - I_{in} = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{V_{in}-V_a}{R_1} + \frac{V_{in}-V_o}{Z_c} = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{V_{in}-V_a}{R_2} + \frac{V_{in}-0}{R_3} = 0 \quad (2.22)$$

$$V_{in} + \frac{R_2}{R_3} V_{in} = V_a$$

$$V_a = V_{in} \left(\frac{R_3+R_2}{R_3} \right) \quad (2.23)$$

แทนสมการ (2.22) ลงใน (2.21) จะได้

$$\begin{aligned}
 V_{in} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{Z_C} \right) &= \frac{V_a}{R_1} + \frac{V_o}{Z_C} \\
 &= \frac{V_o}{Z_C} + V_{in} \left(\frac{R_3 + R_2}{R_3 R_1} \right) \\
 \frac{V_o}{Z_C} &= V_{in} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{Z_C} - \frac{(R_2 + R_3)}{R_3 R_1} \right) \\
 V_o &= V_{in} \left(\frac{Z_C}{R_1} + 1 - \frac{(R_2 + R_3)}{R_1 R_3} Z_C \right) \\
 &= V_{in} \left(\frac{Z_C R_3 + R_1 R_3 - Z_C (R_2 + R_3)}{R_1 R_3} \right) \tag{2.24}
 \end{aligned}$$

แทนสมการ (2.24) ลงใน (2.20) จะได้

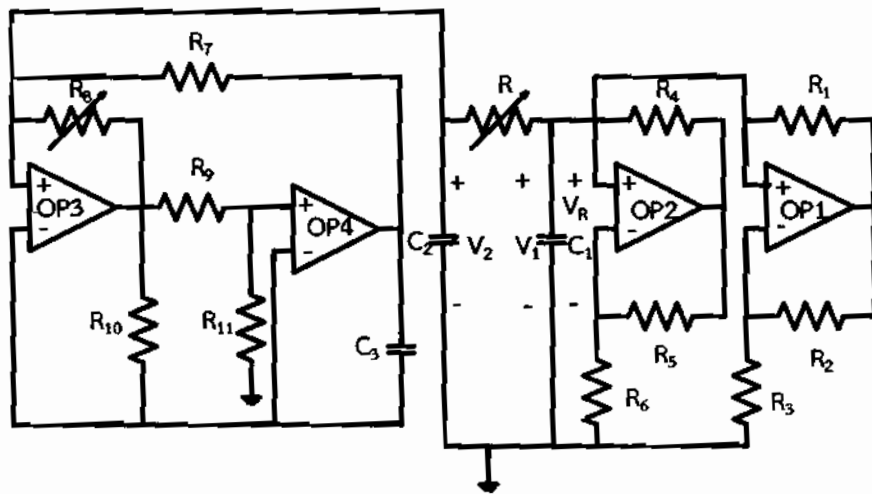
$$\begin{aligned}
 V_{in} \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_N} \right) - I_{in} &= \frac{V_o}{R_4} + \frac{V_a}{R_N} \\
 &= V_{in} \left(\frac{Z_C R_3 + R_1 R_3 - Z_C (R_2 + R_3)}{R_1 R_3 R_4} \right) + V_{in} \left(\frac{R_3 + R_2}{R_3 R_N} \right) \\
 &= V_{in} \left(\frac{Z_C R_3 R_N + R_1 R_3 R_N - Z_C R_N (R_2 + R_3) + R_1 R_4 (R_3 + R_2)}{R_1 R_3 R_4 R_N} \right) \\
 V_{in} \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_N} \right) - I_{in} &= V_{in} \left(\frac{Z_C R_3 R_N + R_1 R_3 R_N - Z_C R_N (R_2 + R_3) + R_1 R_4 (R_2 + R_3)}{R_1 R_3 R_4 R_N} \right) \\
 I_{in} &= V_{in} \left(\frac{R_4 + R_3}{R_4 R_N} - \frac{Z_C R_3 R_N - R_1 R_3 R_N + Z_C R_N (R_2 + R_3) - R_1 R_4 (R_2 + R_3)}{R_1 R_3 R_4 R_N} \right) \\
 &= V_{in} \left(\frac{R_1 R_3 R_4 + R_1 R_3 R_N - Z_C R_3 R_N - R_1 R_3 R_N + Z_C R_N (R_2 + R_3) - R_1 R_4 R_2 - R_1 R_4 R_3}{R_1 R_3 R_4 R_N} \right) \\
 &= V_{in} \left(\frac{Z_C R_N R_2 + Z_C R_N R_3 - R_1 R_4 R_2 - Z_C R_3 R_N}{R_1 R_3 R_4 R_N} \right) \\
 \frac{V_{in}}{I_{in}} &= \frac{R_1 R_3 R_4 R_N}{Z_C R_N R_2 - R_1 R_4 R_2} = \frac{R_1 R_3 R_4 R_N}{R_2 (Z_C R_N - R_1 R_4)} \\
 Z &= \frac{R_1 R_3 R_4 R_N}{R_2 (Z_C R_N - R_1 R_4)} = \frac{R^2 R_N}{Z_C R_N - R^2} = \frac{R_N}{(Z_C R_N / R^2) - 1} \tag{2.25}
 \end{aligned}$$

โดยที่ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$

ถ้าประมาณว่า $\frac{Z_C R_N}{R^2} \gg 1$; $Z = \frac{R_N}{Z_C R_N} R^2$ $Z = \frac{R^2}{Z_C} = j\omega C R^2$

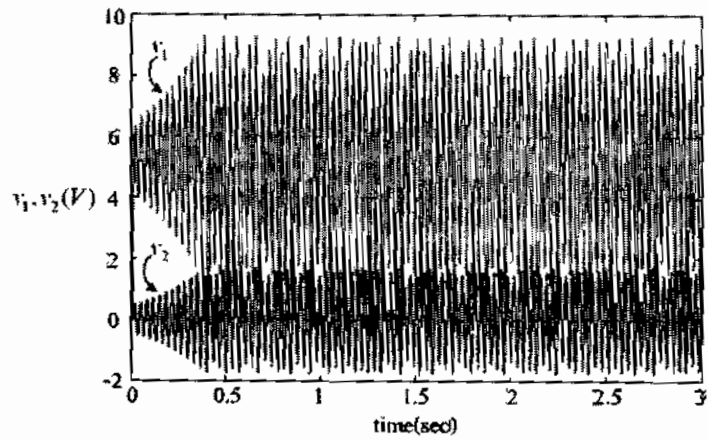
จากเงื่อนไขความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถประมาณความเหนี่ยวนำเสมือนได้ ดังสมการที่ 2.25

$$L = R^2 C \quad (2.25)$$

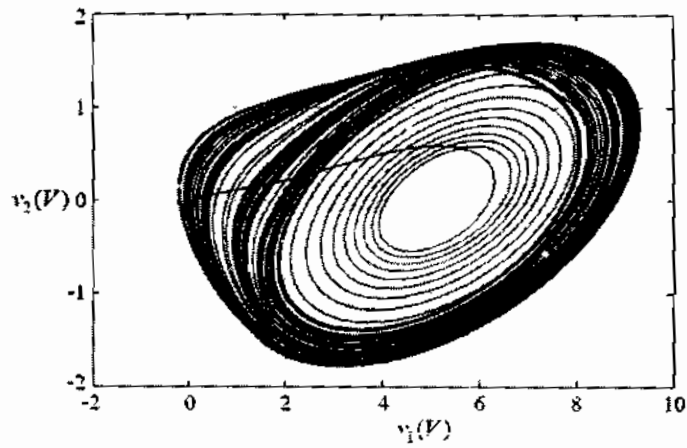


รูปที่ 2.21 วงจรจั่วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน

ลักษณะของสัญญาณโกลาหลพื้นฐานที่ได้จากวงจรถั่ว มีสองรูปแบบได้แก่ แบบวงม้วนเดี่ยว (Single scroll) และแบบวงม้วนคู่ (Double scroll) รูปแบบของสัญญาณที่ได้นี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่อยู่ระหว่าง C_1 และ C_2 ในวงจรถั่ว ลักษณะของสัญญาณโกลาหลที่เกิดขึ้นทั้งสองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 และ 2.23 ตามลำดับ



(ก)

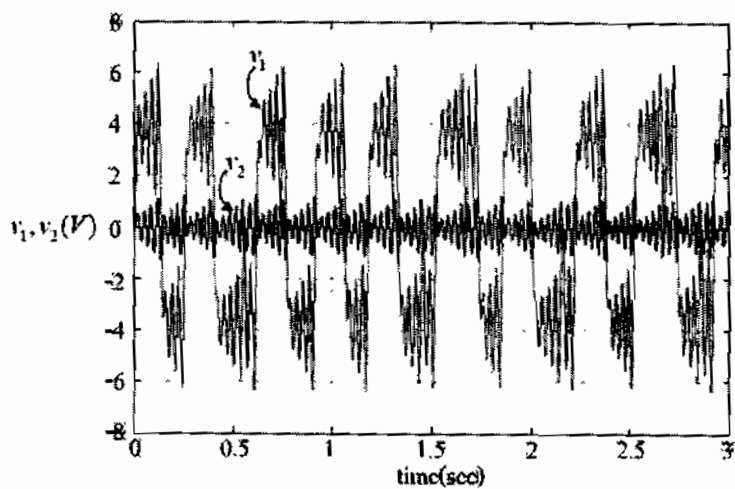


(ข)

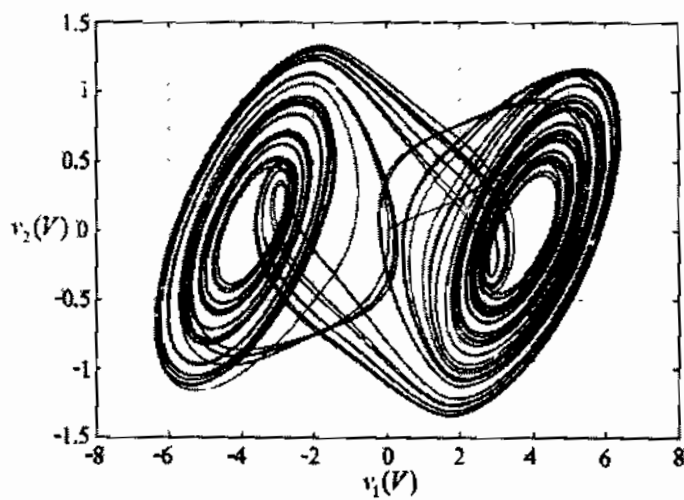
รูปที่ 2.22 สัญญาณโกลาหลจากวงจรฉั้วแบบวงม้วนเดี่ยว

(ก) สัญญาณโกลาหลจากวงจรฉั้วแบบวงม้วนเดี่ยวในโดเมนเวลา

(ข) สัญญาณโกลาหลจากวงจรฉั้วแบบวงม้วนเดี่ยวในปริภูมิสเตต



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.23 สัญญาณโกลาหลจากวงจรฉั้วแบบวงม้วนคู่

(ก) สัญญาณโกลาหลจากวงจรฉั้วแบบวงม้วนคู่ในโดเมนเวลา

(ข) สัญญาณโกลาหลจากวงจรฉั้วแบบวงม้วนคู่ในปริภูมิสเตต

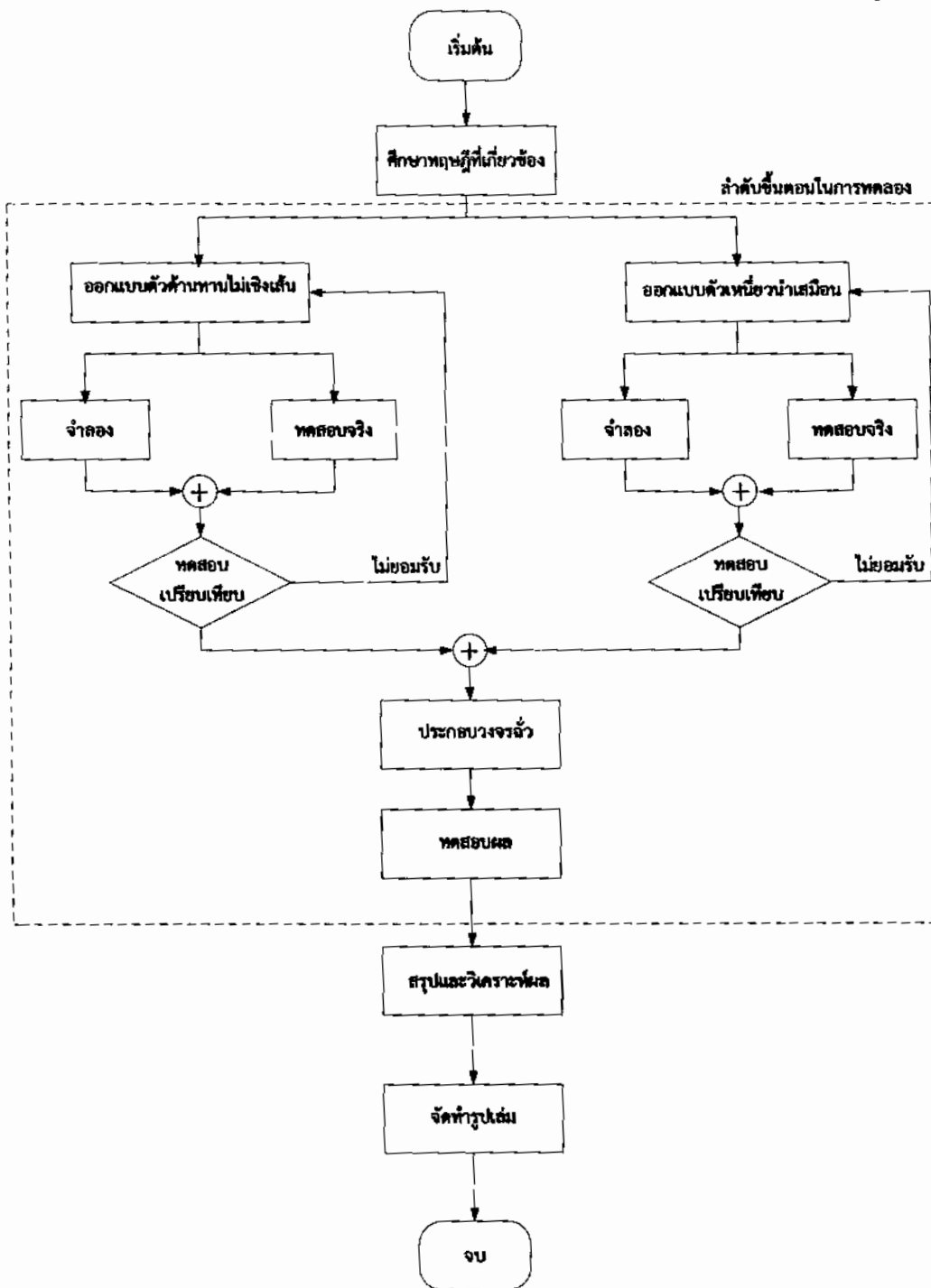
2.4.1 หลักการทำงานของวงจรถั่ว

เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.18 จะเห็นว่าองค์ประกอบของวงจรถั่วจะมีตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว ตัวเก็บประจุ 2 ตัว ความต้านทานปรับค่าได้ และโครงข่ายออปแอมป์ที่ทำหน้าที่เป็นความต้านทานไม่เชิงเส้น ในการทำงานของวงจรถั่วจะต้องมีการกำหนดค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุเพื่อเป็นค่าเริ่มต้นให้กับวงจรถั่ว โครงข่ายออปแอมป์ที่ต่อรวมในวงจรถั่วจะทำหน้าที่ในการสร้างความต้านทานเชิงลบ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดแรงดันที่เกี่ยวข้องกับรูปลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้น สภาวะโกลาหลที่เกิดขึ้นจะสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสแตต 2 ตัว ได้แก่ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 สัญญาณมีรูปลักษณะของการโคจรที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยการปรับค่าความต้านทาน

วงจรถั่วในรูปที่ 2.21 เป็นวงจรถั่วที่มีการพัฒนาขึ้น โดยเปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำให้เป็นโครงข่ายออปแอมป์ หรือที่เรียกว่า ตัวเหนี่ยวนำเสมือน ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงของวงจรถั่วส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรถั่วปรับค่าได้ยาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเหนี่ยวนำอาจทำให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไป และกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำจะส่งผลให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำ จึงปรับปรุงวงจรถั่วให้อยู่ในลักษณะที่ง่ายต่อการปรับแต่งค่าได้อย่างละเอียด

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานและวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานและวิธีการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.1

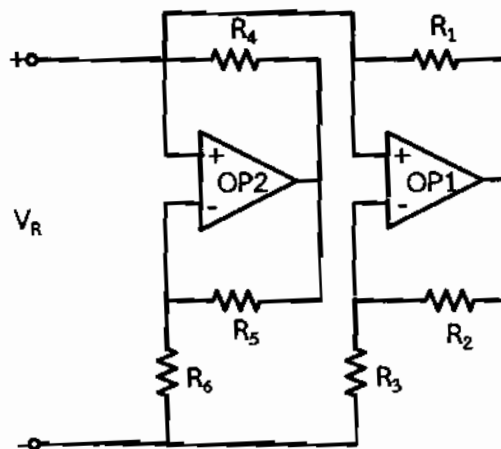


รูปที่ 3.1 วิธีการดำเนินงานและวิธีการทดลอง

จากแผนภาพสามารถอธิบายวิธีการดำเนินงานและวิธีการทดลองได้ดังนี้ ผู้วิจัยจะทำการศึกษา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความโกสลาหล วงจรฉั่ว ตัวต้านทานไม่เชิงเส้น และตัวเหนี่ยวนำเสมือน จากนั้นจะ ทำการออกแบบวงจรฉั่ว เพื่อสร้างสัญญาณที่มีพฤติกรรมโกสลาหลขึ้น โดยวงจรฉั่วจะประกอบไปด้วย ตัวต้านทานคงที่ ตัวเก็บประจุ 2 ตัว ตัวต้านทานไม่เชิงเส้น และตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัย จะทำการศึกษาและทำการออกแบบวงจรตัวต้านทานไม่เชิงเส้น และตัวเหนี่ยวนำเสมือนขึ้นมาเพื่อใช้ ประกอบเป็นวงจรฉั่ว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การออกแบบตัวต้านทานไม่เชิงเส้น

ในการออกแบบตัวต้านทานไม่เชิงเส้นในครั้งนี้ ผู้วิจัยจะใช้โครงข่ายออปแอมป์และตัวต้านทาน มาสร้างเป็นตัวต้านทานไม่เชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวต้านทานไม่เชิงเส้น

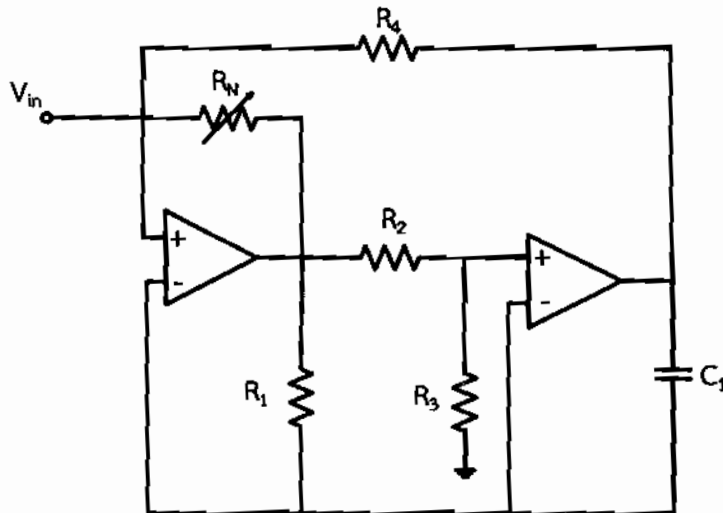
จากรูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของวงจรฉั่วที่มีผลต่อการเกิดพฤติกรรมโกสลาหลนี้คือ ตัวต้านทาน ไม่เชิงเส้น ซึ่งลักษณะสมบัติของตัวต้านทานไม่เชิงเส้นสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.13

เมื่อได้รูปแบบของวงจรตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่จะทำการออกแบบแล้วก็ทำการจำลองวงจรที่ได้ ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Multisim เมื่อได้คุณลักษณะของวงจรเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ก็ทำ การทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผล

การสร้างสัญญาณโกลาหลด้วยวงจรฉั่วนั้น ความถี่ของสัญญาณโกลาหลที่ได้จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ หากต้องการสัญญาณความถี่ต่ำ ต้องเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำให้มากขึ้น แต่จะประสบปัญหาเกี่ยวกับขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่โตขึ้นด้วย ซึ่งทำให้การสร้างเป็นไปได้อย่างและไม่สะดวกในการใช้งาน จากปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน

3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเสมือน

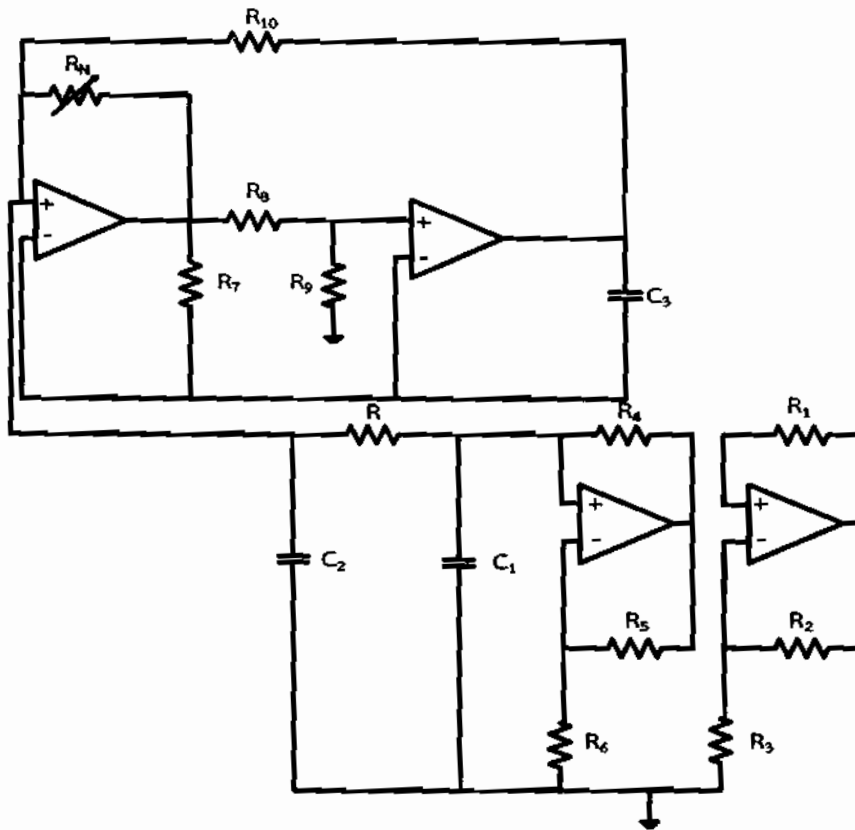
ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรงานนี้ จะใช้โครงข่ายออปแอมป์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ มาใช้ในการออกแบบ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวเหนี่ยวนำเสมือน

จากวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่แสดงในรูปที่ 3.3 สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำได้ดังสมการ (2.23)

เมื่อได้รูปแบบของวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่จะใช้ในการออกแบบแล้ว ก็ดำเนินการจำลองและทดลองจริง โดยการนำตัวเหนี่ยวนำเสมือนมาทำการทดสอบกับวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน เพื่อทำการเปรียบเทียบและวัดผลต่อไป เมื่อได้วงจรตัวต้านทานไม่เชิงเส้น และตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่เป็นไปตามที่ต้องการแล้ว ก็นำตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้นมาประกอบรวมเป็นวงจรฉั่ว เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณความโกลาหลต่อไป ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรฉั้วที่ประกอบขึ้นจากตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ได้ทำการออกแบบ

เมื่อทำการประกอบวงจรดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 เรียบร้อยแล้ว ก็นำวงจรที่ได้ไปทำการทดสอบ ผล เพื่อนำผลมาวิเคราะห์และสรุป ตลอดจนนำผลที่ได้ไปเขียนเป็นรายงานและจัดทำรูปเล่มต่อไป

บทที่ 4

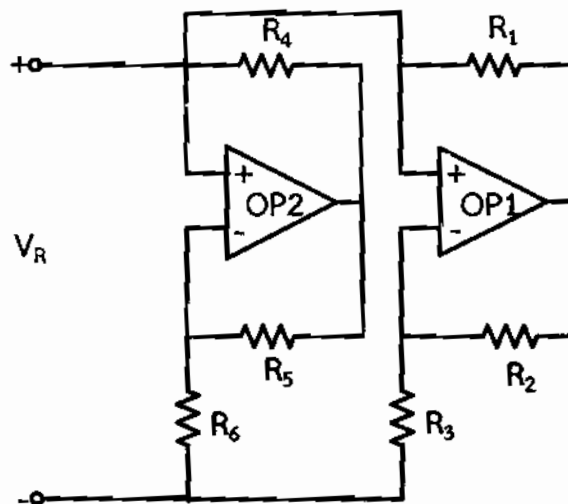
ผลการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองการทำงานของวงจรฉั้วที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย การออกแบบตัวต้านทานไม่เชิงเส้น การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเสมือนและวงจรฉั้วที่ประกอบขึ้นมาจากตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำที่ได้ทำการออกแบบ

4.1 การออกแบบตัวต้านทานไม่เชิงเส้น

การทดสอบตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่สร้างมาจากโครงข่ายออปแอมป์

วงจรตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่สร้างจากโครงข่ายออปแอมป์ของโครงงานปัญหาพิเศษนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยในการทดสอบ ได้กำหนดให้อุปกรณ์ภายในวงจรมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.1 การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบโดยการจำลองและการทดสอบจากการทดลองจริง

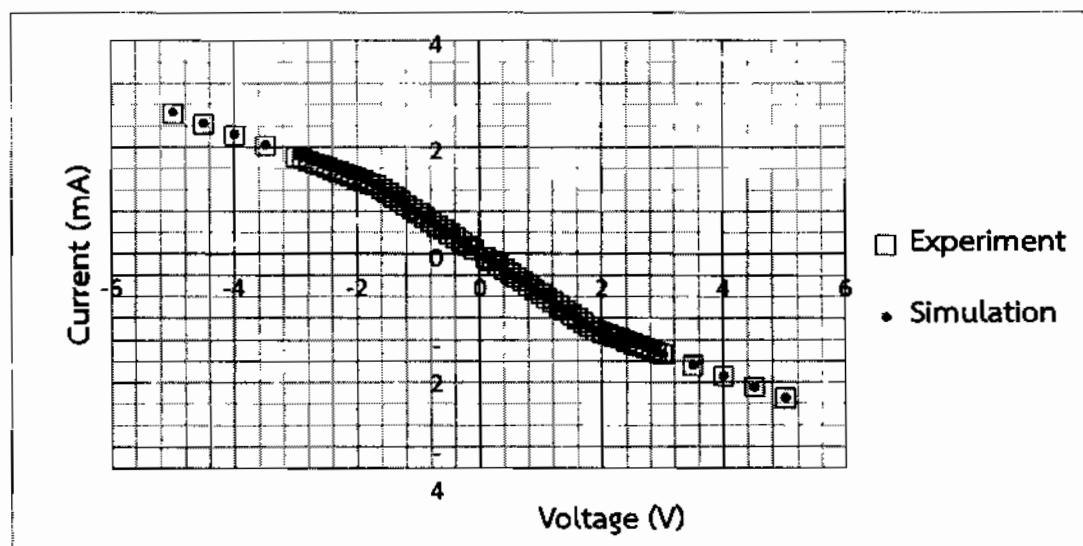


รูปที่ 4.1 ตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่ออกแบบโดยใช้โครงข่ายออปแอมป์

ตารางที่ 4.1 ค่าอุปกรณ์ภายในวงจรตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่สร้างจากโครงข่ายออปแอมป์

ความต้านทาน	ออปแอมป์
$R_1 = R_2 = 220\Omega$	LM741
$R_3 = 2.2k\Omega$	
$R_4 = R_5 = 22k\Omega$	
$R_6 = 3.3k\Omega$	

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของความต้านทานไม่เชิงเส้นที่สร้างจากโครงข่ายออปแอมป์ จากกราฟ แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบด้วยวงจรจริงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเป็นอย่างดี โดยมีค่าความชันในช่วงแรก (Ga) เท่ากับ -0.97 mS ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงแรงดันระหว่าง $-1.8 - 1.8 \text{ V}$ และมีค่าความชันในช่วงที่สอง (Gb) เท่ากับ -0.20 mS



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของความต้านทานไม่เชิงเส้นที่สร้างจากโครงข่ายออปแอมป์

4.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเสมือน

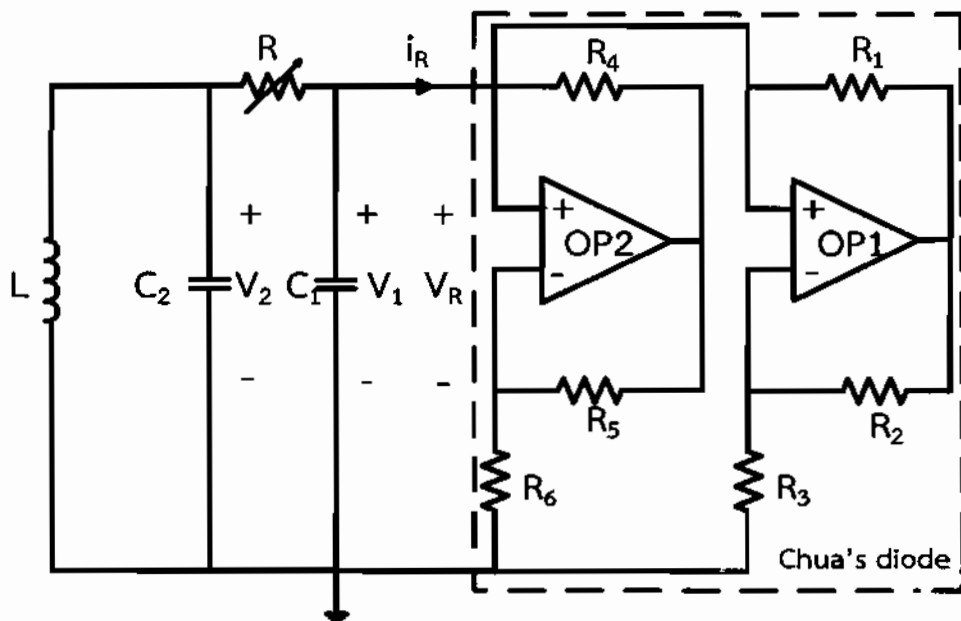
ก่อนจะทำการออกแบบตัวเหนี่ยวนำเสมือน การออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้มีค่าตามที่ต้องการ จึงจะสามารถสร้างสัญญาณโกลาหลขึ้นในวงจรได้ จากการจำลองโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำจริงในวงจรพบว่า การเกิดสัญญาณโกลาหลนั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากตัวเหนี่ยวนำหลายๆ ค่า โดยลักษณะสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวต้านทานภายในวงจร สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเท่ากับ 20mH ในการศึกษาและพัฒนา

4.2.1 การสร้างสัญญาณโกลาหลในวงจรโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเท่ากับ 20mH

ในการจำลองสัญญาณโกลาหลโดยใช้วงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่ได้ ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา กับตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเท่ากับ 20mH ภายใต้อุปกรณ์ค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าอุปกรณ์ภายในวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำค่า 20mH

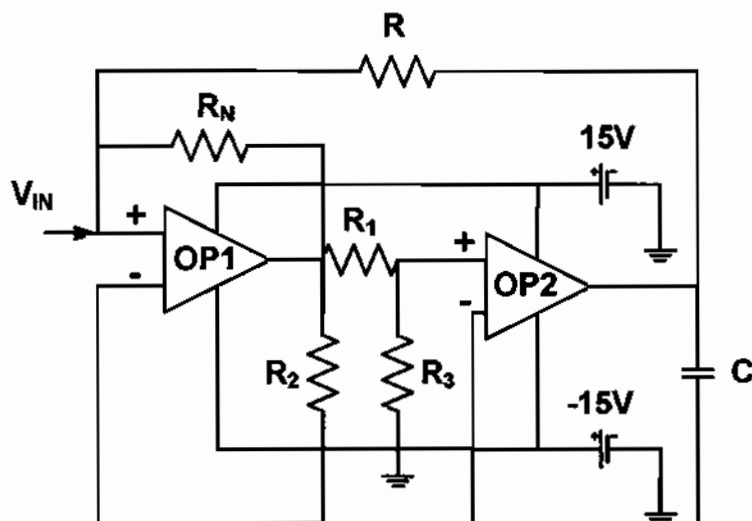
ความต้านทาน	ออปแอมป์
$R_1 = R_2 = 220\Omega$	LM741
$R_3 = 2.2k\Omega$	
$R_4 = R_5 = 22k\Omega$	
$R_6 = 3.3k\Omega$	
$C_1 = 10nF$	
$C_2 = 100nF$	
$L = 20mH$	



รูปที่ 4.3 เป็นรูปวงจรมัลติที่ประกอบด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำขนาด 20mH

จากการจำลองพบว่ารูปสัญญาณโกลาหลที่เกิดจากวงจรมัลติที่ประกอบด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำขนาด 20mH มีรูปร่างเปลี่ยนไปเมื่อค่าตัวต้านทานที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุทั้งสองของวงจรมัลติมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 145kΩ สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสแตตจะมีลักษณะคล้ายวงม้วนคู่ ส่วนสัญญาณโกลาหลในโดเมนเวลาโดยให้แกน X คือ เวลา แกน Y คือ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสอง สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะเป็นรายคาบคล้ายๆ เกิดแบบซ้ำๆ แต่จะไม่ซ้ำรอยเดิมดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.1 เมื่อค่อยๆ เพิ่มค่าตัวต้านทานเท่ากับ 190kΩ สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสแตตมีลักษณะเป็นวงม้วนคู่ดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.2 เมื่อเพิ่มค่าตัวต้านทานเท่ากับ 197kΩ ลักษณะสัญญาณโกลาหลในปริภูมิสแตตจะเป็นแบบวงม้วนเดี่ยวสามารถแสดงได้ในภาคผนวก ก รูปที่ ก.3

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำเสมือนในโครงการปัญหาพิเศษนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่นำเสนอโดย K. Gopakumar และคณะฯ (2011) มาใช้ในการศึกษา ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (K. Gopakumar, 2011)

เพื่อให้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนมีค่าเท่ากับ 20mH จะต้องกำหนดให้ค่าของอุปกรณ์ภายในวงจรมีค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในทดสอบวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนของ K. Gopakumar

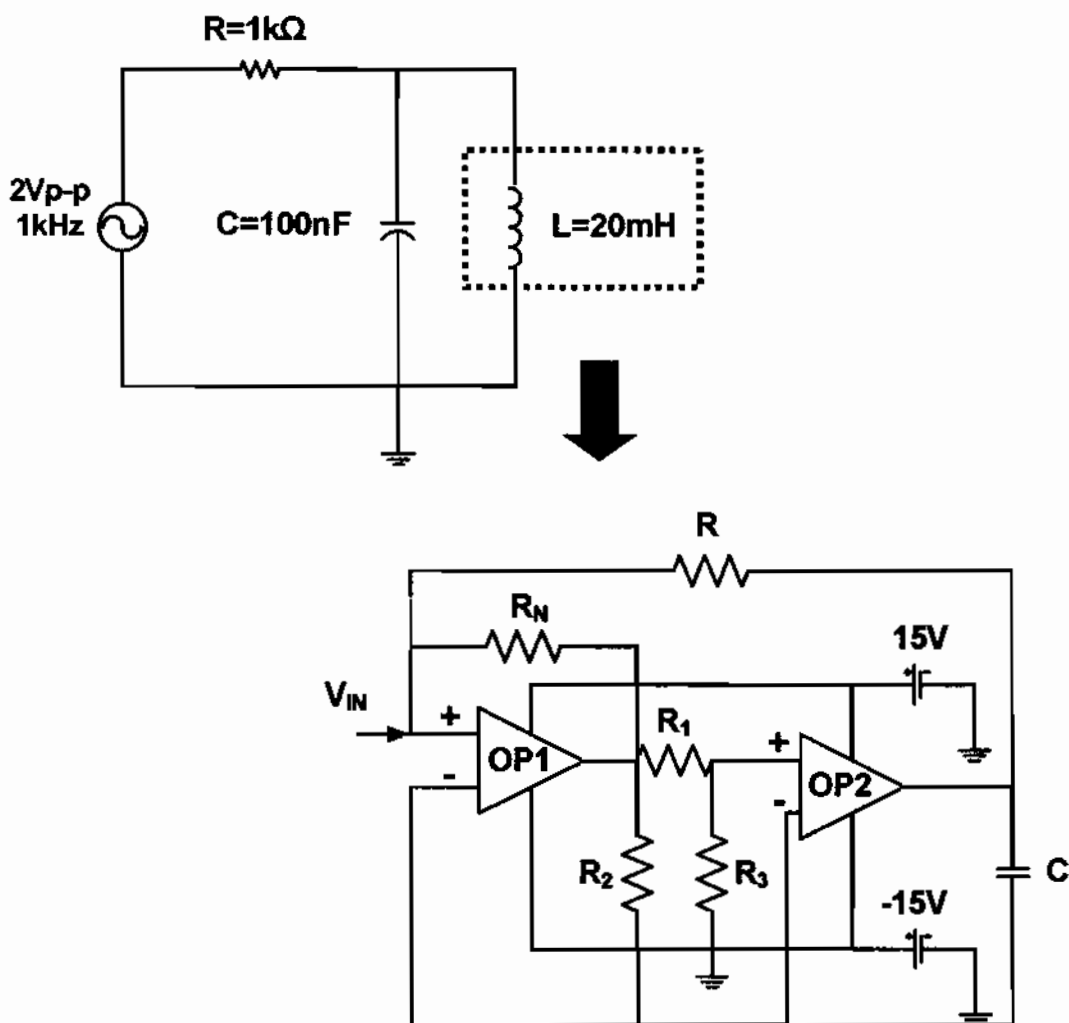
ความต้านทาน	ออปแอมป์
$R = 1k\Omega$	LM741
$R_N = 47k\Omega$	
$C = 20nF$	

เมื่อแทนค่าอุปกรณ์ลงในสมการที่ 2.23 จะได้ว่า $L = R^2C = 20mH$

เพื่อเป็นการทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวเหนี่ยวนำเสมือน จึงได้นำตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่แสดงดังรูปที่ 4.4 มาทำการทดสอบกับวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน โดยทำการจำลองผลเปรียบเทียบกับตัวเหนี่ยวนำจริงที่มีขนาด 20mH นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองกับอุปกรณ์จริง

4.2.2 ทดสอบการทำงานของวงจรถ้าเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน

วงจรถ้าเหนี่ยวนำเสมือนที่ใช้ทดสอบกับวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 โดยในการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความถี่รีโซแนนต์ ของวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน ที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ได้จากการจำลองและทดลองจริง ตลอดจนตัวเหนี่ยวนำจริง มีค่าใกล้เคียงกัน โดยความถี่รีโซแนนต์ที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนทั้งที่ได้จากการจำลองและการทดลองจริงมีค่าเท่ากับ 3.5kHz สำหรับความถี่รีโซแนนต์ที่ได้จากตัวเหนี่ยวนำจริงมีค่าเท่ากับ 3.6kHz



รูปที่ 4.5 วงจรถ้าเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน

จากรูปที่ 4.5 สามารถพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังต่อไปนี้

$$H(s) = \frac{s/RC}{s^2 + \frac{s}{RC} + 1/LC} \quad (4.1)$$

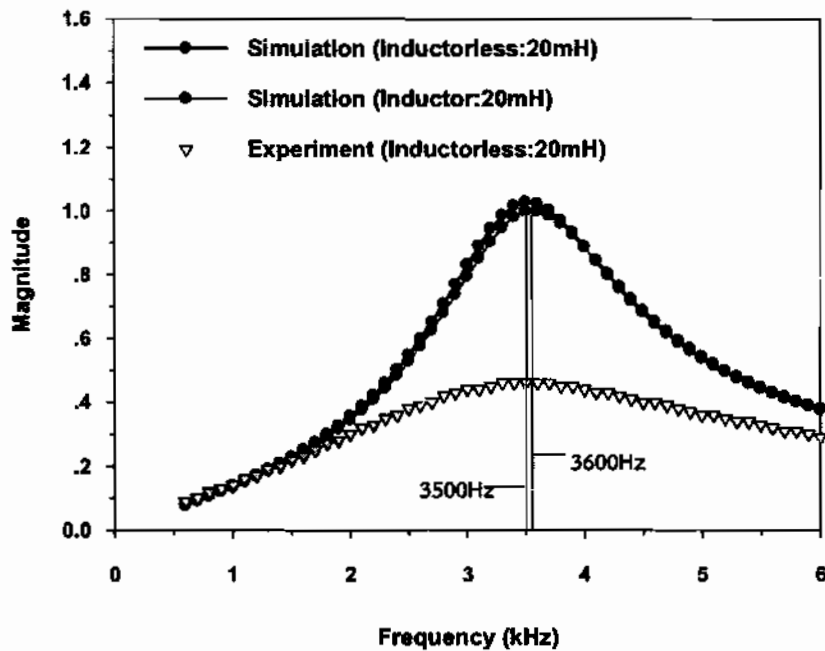
และสามารถพิจารณาความถี่สั่นพ้อง (ω_0) ได้จากสมการ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.2)$$

เมื่อแทนพารามิเตอร์ที่ได้จากรูปที่ 4.5 จะได้ว่า

$$\omega_0 = 22,317 \text{ rad/s}$$

$$f = 3,562 \text{ Hz}$$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าความถี่เรโซแนนต์เกิดขึ้นที่ความถี่ 3.5kHz กับ 3.6kHz ซึ่งค่าความถี่เรโซแนนต์ที่ได้นี้ สามารถนำไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำโดยประมาณได้จากสมการที่ 4.3

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (4.3)$$

1. ผลการจำลองตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ความถี่รีโซแนนต์เท่ากับ 3.5kHz; L=20.7mH
2. ผลการจำลองตัวเหนี่ยวนำจริงที่ความถี่รีโซแนนต์เท่ากับ 3.6kHz; L=19.6mH
3. ผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ความถี่รีโซแนนต์เท่ากับ 3.5kHz; L=20.7mH

เมื่อพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนของผลการจำลองและผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำเสมือนของความถี่รีโซแนนต์เทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า

1. ผลการจำลองตัวเหนี่ยวนำเสมือนมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.74%
2. ผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำเสมือนมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.74%
3. ผลการจำลองตัวเหนี่ยวนำจริงมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.06%

4.2.3 ทดสอบการทำงานวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรฉั้วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่นำเสนอโดย

K. Gopakumar ที่ขนาด 20mH

ผลการจำลอง

ขณะที่ตัวต้านทานที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุทั้งสองตัวเท่ากับ 1.7kΩ สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตรตจะมีลักษณะเป็นวงม้วนคู่ และสัญญาณโกลาหลในโดเมนเวลาที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองตัวจะมีลักษณะเป็นรายคาบสามารถแสดงได้ในภาคผนวก ก รูปที่ ก.4-ก.9 แต่เมื่อตัวต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 1.95kΩ-2.06kΩ ลักษณะสัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตรตจะมีลักษณะเป็นวงม้วนเดี่ยวดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.10-ก.12

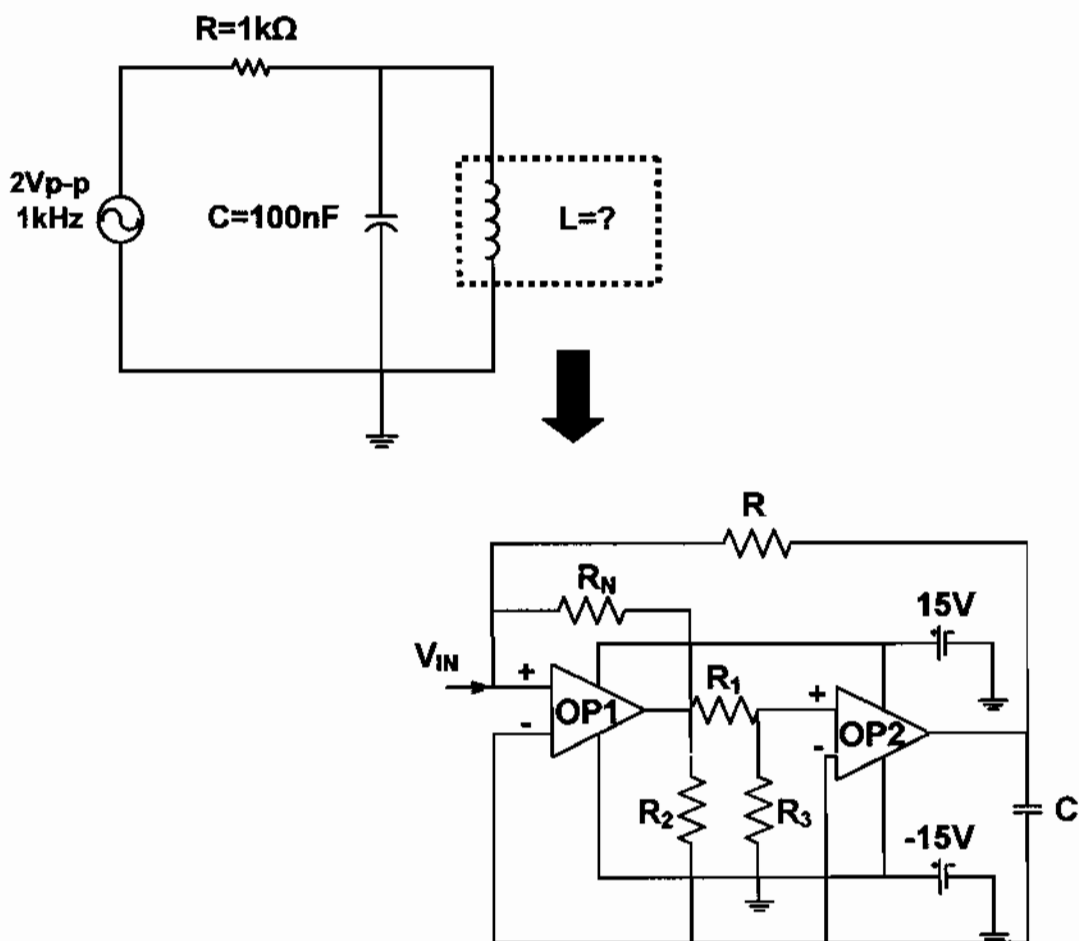
ผลการทดลองจริง

เมื่อทำการปรับค่าตัวต้านทานที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุทั้งสองตัว สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตรตจะมีลักษณะเป็นจุดเมื่อตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 446Ω ดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.13 แต่เมื่อตัวต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 4.26kΩ สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตรตจะมีลักษณะคล้ายวงรีสามารถแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.14 จากการจำลองวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่นำเสนอโดย K. Gopakumar พบว่าสัญญาณโกลาหลสามารถเกิดขึ้นได้ ทั้งที่เป็นสัญญาณโกลาหลแบบวงม้วนเดี่ยวและคู่ เมื่อทำการทดลองจริงกับไม่เกิดสัญญาณโกลาหลแบบวงม้วนเดี่ยวและคู่ได้ แม้จะปรับค่าตัวต้านทานที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุสองตัวไปที่ค่าใดก็ตาม จากผลการทดลองจริงดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับค่าตัวต้านทานภายในวงจรตัวเหนี่ยวนำของ K. Gopakumar เพื่อตรวจสอบ

สัญญาณโกลาหล พบว่าเมื่อทำการปรับค่าตัวต้านทานภายในวงจร สามารถสร้างสัญญาณโกลาหลขึ้นได้ หากแต่ถ้าผู้วิจัยไม่สามารถทำการคำนวณตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่เกิดขึ้นกับวงจรด้วยสมการที่ 2.23 ได้ เพราะค่าตัวต้านทานภายในวงจรไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของ K. Gopakumar ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ได้ทำการปรับขึ้นมาใหม่นี้ เพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำเสมือนที่เกิดขึ้น โดยอาศัยวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน สำหรับการหาตำแหน่งความถี่รีโซแนนต์เพื่อใช้ในการคำนวณย้อนกลับไปหาค่าตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งรายละเอียดจะแสดงในหัวข้อต่อไป

4.2.4 ทดสอบการทำงานของวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรฉั้วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนของ K. Gopakumar ที่ปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานภายใน

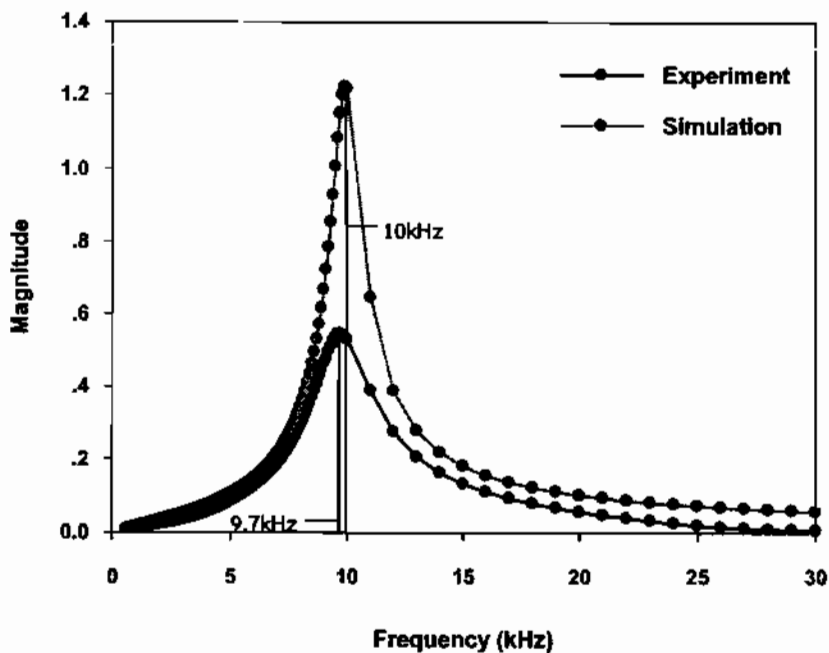
วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน ที่ใช้ในการทดสอบแสดงได้ดังในรูปที่ 4.7 จากวงจรจะพบว่าเรายังไม่ทราบค่าตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองมีค่าเป็นเท่าใด ดังนั้นเพื่อเป็นการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำ จึงกำหนดค่าอุปกรณ์ต่างๆในวงจรดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.7 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน

ตารางที่ 4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน

ความต้านทาน	ออปแอมป์
$R = 150\Omega$	LM741
$R_1 = 3k\Omega$	
$R_2 = 4.44k\Omega$	
$R_3 = 4.68k\Omega$	
$R_W = 7.2k\Omega$	
$C = 20nF$	



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าผลการจำลองวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนมีความถี่เรโซแนนต์เกิดขึ้นที่ความถี่ 10kHz และผลการทดลองตัวเหนี่ยวนำเสมือนเรโซแนนต์เกิดขึ้นที่ความถี่ 9.7kHz ซึ่งสามารถนำไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำโดยประมาณได้จากสมการที่ 4.3

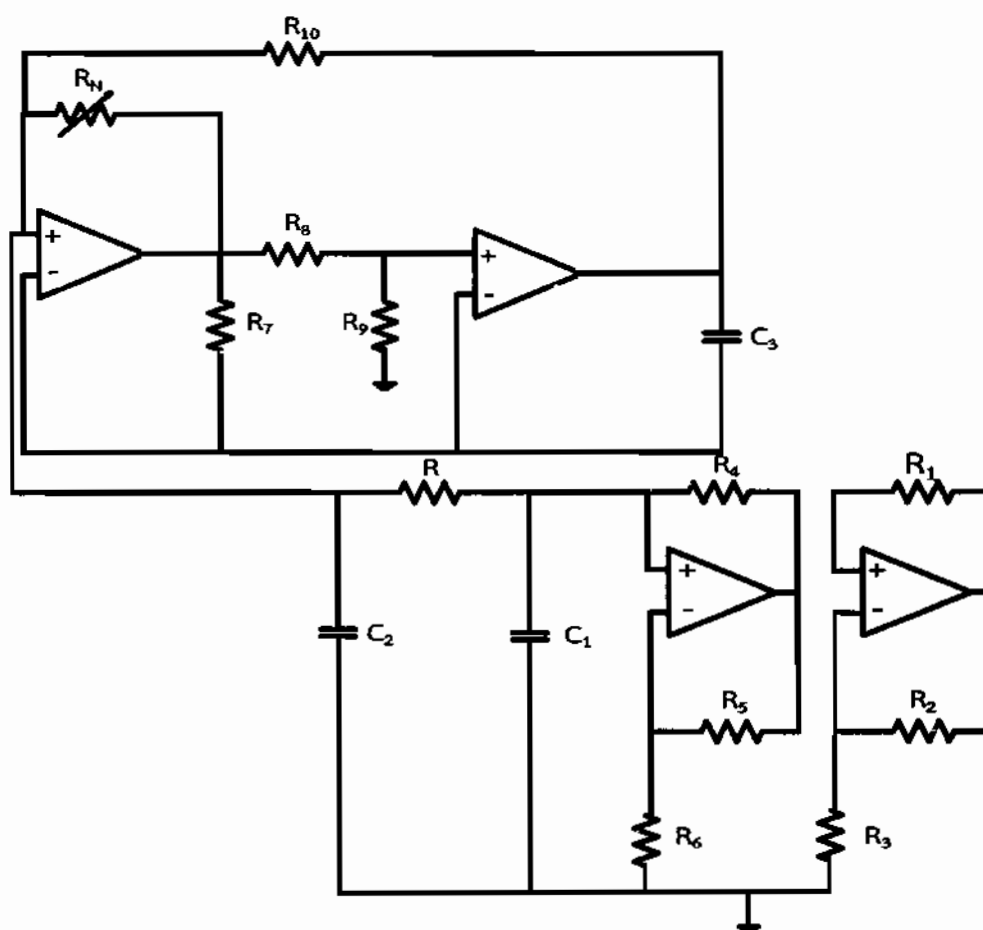
ผลการคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองและทดลองจริง

1. ผลการจำลองเกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 10kHz; $L = 25.4\text{mH}$
2. ผลการทดลองจริงเกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 9.7kHz; $L = 26.9\text{mH}$

4.3 วงจรฉั้วที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่นำเสนอ

การทดสอบวงจรฉั้วที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้น

วงจรฉั้วที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้นของโครงการปัญหาพิเศษนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ได้กำหนดให้อุปกรณ์ภายในวงจรมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.5 ในการศึกษาครั้งนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบโดยการจำลองและการทดสอบจากการทดลองจริง



รูปที่ 4.9 วงจรฉั้วที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้น

ตารางที่ 4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวงจรฉั้วที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้น

ความต้านทาน	ออปแอมป์
$R_1 = R_2 = 220\Omega$	LM741
$R_3 = 2.2k\Omega$	
$R_4 = R_5 = 22k\Omega$	
$R_6 = 3.3k\Omega$	
$R_7 = 4.44k\Omega$	
$R_8 = 3k\Omega$	
$R_9 = 4.68k\Omega$	
$R_{10} = 150\Omega$	
$R_N = 7.2k\Omega$	
$C_1 = 10nF$	
$C_2 = 100nF$	
$C_3 = 20nF$	

รูปที่ 4.9 เป็นรูปวงจรฉั้วที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้นขนาด 26.9mH โดยในการทดสอบวงจรต้องอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ เพื่อเป็นการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นให้กับวงจรอย่างถูกต้อง ในการทดสอบวงจรนี้ได้กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวเป็น 1 โวลต์ ผลการจำลองเมื่อตัวต้านทานมีค่าตั้งแต่ 1.7k Ω -1.95k Ω สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตรตจะมีลักษณะเป็นวงม้วนคู่ ส่วนสัญญาณโกลาหลในโดเมนเวลาจะมีลักษณะเป็นรายคาบดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.15-ก.21 ส่วนสัญญาณโกลาหลในปริภูมิที่มีลักษณะเป็นวงม้วนเดี่ยวจะเกิดขึ้นในช่วงของค่าความต้านทานตั้งแต่ 2k Ω -2.06k Ω ดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.22-ก.23 ขณะที่ผลการทดลองจริงสัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตรตแบบวงม้วนคู่สามารถเกิดได้ในช่วงค่าความต้านทานมีค่าตั้งแต่ 1.7k Ω -1.82k Ω แสดงได้ในภาคผนวก ก รูปที่ ก.15-ก.18 ส่วนสัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตรตแบบวงม้วนเดี่ยวสามารถเกิดได้ในช่วงค่าต้านทานมีตั้งแต่ 1.86k Ω -1.88k Ω ดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.19-ก.20 ส่วนสัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตรตที่มีลักษณะคล้ายวงรีจะเกิดในช่วงค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.95k Ω -2k Ω ดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.21-ก.22 แต่เมื่อค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 2.06k Ω สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตรตจะมีลักษณะเป็นจุดดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.23 ซึ่งจาก

ผลการจำลองและผลการทดลองจริงจะพบว่าเมื่อตัวต้านทานที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุทั้งสองตัวมีค่าเพิ่มขึ้นสัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตจะมีการเปลี่ยนแปลงจากลักษณะเป็นวงม้วนคู่ไปเป็นวงม้วนเดี่ยว และจะเปลี่ยนไปเป็นลักษณะแบบจุดในที่สุด จากผลการจำลองและผลการทดลองจริงพบว่า สัญญาณโกลาหลจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่จะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

ในการทดสอบวงจรนั้น ขั้นตอนการทดสอบค่อนข้างที่ละเอียด เนื่องจากต้องอาศัยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุซึ่งอยู่ในส่วนของการกำเนิดสัญญาณของวงจร การแสดงพฤติกรรมการณ์วนโกลาหลนั้นตัวควบคุมหลักคือความต้านทานปรับค่าได้ที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุทั้ง 2 ตัว ซึ่งเป็นตัวควบคุมให้เกิดการม้วนโกลาหลทั้งแบบเดี่ยวและแบบคู่ ทั้งนี้ผลการทดลองจริงที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันแต่มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ซึ่งอาจมีผลมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบที่ไวต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในปัจจุบันมีผู้เข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์โกลาหลอย่างแท้จริงน้อยมาก และที่เข้าใจก็มีจำนวนไม่น้อยที่เข้าใจแบบผิดๆ เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาชุดทดลองวงจรฉั่วสำหรับเรียนรู้ปรากฏการณ์โกลาหลขึ้นเพื่อใช้ประกอบในการทำความเข้าใจ ซึ่งในการพัฒนาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำสำหรับใช้ประกอบเป็นวงจรฉั่วขึ้น โดยการออกแบบตัวต้านทานไม่เชิงเส้นนั้นผู้วิจัยจะเลือกจะใช้โครงข่ายออปแอมป์มาสร้างเป็นตัวต้านทาน ไม่เชิงเส้น จากผลการจำลองและการทดลองจริงพบว่าวงจรดังกล่าวสามารถแสดงคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยมีความชันเกิดขึ้นสองช่วงประกอบด้วยค่าความชันในช่วงแรก G_a เท่ากับ -0.97 mS และมีค่าความชันในช่วงที่สอง G_b เท่ากับ -0.20 mS ส่วนการออกแบบตัวเหนี่ยวนำเสมือนจะเลือกใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนของ K. Gopakumar มาทำการออกแบบ จากการทดลองจริงจะพบว่า เมื่อกำหนดค่าให้เป็นไปตามหลักการของ K. Gopakumar ระบบไม่สามารถสร้างสัญญาณโกลาหลแบบวงม้วนเดี่ยวและวงม้วนคู่ได้ จะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานภายในวงจรใหม่เล็กน้อยจึงจะสามารถสร้างสัญญาณโกลาหลขึ้นมาได้ ทั้งเป็นแบบวงม้วนเดี่ยวและวงม้วนคู่ เมื่อนำวงจรฉั่วที่ประกอบมาจากตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ได้ทำการออกแบบมาสร้างเป็นชุดทดลองวงจรฉั่วสำหรับเรียนรู้ปรากฏการณ์โกลาหลพบว่าชุดทดลองสามารถสร้างสัญญาณโกลาหลได้เป็นอย่างดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการต่อตัวเหนี่ยวนำเสมือนเข้ากับวงจรจะต้องให้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนเชื่อมต่อกับกราวด์ในวงจรเสมอ
2. ในการทดสอบวงจรควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่ให้ความละเอียดสูงและแม่นยำ เนื่องจากวงจรมีความไวต่อสัญญาณภายนอก

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. ดร.สมเกียรติ ตั้งกิจวานิชย์. (2546,27พฤศจิกายน).ค้นเมื่อ19 มิถุนายน 2554,จาก <http://www.tdri.or.th/reports/unpublished/chaos-theory.pdf>
2. นายวัชรินทร์ จันทะเนตร. วงจรกำเนิดการม้วนอลวนที่มีวงจรแกว่งกวัดแบบวินบริดจ์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2553.
3. นายกฤษดา ด้วงโป้. ทฤษฎีความอลวน[วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยรังสิต; 2553.
4. K. Gopakumar, B. Premlet and K.G. Gopchandran. “Implementation of Chua's circuit using simulated inductance” Department of Electronics and Communication, TKM College of Engineering, Kollam, Kerala 691005, India,Available online: 13 Jun 2011.
5. Kl Aihara and R. Katayama “Chaos Engineering in Japan”, Communications of the ACM, Vol 38 No 1, November 1995 ค้นเมื่อ19 มิถุนายน 2554
6. Huang Anshan. “A Study of the Chaotic Phenomena in Chua's Circuit”, Shanghai Institute of Mechanical Engineering; 1988 IEEE
7. Cuomo, K.M., Oppenheim, A.V., Strogatz, S.H.: Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications. IEEE Trans. Circuits Syst. II 40, 626–633 (1993)
8. Kiers, K, Schmidt, D., Sprott, J.C.: Precision measurements of a simple chaotic circuit. Am. J. Phys. 72, 503–509 (2004)
9. Madan, R.N.: Chua's Circuit: A Paradigm for Chaos. World Scientific, Singapore (1993)
10. Zhong, G.O., Ayrom, F.: Experimental confirmation of chaos from Chua's circuit. Int. J. Circuit Theory Appl. 13, 93–98 (1985)

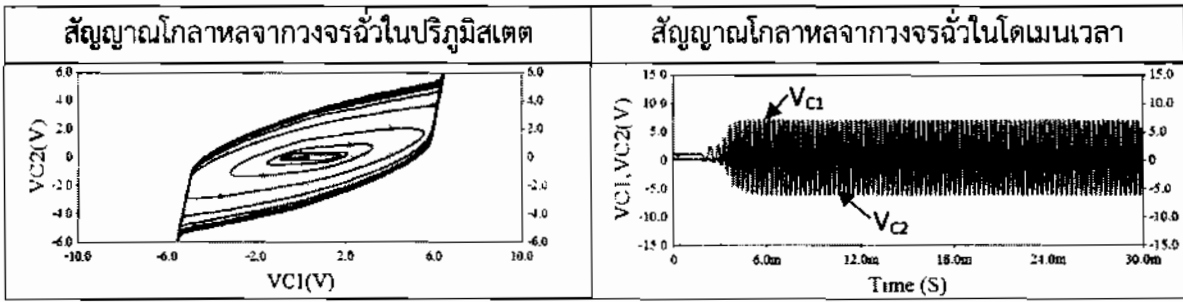
สารบัญ



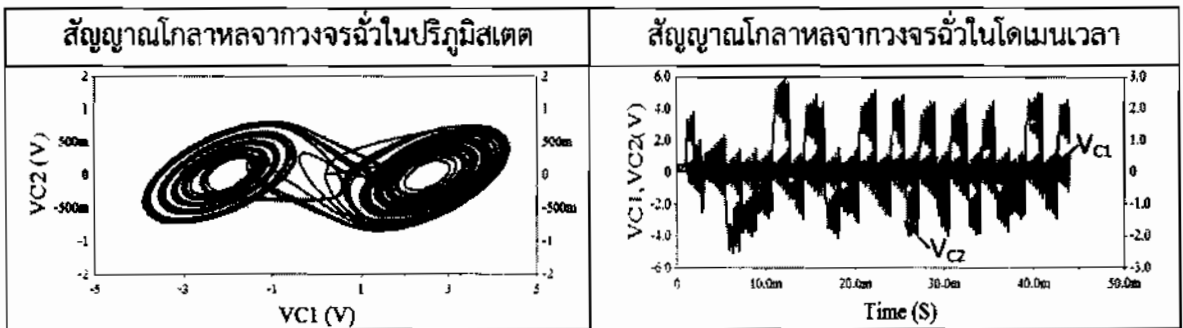
ภาคผนวก ก

รูปประกอบการจำลองและการทดลองจริง

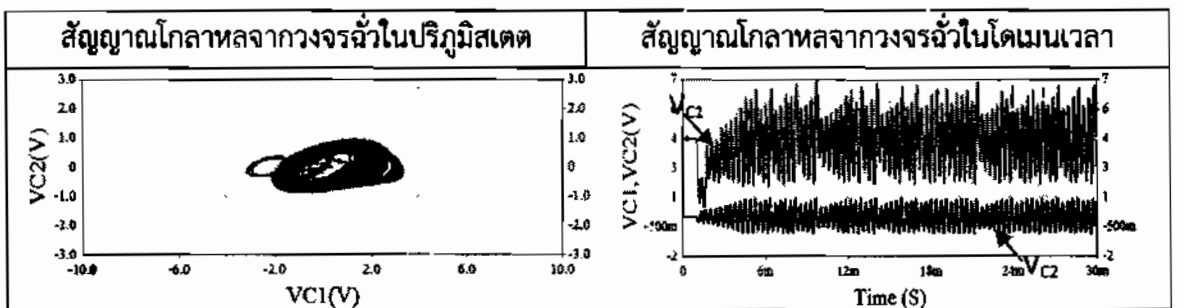
ผลการจำลองวงจรฉั้วที่ประกอบด้วยตัวต้านทานไม่เชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำขนาด 20mH



รูปที่ ก.1 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 145k Ω



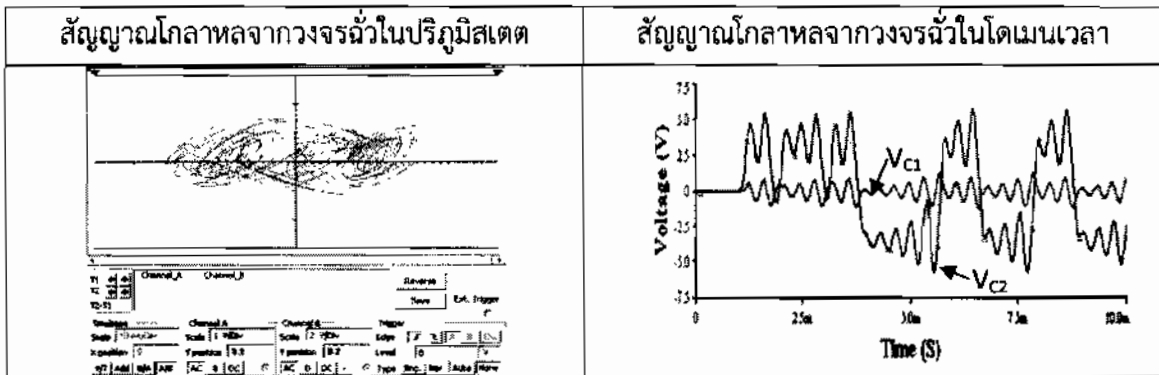
รูปที่ ก.2 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 190k Ω



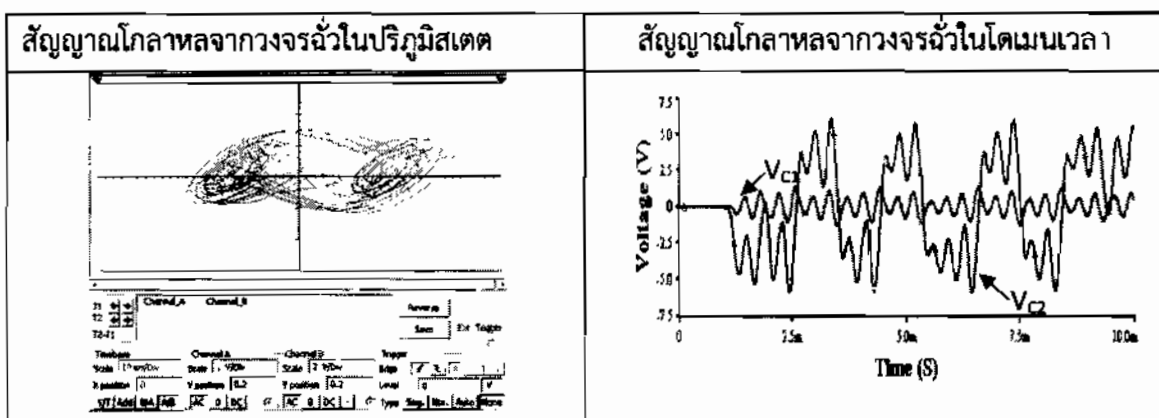
รูปที่ ก.3 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 197k Ω

ทดสอบการทำงานวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนในวงจรฉั้วที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่นำเสนอโดย K. Gopakumar ที่ขนาด 20mH

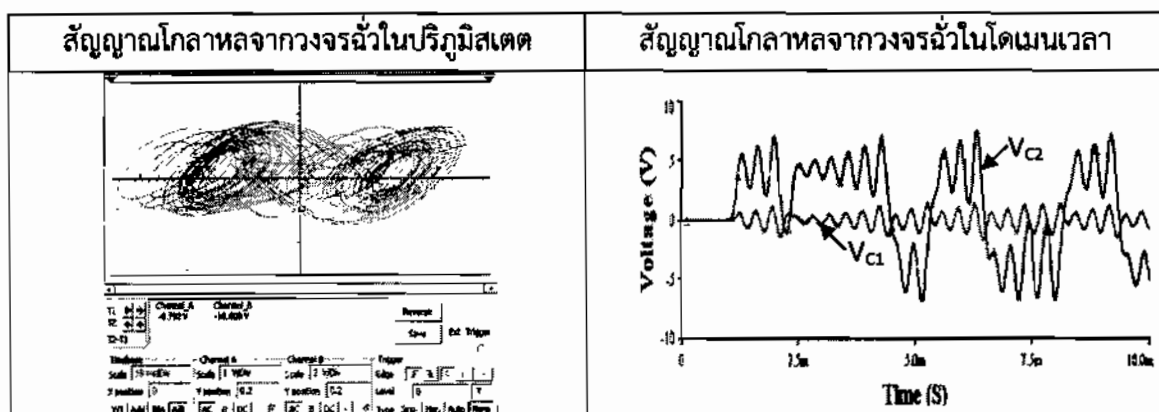
ผลการจำลอง



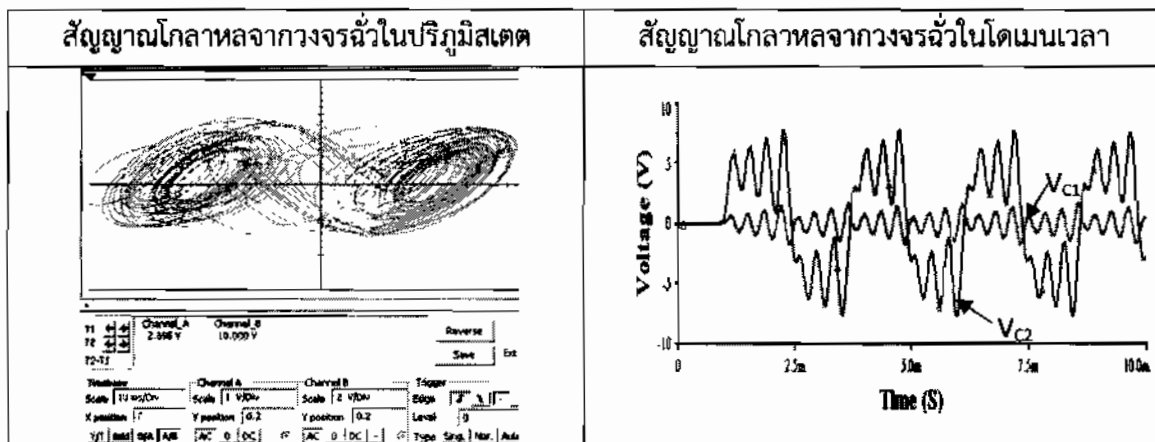
รูปที่ ก.4 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.7kΩ



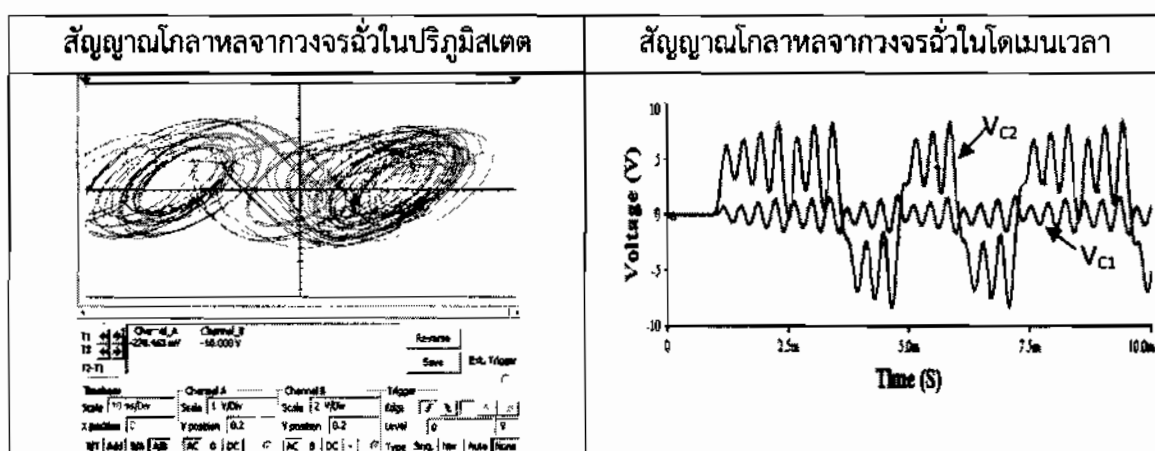
รูปที่ ก.5 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.706kΩ



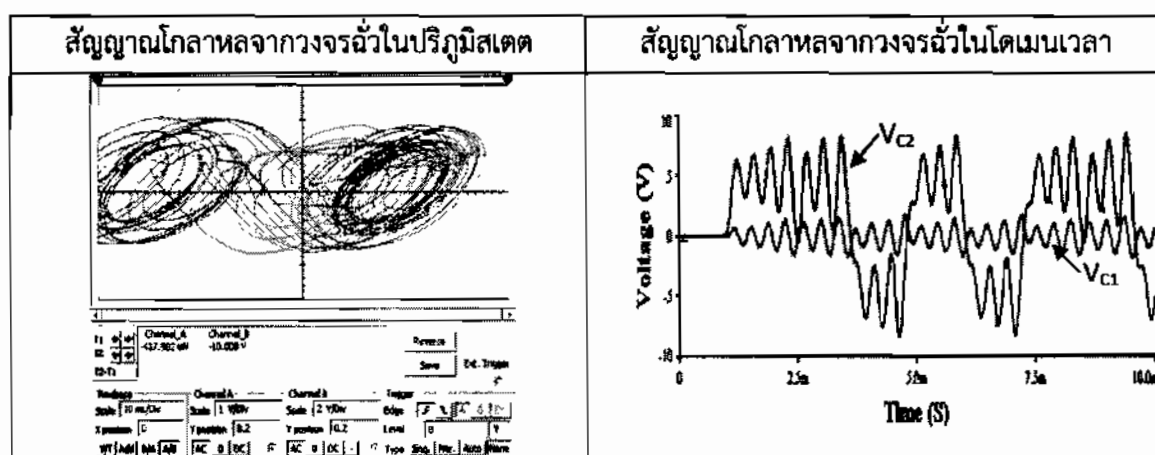
รูปที่ ก.6 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.8kΩ



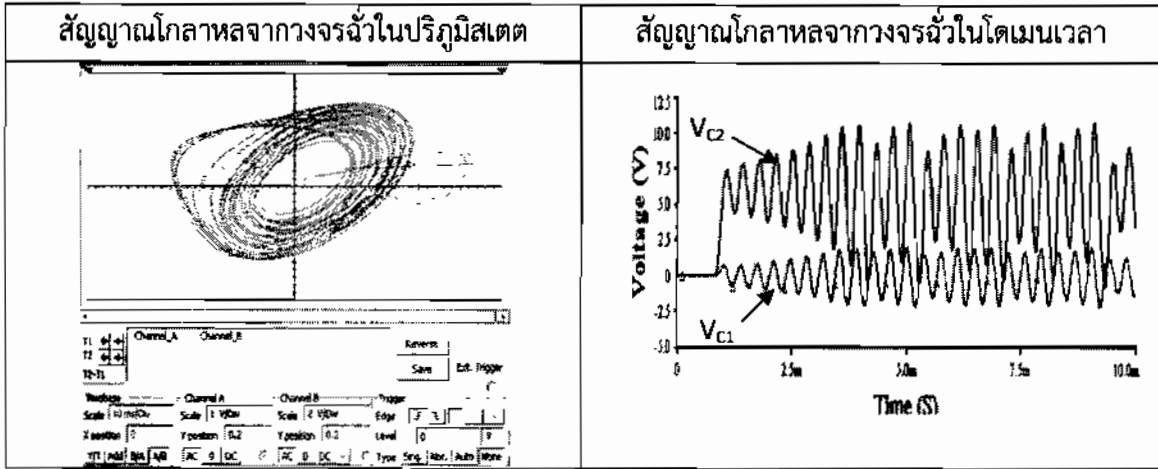
รูปที่ ก.7 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.82k Ω



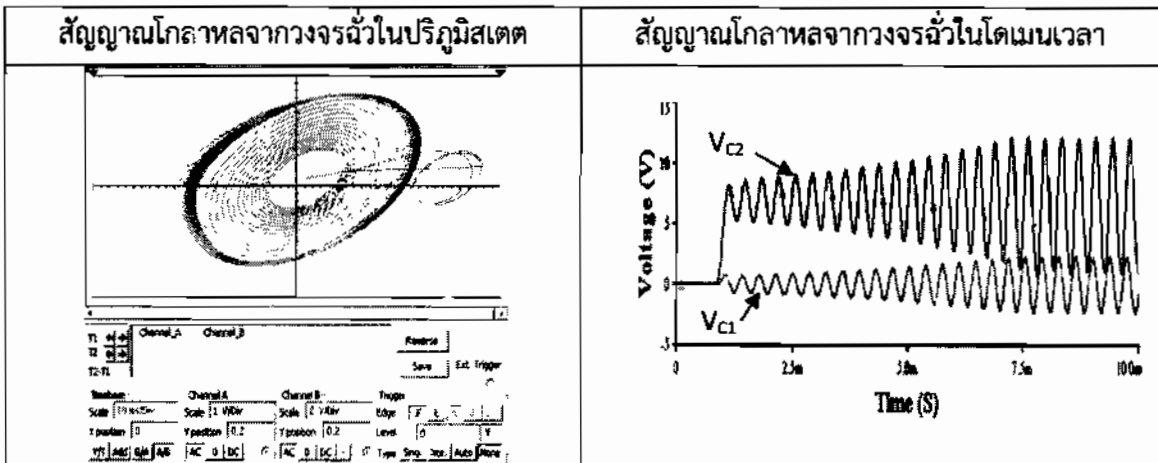
รูปที่ ก.8 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.86k Ω



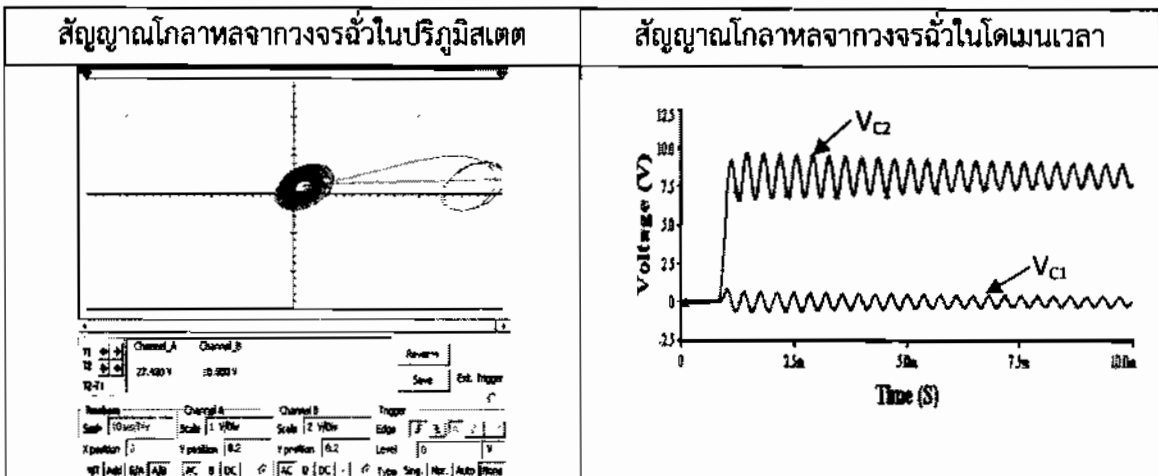
รูปที่ ก.9 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.88k Ω



รูปที่ ก.10 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $1.95k\Omega$

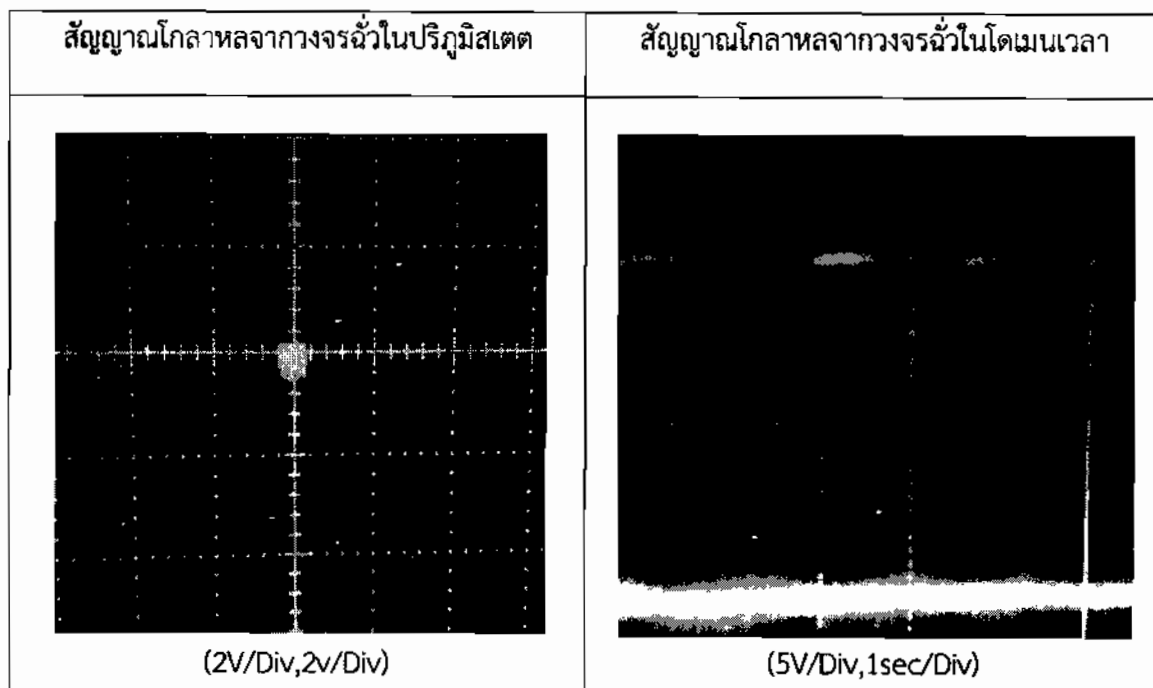
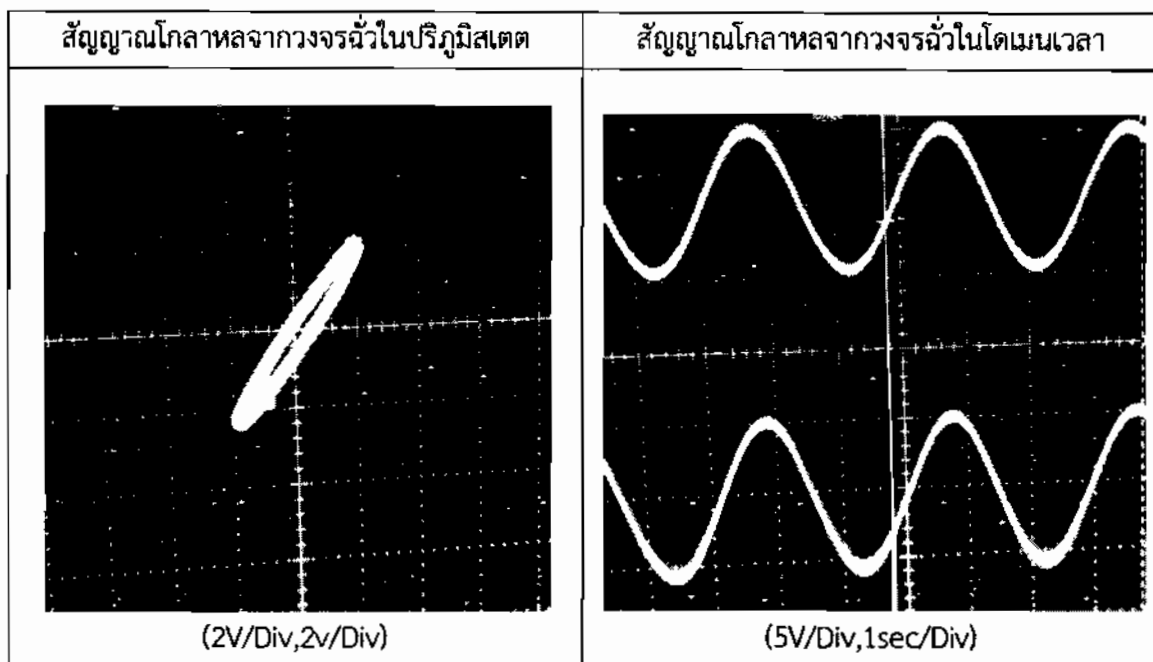


รูปที่ ก.11 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $2k\Omega$



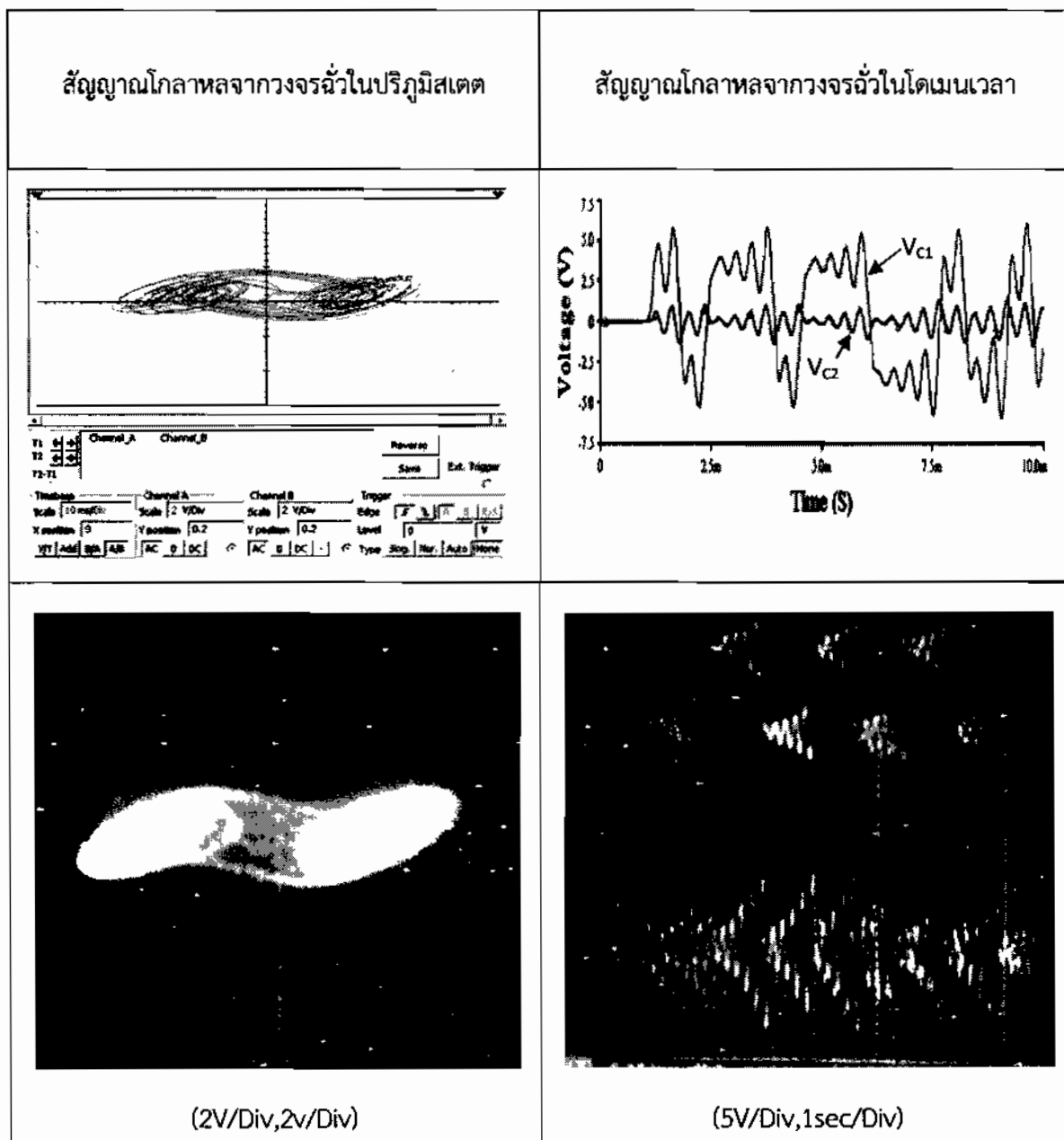
รูปที่ ก.12 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $2.06k\Omega$

ผลการทดลองจริง

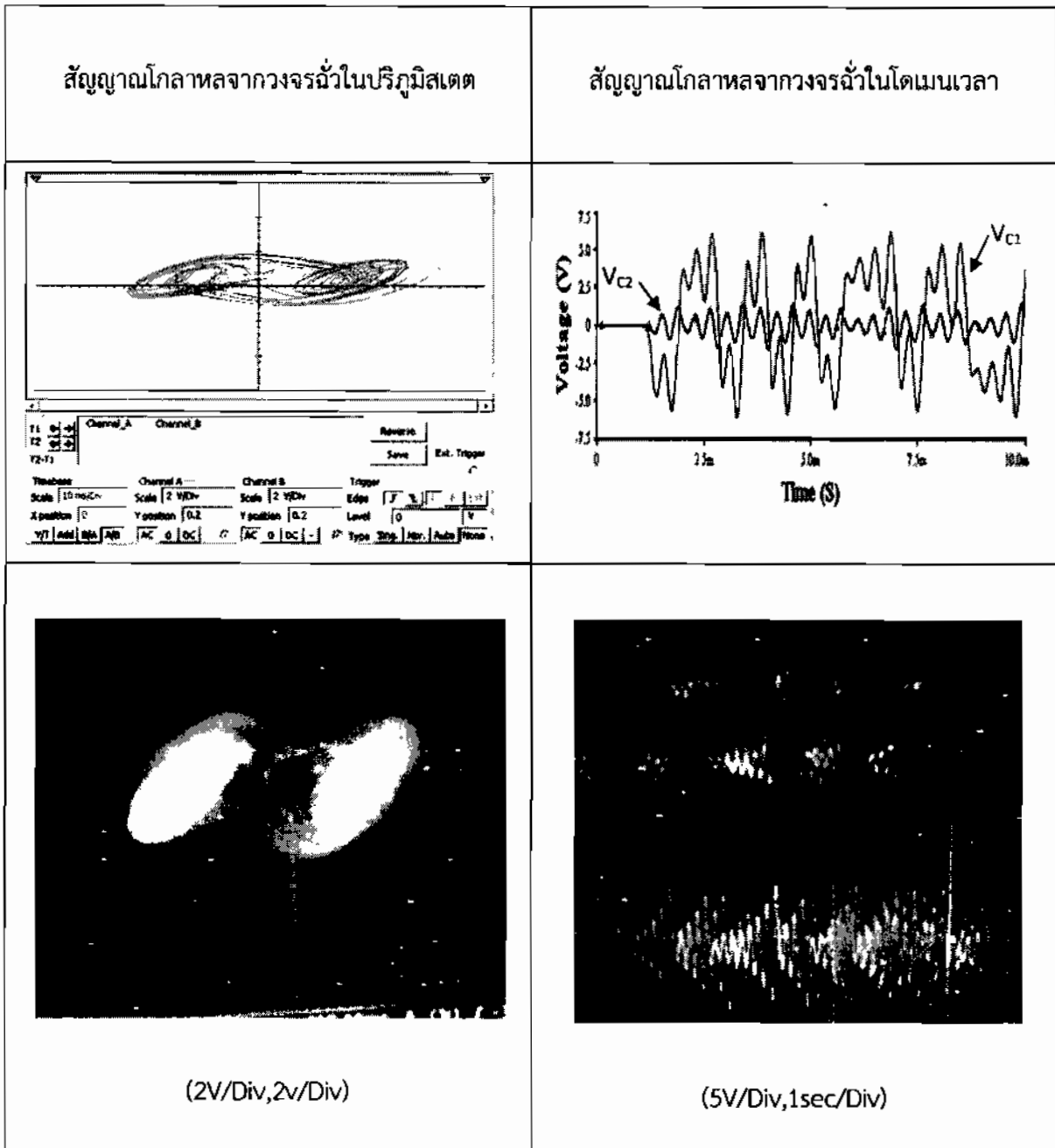
รูปที่ ก.13 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 446Ω รูปที่ ก.14 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $4.26k\Omega$

วงจรฉั้วที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำเสมือนและตัวต้านทานไม่เชิงเส้นที่นำเสนอ

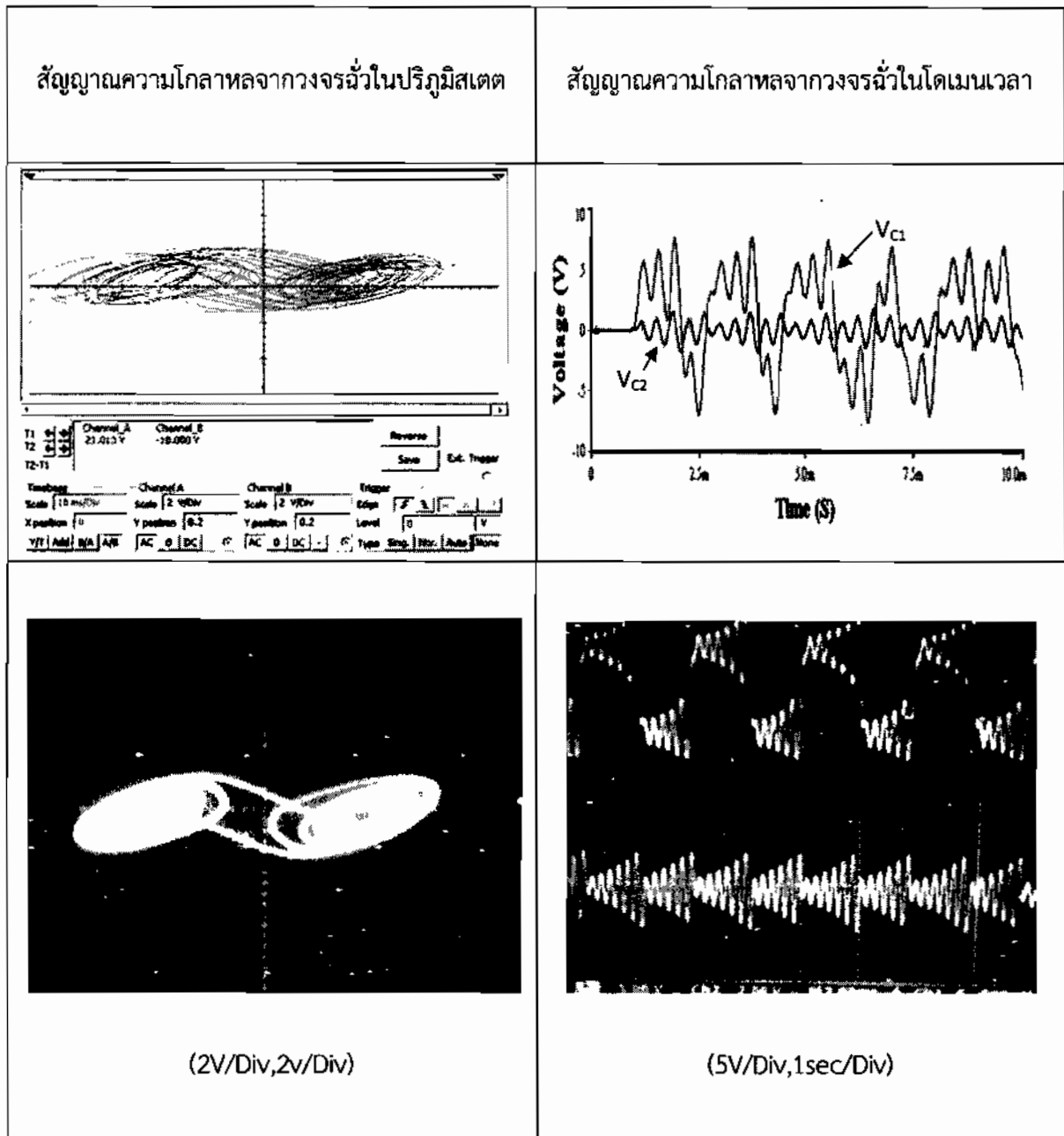
ผลการจำลองและทดลองจริง



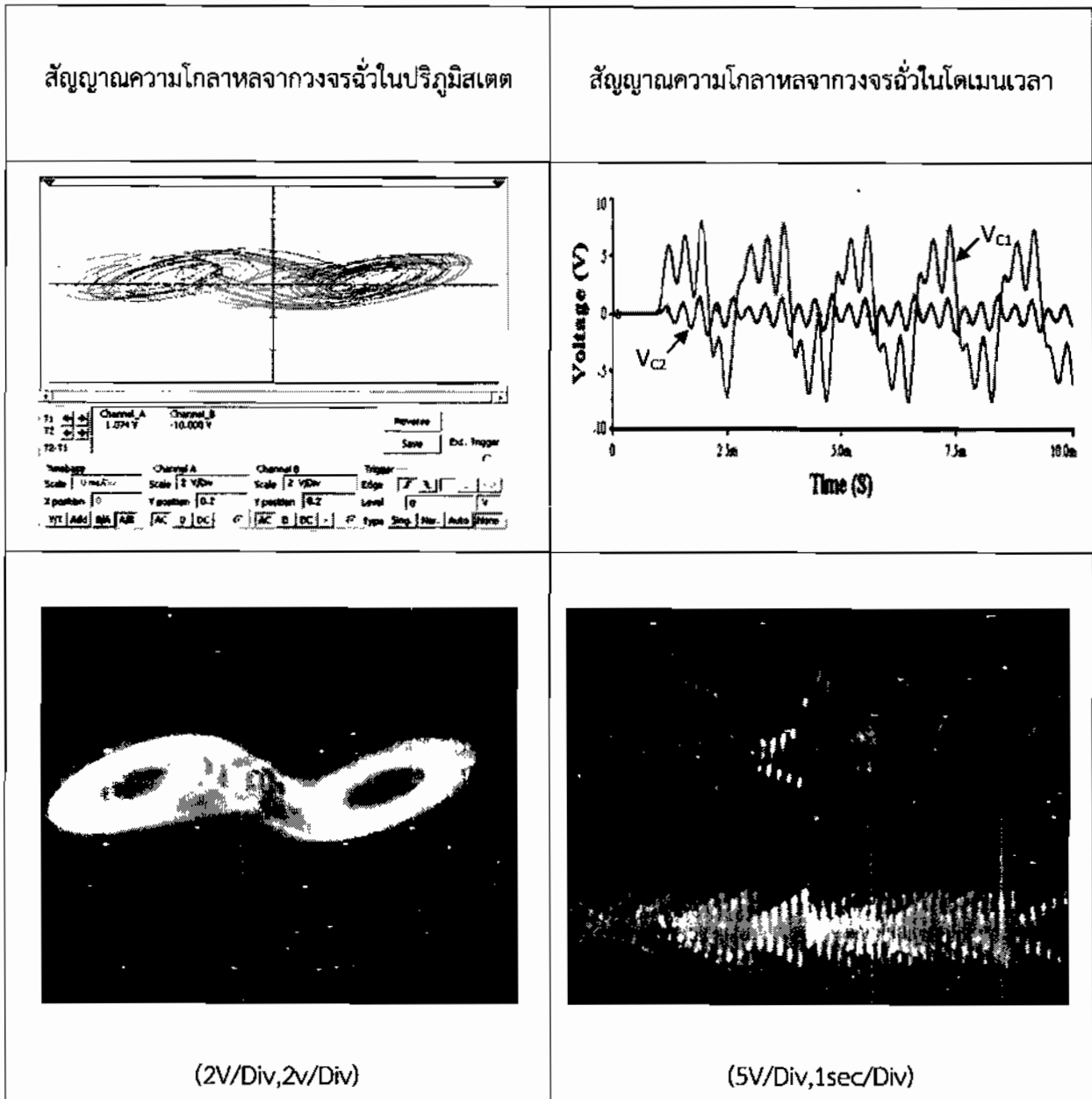
รูปที่ ก.15 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสแตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.7k Ω



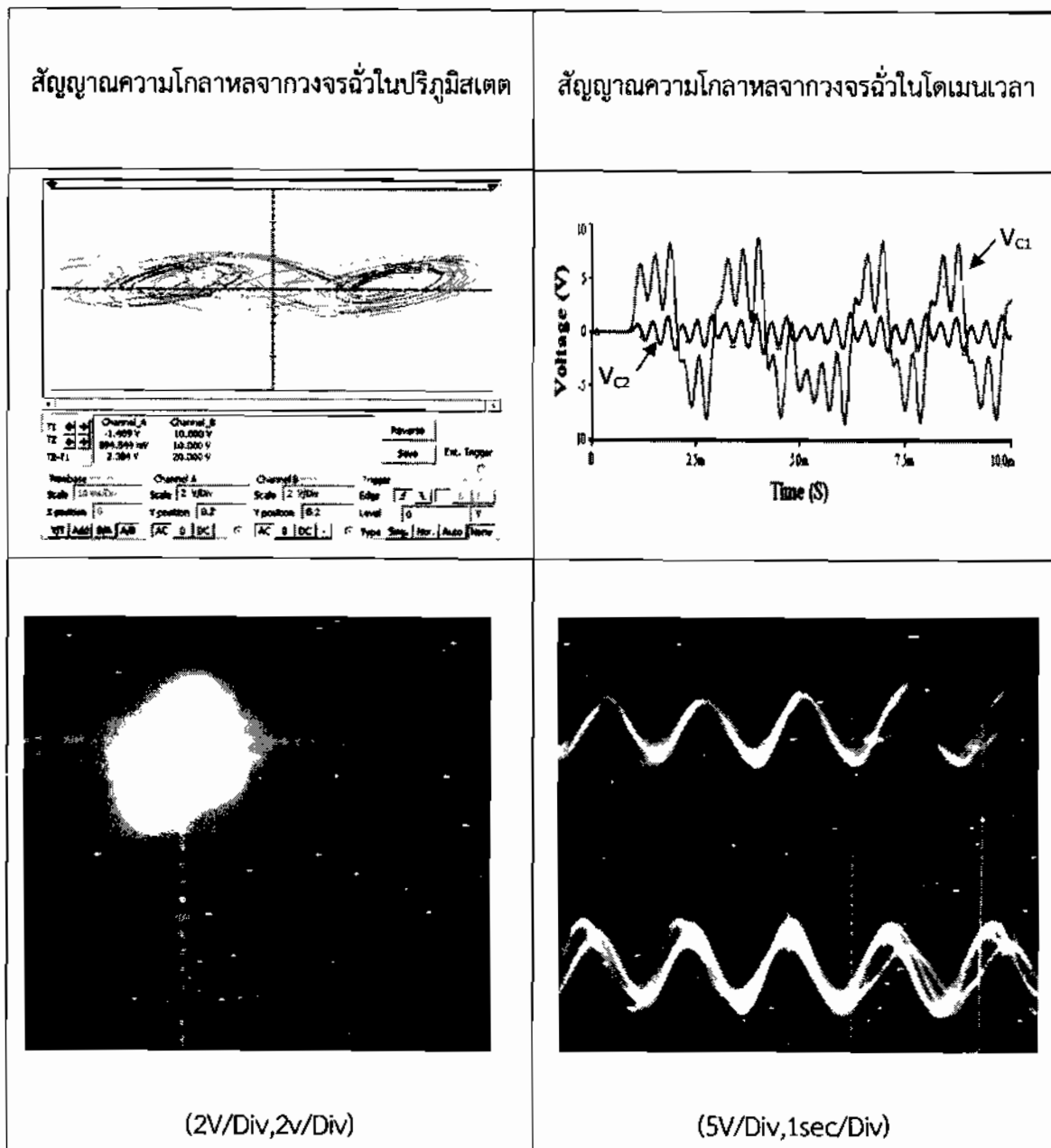
รูปที่ ก.16 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสแตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $1.706k\Omega$



รูปที่ ก.17 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $1.8\text{k}\Omega$

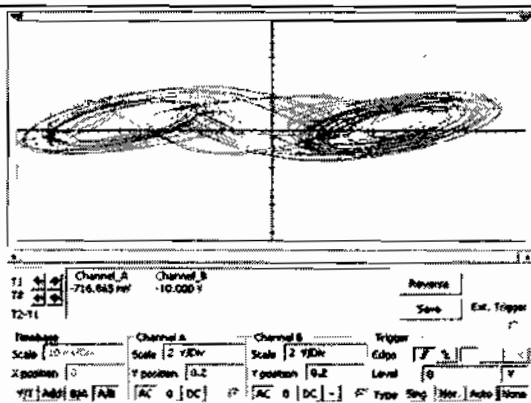


รูปที่ ก.18 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.82k Ω

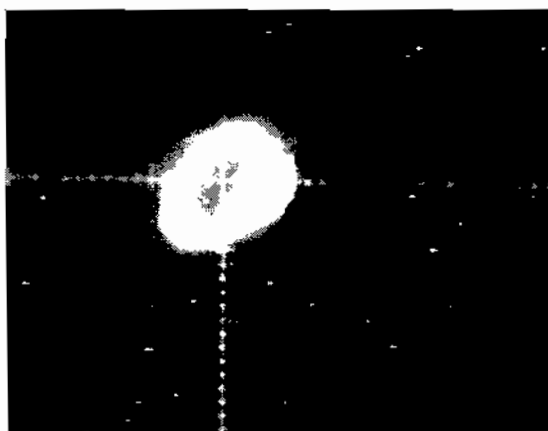
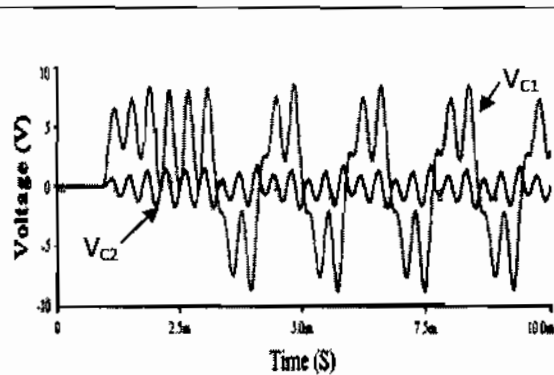


รูปที่ ก.19 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.86k Ω

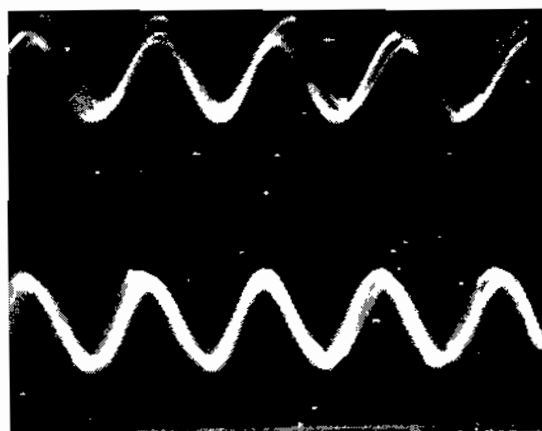
สัญญาณความถี่จากวงจรจิ้งในปริภูมิสเตต



สัญญาณความถี่จากวงจรจิ้งในโดเมนเวลา

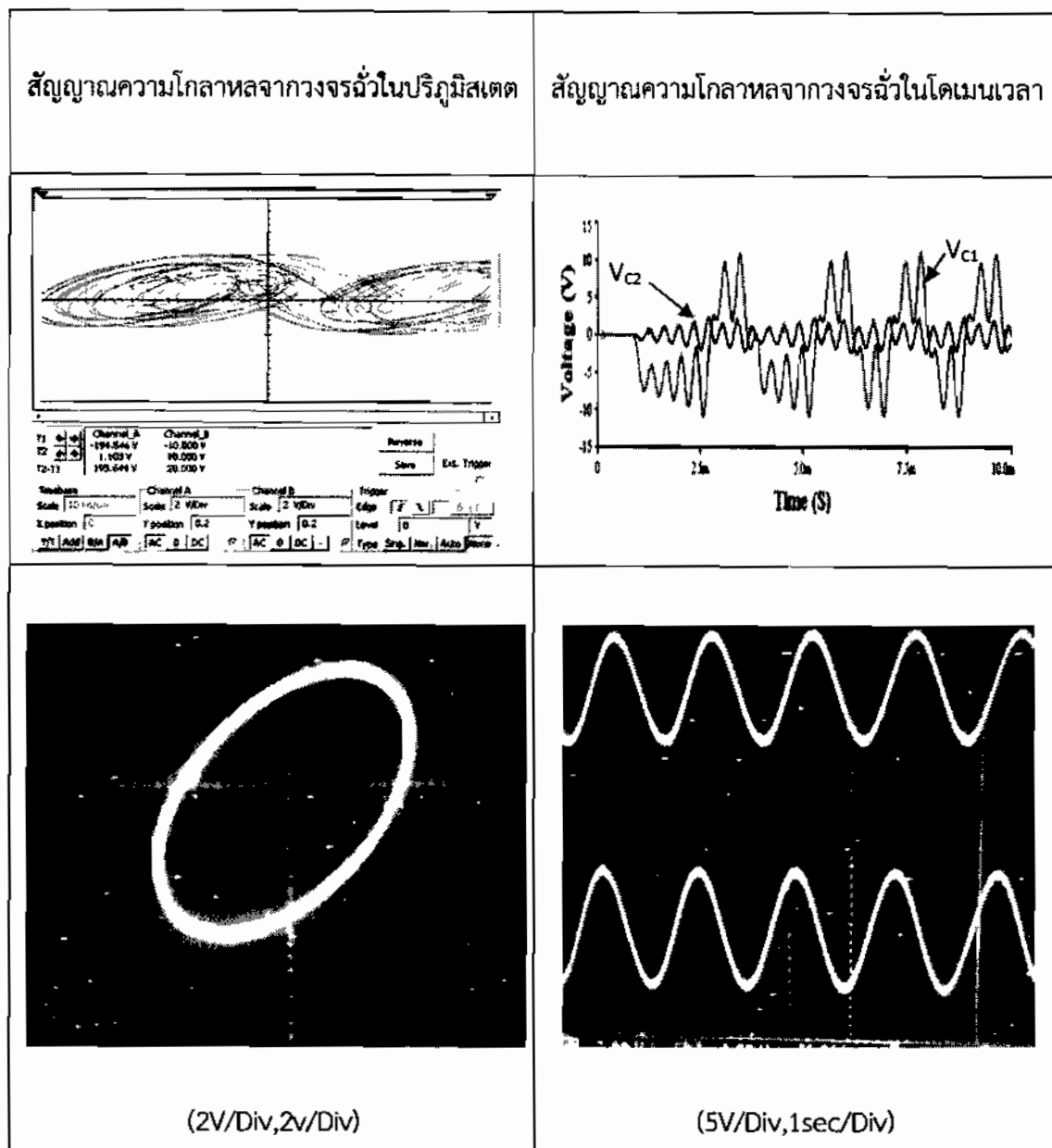


(2V/Div, 2v/Div)



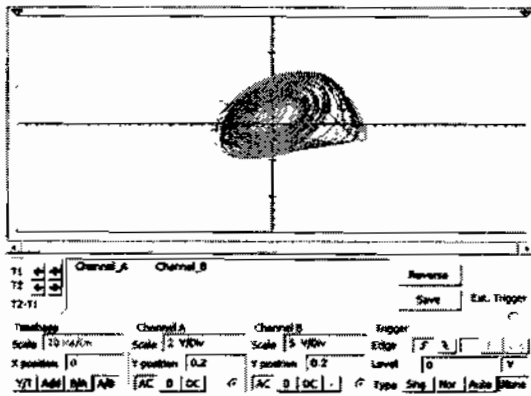
(5V/Div, 1sec/Div)

รูปที่ ก.20 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.88k Ω

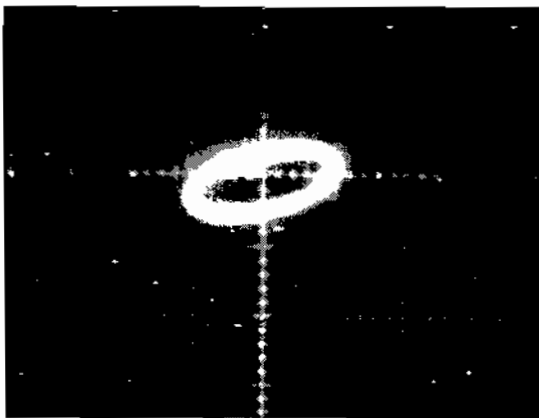
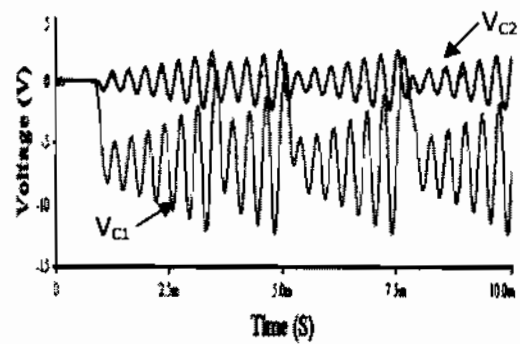


รูปที่ ก.21 สัญญาณโกลาหลในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.95k Ω

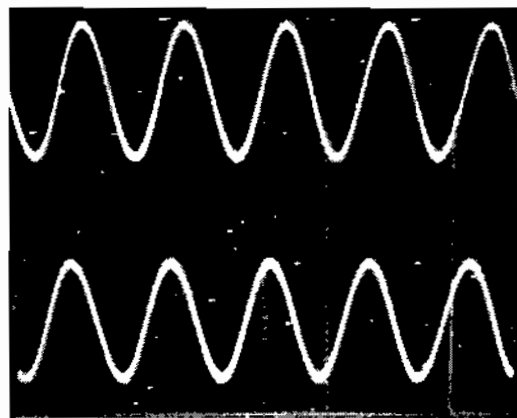
สัญญาณความถี่สูงจากวงจรขับในปริภูมิสเตต



สัญญาณความถี่สูงจากวงจรขับในโดเมนเวลา

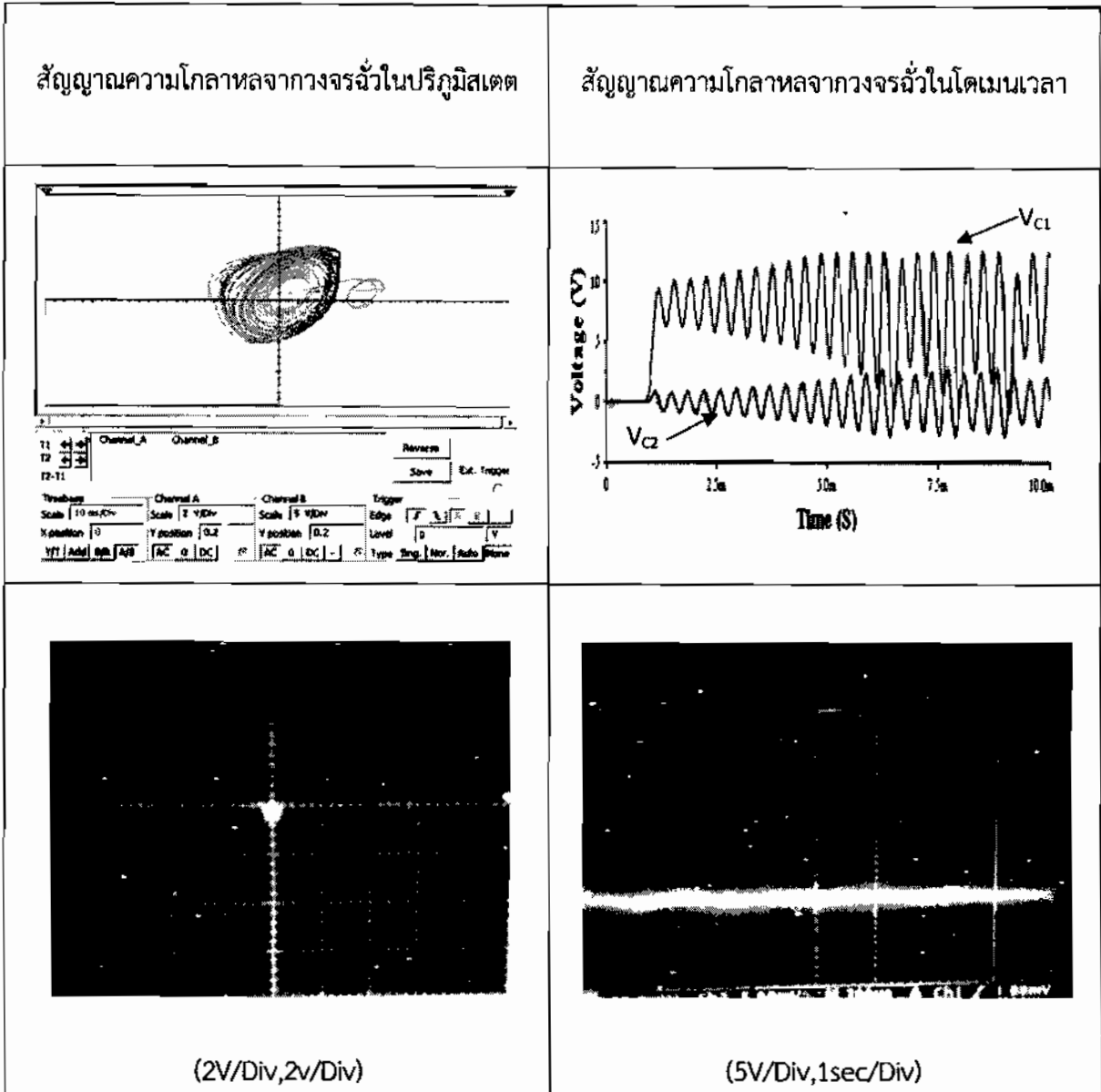


(2V/Div, 2v/Div)



(5V/Div, 1sec/Div)

รูปที่ ก.22 สัญญาณความถี่สูงจากวงจรขับในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 2kΩ



รูปที่ ก.23 สัญญาณความถี่สูงจากวงจรจั่วในปริภูมิสเตตและโดเมนเวลาที่กำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $2.06\text{k}\Omega$

ประวัติผู้ศึกษา



ประวัติผู้ศึกษา

ชื่อ - สกุล	นางสาวศิรินันท์ ธรรมวิเศษ
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 28 พฤษภาคม 2532
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 38 หมู่ 1 บ้านหัวโทน ตำบลหัวโทน อำเภอสวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด 45130
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2544 ประถมศึกษา โรงเรียนบ้านหัวโตนมิตรภาพที่ 165ฯ อำเภอสวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษา โรงเรียนหัวโตนวิทยา อำเภอสวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ. 2554 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.) สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (อิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อีเมลล์	promise_paty@hotmail.com
เบอร์โทรศัพท์	080-011-0459