

หุ่นยนต์ต่อลงนสำหรับงานภาคสนาม

Chaotic Robot for Field Tasks



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61502  
วัน,เดือน,ปี..... 18 ก.ค. 2549

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Chaotic Robot for Field Tasks**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN  
DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2004**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                  |   |
|------------------|---|
| หัวข้อปริญญาบัตร | หุ่นยนต์อวอนสำหรับงานภาคสนาม                      |
| นักศึกษา         | นายวีรเดช พาณิชย์วิสัย รหัสนักศึกษา 44010466      |
|                  | นายอัคร ไชยงค์ รหัสนักศึกษา 44010598              |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร. ปิติเขต ผู้รักษา<br>อาจารย์กฤดากร กล่อมการ |
| ระดับการศึกษา    | ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต                     |
| ภาควิชา          | วิศวกรรมสารสนเทศ                                  |
| ปีการศึกษา       | 2547  |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมสารสนเทศบัณฑิต

(รศ.ดร. ปิติเขต ผู้รักษา)

กฤดากร  
(อาจารย์กฤดากร กล่อมการ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                     |  |
|---------------------|--|
| หัวข้อปริญญาานิพนธ์ | หุ่นยนต์อลวนสำหรับงานภาคสนาม   |
| นักศึกษา            | นายวีรเดช พาณิชย์วิสัย รหัสนักศึกษา 44010466<br>นายอัคร ใจยงค์ รหัสนักศึกษา 44010598 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา    | รศ.ดร. ปิติเขต ผู้รักษา<br>อาจารย์กฤดากร กล่อมการ                                    |
| ระดับการศึกษา       | ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  |
| ภาควิชา             | วิศวกรรมสารสนเทศ   |
| ปีการศึกษา          | 2547   |

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา การสร้างหุ่นยนต์โดยนำสัญญาณเคออสติก (Chaotic) มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมวงโคจรเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพื่อใช้สำหรับงานภาคสนาม เพราะการสร้างหุ่นยนต์ในปัจจุบัน จำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมเพื่อที่จะควบคุมหุ่นยนต์ จึงทำให้หุ่นยนต์ในปัจจุบันมีข้อจำกัด เช่นการเคลื่อนที่ในพื้นที่ที่ไม่สามารถเจาะจงลักษณะของแผนที่ อีกทั้งยังมีความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรม และพัฒนาโปรแกรม

ดังนั้นในโครงการนี้เราจึงสร้างหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมวงจร โดยใช้สัญญาณเคออสติก มาประยุกต์เข้ากับหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานภาคสนามจริง เช่น หุ่นยนต์ตัดหญ้า เครื่องดูดฝุ่น หุ่นยนต์ลาดตระเวน หุ่นยนต์กู้พื้นที่และอื่นๆที่สามารถนำมาประยุกต์ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** Chaotic Robot for Field Tasks

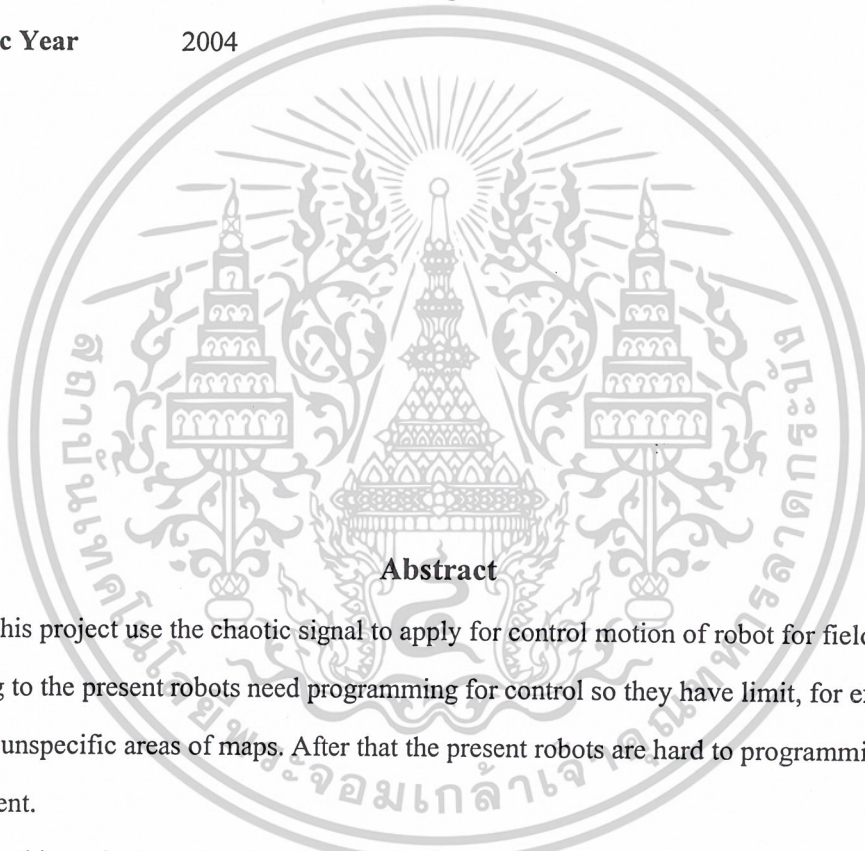
**Student** Mr.Weeradej Panichwisai ID. 44010466  
Mr.Akara Jaiyong ID. 44010598

**Advisor** Assoc. Prof. Dr.Pitikhate Sooraksa  
Mr. Kitdakorn Klomkarn

**Graduate Level** Bachelor Degree of Information Engineering

**Department** Information Engineering

**Academic Year** 2004



**Abstract**

This project use the chaotic signal to apply for control motion of robot for field tasks. According to the present robots need programming for control so they have limit, for example the motion in unspecific areas of maps. After that the present robots are hard to programming and development.

So this project, we develop chaotic circuit to control robot, for apply with field tasks. Such as Mowing Robot, Patrol Robot, Vacuum cleaner Robot etc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำ ได้ทำงานประสบความสำเร็จขึ้นมาได้ เพราะได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านต่างๆ ทั้งคำปรึกษาทางด้านวิชาการ และคำแนะนำในการปฏิบัติงานรวมถึงการช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆจาก รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา และอาจารย์กฤตากร ก่ออมการ ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์มา ณ ที่นี้ด้วย

ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้ความรักความห่วงใยตลอดจนให้การสนับสนุนทางการศึกษาด้วยดีมาตลอด รวมถึงเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ ตลอดจนให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทำโครงการ

คุณประโยชน์ต่างๆที่เกิดขึ้นจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายวีรเดช พาณิชย์วิสัย  
นายอัคร ใจยงค์  
ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย   | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ  | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ   | ค    |
| สารบัญ  | ง    |
| สารบัญรูป   | ช    |
| <br>  |      |
| บทที่ 1 บทนำ  | 1    |
| 1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา  | 1    |
| 1.2 จุดประสงค์  | 1    |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ  | 1    |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ   | 2    |
| 1.5 สถาปัตยกรรมหลักของโครงการ   | 2    |
| 1.5.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)  | 2    |
| 1.5.2 ซอฟต์แวร์ (Software)  | 2    |
| <br>  |      |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง  | 3    |
| 2.1 นิยามของเคออสติก  | 3    |
| 2.2 วงจร Chua (Chua's circuit)  | 6    |
| 2.3 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบความถี่ต่ำ (Slow frequency chaotic oscillation) | 11   |
| 2.4 Generalized Impedance Converter   | 13   |
| 2.5 Generalized Impedance Network   | 15   |
| 2.6 ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance simulation)                                    | 17   |
| 2.7 สัญญาณซีควเอนกึ่งแรนดัม (Pseudo Random Bit Sequence : PRBS)                   | 20   |
| 2.8 การสร้างสัญญาณนาฬิกา  | 25   |
| 2.9 วงจรขยาย (Amplifier)  | 26   |
| 2.10 มอเตอร์  | 34   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 วงจรที่สร้างขึ้น  | 39   |
| 3.1 วงจร Chua แบบคัปเปิล (Coupled Chua's circuits)  | 39   |
| 3.2 วงจร Chua แบบคัปเปิล ที่ควบคุมโดยสัญญาณซีเวนกิ่งแรนคัม<br>(Coupled Chua's circuits control by PRBS) | 40   |
| 3.3 วงจร Chua แบบห่วงโซ่ (Chains of Chua's circuits)  | 42   |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง  | 45   |
| 4.1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจร Chua  | 45   |
| 4.2 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจร Chua  | 52   |
| 4.3 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจร Chua แบบคัปเปิล   | 53   |
| 4.4 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจร Chua แบบคัปเปิลที่ควบคุม<br>โดยสัญญาณซีเวนกิ่งแรนคัม                        | 55   |
| 4.5 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจร Chua แบบห่วงโซ่   | 56   |
| 4.6 ผลการทดลองเรื่องวงจรขยายสัญญาณอลวน  | 58   |
| 4.7 ผลการจำลองทางเดินของหุ่นยนต์อลวน  | 63   |
| บทที่ 5 สรุปผลที่ได้  | 67   |
| 5.1 สรุปผลการทดลองจากวงจร Chua แบบต่างๆ   | 67   |
| 5.2 สรุปผลการทดลองเรื่องวงจรขยายสัญญาณอลวน  | 67   |
| 5.3 สรุปผลการทดลองเมื่อนำสัญญาณอลวนแบบต่าง ไปขับมอเตอร์กระแสตรง   | 68   |
| 5.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง  | 68   |
| 5.5 แนวทางในการพัฒนา  | 69   |
| บรรณานุกรม  | 70   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 วงจร Chua  | 6    |
| รูปที่ 2.2 $i-v$ characteristic ของ Chua ไคโอค  | 7    |
| รูปที่ 2.3 Chua ไคโอค   | 9    |
| รูปที่ 2.4 ตัวอย่างวงจร Chua ที่ใช้งานได้ในทางปฏิบัติ   | 10   |
| รูปที่ 2.5 สัญญาณอลวนจาก $V_{c1}, V_{c2}$ เมื่อเทียบกับเวลา                                     | 10   |
| รูปที่ 2.6 สัญญาณอลวนจาก $V_{c1}$ เป็นแกน $y$ และ $V_{c2}$ เป็นแกน $x$                          | 11   |
| รูปที่ 2.7 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ  | 12   |
| รูปที่ 2.8 สัญญาณอลวนจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ                                       | 12   |
| รูปที่ 2.9 Two-port network   | 13   |
| รูปที่ 2.10 วงจร GIC  | 14   |
| รูปที่ 2.11 วงจร GIN  | 16   |
| รูปที่ 2.12 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (inductance simulation)                                      | 17   |
| รูปที่ 2.13 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (inductance simulation) ที่นำมาใช้แทนตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง | 18   |
| รูปที่ 2.14 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ โดยใช้วงจร Chua                                   | 19   |
| รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณกึ่งเรนดัม   | 20   |
| รูปที่ 2.16 วงจรกำเนิดสัญญาณกึ่งเรนดัมที่สร้างจาก โพลีโนเมียล $1 + D + D^4$                     | 21   |
| รูปที่ 2.17 วงจรกำเนิดสัญญาณกึ่งเรนดัมที่สร้างจาก โพลีโนเมียล $1 + D^3 + D^4$                   | 23   |
| รูปที่ 2.18 ซีเควนเอาต์พุตของ $n = 4$   | 23   |
| รูปที่ 2.19 วงจรกำเนิดสัญญาณซีเควนกึ่งเรนดัม $n = 4$ ที่ป้องกันการเกิดซีเควน 0000               | 24   |
| รูปที่ 2.20 วงจรกำเนิดสัญญาณซีเควนกึ่งเรนดัม $n = 4$ ที่ป้องกันการเกิดซีเควน 0000               | 25   |
| รูปที่ 2.21 ไอซี LM555  | 25   |
| รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ                           | 26   |
| รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์ของออปแอมป์  | 26   |
| รูปที่ 2.24 คุณสมบัติด้านความต้านทานของออปแอมป์   | 28   |
| รูปที่ 2.25 วงจร Buffer หรือ Voltage follower   | 28   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.26 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส  | 29   |
| รูปที่ 2.27 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส                                     | 30   |
| รูปที่ 2.28 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วบวก                                   | 30   |
| รูปที่ 2.29 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบ                                    | 31   |
| รูปที่ 2.30 การป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับออปแอมป์    | 31   |
| รูปที่ 2.31 การขยายผลต่างของอินพุตทั้งสองของออปแอมป์                        | 32   |
| รูปที่ 2.32 การป้อนสัญญาณอินพุตรวมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์        | 32   |
| รูปที่ 2.33 วงจรขยายที่นำมาขยายสัญญาณอลวน                                   | 33   |
| รูปที่ 2.34 วงจรขยายที่นำมาขยายสัญญาณอลวน                                   | 34   |
| รูปที่ 2.35 การเกิดแรงบิดในตัวมอเตอร์กระแสตรง                               | 37   |
| รูปที่ 2.36 การหมุนของมอเตอร์ในทิศทางเมื่อกลับขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ | 38   |
| รูปที่ 3.1 วงจร Chua แบบคัปเปิล   | 39   |
| รูปที่ 3.1 วงจร Chua แบบคัปเปิล   | 40   |
| รูปที่ 3.2 วงจร Chua แบบคัปเปิล ที่ควบคุมโดยสัญญาณซีเคเวนกึ่งแรนดัม         | 41   |
| รูปที่ 3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณกึ่งแรนดัมที่นำไปใช้งานจริง                      | 41   |
| รูปที่ 3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา   | 42   |
| รูปที่ 3.5 วงจร Chua ห่วงโซ่แบบปิด  | 43   |
| รูปที่ 3.6 วงจร Chua ห่วงโซ่แบบเปิด   | 44   |
| รูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ ที่ใช้ในการทดลอง               | 45   |
| รูปที่ 4.2 ผลการทดลอง 4.1.1   | 46   |
| รูปที่ 4.3 ผลการทดลอง 4.1.1 เมื่อ $V_{c1}$ เป็นแกน y และ $V_{c2}$ เป็นแกน x | 46   |
| รูปที่ 4.4 ผลการทดลอง 4.1.2   | 47   |
| รูปที่ 4.5 ผลการทดลอง 4.1.2 เมื่อ $V_{c1}$ เป็นแกน y และ $V_{c2}$ เป็นแกน x | 47   |
| รูปที่ 4.6 ผลการทดลอง 4.1.3   | 48   |
| รูปที่ 4.7 ผลการทดลอง 4.1.3 เมื่อ $V_{c1}$ เป็นแกน y และ $V_{c2}$ เป็นแกน x | 48   |
| รูปที่ 4.8 ผลการทดลอง 4.1.4   | 49   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.9 ผลการทดลอง 4.1.4 เมื่อ $V_{c_1}$ เป็นแกน $y$ และ $V_{c_2}$ เป็นแกน $x$                                  | 49   |
| รูปที่ 4.10 ผลการทดลอง 4.1.5   | 50   |
| รูปที่ 4.11 ผลการทดลอง 4.1.5 เมื่อ $V_{c_1}$ เป็นแกน $y$ และ $V_{c_2}$ เป็นแกน $x$                                 | 50   |
| รูปที่ 4.12 ผลการทดลอง 4.1.6   | 51   |
| รูปที่ 4.13 ผลการทดลอง 4.1.6 เมื่อ $V_{c_1}$ เป็นแกน $y$ และ $V_{c_2}$ เป็นแกน $x$                                 | 51   |
| รูปที่ 4.14 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ  | 52   |
| รูปที่ 4.15 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป   | 52   |
| รูปที่ 4.16 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบคัปเปิลที่วัดสัญญาณจากจุด $V_{c_1}$ กับจุด $V_{c_2}$                  | 53   |
| รูปที่ 4.17 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบคัปเปิลที่วัดได้จากจุด $V_{c_1}$ กับจุด $V_{c_2}$<br>ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป | 53   |
| รูปที่ 4.18 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบคัปเปิลที่วัดสัญญาณจากจุด $V_{c_1}$ กับจุด $V_{c_2}$                  | 54   |
| รูปที่ 4.19 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบคัปเปิลที่วัดได้จากจุด $V_{c_1}$ กับจุด $V_{c_2}$<br>ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป | 54   |
| รูปที่ 4.20 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบคัปเปิลที่ควบคุม<br>โดยสัญญาณซีเวนกิ่งเรนดัม                          | 55   |
| รูปที่ 4.21 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบคัปเปิลที่ควบคุมโดยสัญญาณซีเวนกิ่งเรนดัม<br>ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป          | 55   |
| รูปที่ 4.22 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบปิด   | 56   |
| รูปที่ 4.23 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบปิด ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป  | 57   |
| รูปที่ 4.24 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบเปิด  | 57   |
| รูปที่ 4.25 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบเปิด ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป                                       | 58   |
| รูปที่ 4.26 รูปวงจรขยายที่ใช้ในการทดลอง  | 59   |
| รูปที่ 4.27 รูปวงจรขยายที่ใช้ในการทดลอง  | 61   |
| รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่ออัตราขยายเท่ากับ 3  | 62   |
| รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่ออัตราขยายเท่ากับ 4  | 62   |
| รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่ออัตราขยายเท่ากับ 12   | 63   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.31 ผลการจำลองทางเดินของหุ่นยนต์อลวน | 64   |
| รูปที่ 4.32 ผลการจำลองทางเดินของหุ่นยนต์อลวน | 66   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

เนื่องจากการสร้างหุ่นยนต์ในปัจจุบัน จำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมเพื่อที่จะควบคุมหุ่นยนต์ จึงทำให้หุ่นยนต์ในปัจจุบันมีข้อจำกัด เช่นการเคลื่อนที่ในพื้นที่ที่ไม่สามารถเจาะจงลักษณะของแผนที่ เพราะถ้าเกิดกรณีที่ไม่ตรงกับเงื่อนไขที่โปรแกรมไว้นั้น หุ่นยนต์จะไม่สามารถทำงานได้โดยตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้ นอกจากนี้หุ่นยนต์ในปัจจุบันนั้นมีความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมและพัฒนาโปรแกรม จึงทำให้เกิดความยากลำบากในการผลิต

ดังนั้นการประยุกต์ใช้สัญญาณเคออสติก (Chaotic) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณแรนดัม (Random) แต่สามารถที่จะควบคุมการเกิดของสัญญาณได้ จึงเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมวงโคจรหุ่นยนต์ที่ต้องการใช้สำหรับงานภาคสนาม และสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีในอนาคตที่จะเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม

### 1.2 จุดประสงค์

1.2.1 สามารถนำสัญญาณเคออสติก มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมวงโคจรเคลื่อนที่หุ่นยนต์เพื่อใช้ในงานภาคสนาม

1.2.2 เพื่อพัฒนาหุ่นยนต์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

1.3.2 สร้างวงจรมอดูเลชัน (Amplifier) เพื่อใช้ในการขยายสัญญาณออสซิลเลชัน และนำสัญญาณที่ได้ไปขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงได้ เนื่องจากมีสมมติฐานว่าจะนำวงจรมอดูเลชันมาใช้ ดังนั้นวงจรในข้อ 3.1 จึงต้องเป็นวงจรมอดูเลชันสัญญาณออสซิลเลชันแบบความถี่ต่ำ (Slow frequency chaotic oscillation)

1.3.3 เนื่องจากต้องสร้างวงจรมอดูเลชันสัญญาณออสซิลเลชันแบบความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงต้องศึกษาทฤษฎีในการสังเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำ (synthetic inductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 สร้างแบบจำลองหุ่นยนต์ (model) ที่สามารถรองรับสัญญาณอลวน ที่สร้างมาจาก วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้

1.3.5 นำแบบจำลองหุ่นยนต์ข้างต้น มาทำการทดลองกับรูปแบบต่างๆ

1.3.6 สูดทำย่นำแบบจำลองหุ่นยนต์ หาข้อดี และข้อเสีย เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับสร้าง “หุ่นยนต์อลวนสำหรับงานภาคสนาม” ต่อไป

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสร้างหุ่นยนต์ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และสามารถนำไปใช้กับงาน ภาคสนามได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2 สามารถนำสัญญาณเคออสติก มาประยุกต์ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ ของหุ่นยนต์ที่ต้องการใช้งานได้

## 1.5 สถาปัตยกรรมหลักโครงการ

### 1.5.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

|                        |         |         |
|------------------------|---------|---------|
| - คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล | จำนวน 2 | เครื่อง |
| - บอร์ดวงจรทดลอง       | จำนวน 1 | ชุด     |
| - ออสซิลโลสโคป         | จำนวน 1 | เครื่อง |
| - แหล่งจ่ายไฟ          | จำนวน 1 | เครื่อง |
| - มัลติมิเตอร์         | จำนวน 1 | เครื่อง |

### 1.5.2 ซอฟต์แวร์ (Software)

- โปรแกรม PSPICE เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบวงจรอลวนและใช้ในการ จำลองรูปแบบของสัญญาณ

- โปรแกรม POTEUS เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบวงจรและจำลองการ ทำงานของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 นิยามของเคออสติก

เคออส ตามความหมายในพจนานุกรมหมายถึง ความสับสนวุ่นวาย ไร้ระเบียบแต่เคออส ที่เราได้ศึกษานั้นคือการศึกษาเกี่ยวกับเคออสในทางคณิตศาสตร์ หรือ deterministic chaos โดยในความหมายทางวิทยาศาสตร์ คือ สภาพหรือกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) หากมีการกระทบเพียงเล็กน้อย อาจจะทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เป็นเส้นทางคดเคี้ยว วุ่นวายอลวน หรือในบางครั้งอาจจะเกิดการกระโดดข้าม ดังนั้นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจึงไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายให้ถูกต้องแม่นยำได้

พฤติกรรมแบบอลวน (chaotic behavior) เป็นพฤติกรรมที่ดูไร้ระเบียบ ที่ดูเหมือนว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างสะเปะสะปะหรือเชิงสุ่มเอา (random) แต่เป็น deterministic ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งที่จริงแล้วแฝงไปด้วยความเป็นระเบียบ (Order)

ระบบที่ประพุดิตัวแบบเคออส จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้น (sensitivity dependent on initial condition) ทำให้ไม่สามารถทำนายได้ในระยะยาว (long-term unpredictable) โดยความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการวัดเงื่อนไขเริ่มต้น จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล (exponential) เมื่อเวลาผ่านไป เคออสได้มีการค้นพบมานานแล้วตั้งแต่สมัยของ J. H. Poincare (1854-1912) ซึ่งตอนนั้น Poincare ได้พิสูจน์ว่าระบบสุริยะจักรวาล แบบเคออส แต่สมัยนั้นยังไม่บัญญัติศัพท์อลวน chaos ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าเป็น pathological case

และจากหลัก uncertainty principle ของ Heisenberg ทำให้เราไม่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ (parameter) ทุกตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เพราะการให้ความแม่นยำอย่างหนึ่งมาก จะส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนในอีกอย่างหนึ่ง และถึงแม้ตัวแปรที่อธิบายระบบของเรามีเพียงตัวแปรเดียว ความแม่นยำของค่าที่วัดได้ก็จะจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง ความไม่แน่นอนที่เหลืออยู่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งทำให้เลขนัยสำคัญที่เราได้ลดลงเรื่อยๆจนเราทำนายอะไรไม่ได้เลย ดังนั้นเคออส จึงเกิดขึ้นได้ทั้งในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติ

สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้น จะเกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อเวลาผ่านไป เป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อนเริ่มแรก เนื่องจากความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นพฤติกรรมแบบอลวน (chaotic behavior) จึงไม่มีในระบบที่เป็นเชิงเส้นเคออส เกิดขึ้นได้เฉพาะกับระบบที่เป็นไม่เป็นเชิงเส้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(non-linear) แต่ไม่ใช่ว่าระบบที่เป็นไม่เป็นเชิงเส้น จะเกิดความอลวนเสมอไป จะมีช่วงพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบประพฤติตัวแบบอลวน แต่ระบบที่เป็นไม่เป็นเชิงเส้นบางระบบก็เป็นเคออสตลอดเวลา

จุดที่เป็นประเด็นสำคัญอีกอย่างหนึ่งในทฤษฎีเคออส คือความอ่อนไหวอย่างสูงของเงื่อนไขเริ่มต้น กับ Principle of weak ที่ถือว่าสาเหตุเบื้องต้นเพียงนิดเดียว สามารถก่อให้เกิดผลกระทบอย่างมากได้

### คุณลักษณะของเคออส

ระบบที่เป็นเคออส จะต้องประกอบไปด้วยลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) มีคุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้น คุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับ คุณสมบัติแบบเชิงเส้น โดยที่ฟังก์ชัน  $f$  จะมีคุณสมบัติเชิงเส้นก็ต่อเมื่อ  $f(x+y) = f(x) + f(y)$  นั่นก็คือ ในระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น ผลลัพธ์ของระบบทั้งหมดไม่เท่ากับผลรวมของผลลัพธ์ที่เกิดจากส่วนย่อย ๆ รวมกัน (โดยอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้) ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้เองที่ทำให้ระบบที่แสดงความเป็นอลวนไม่ได้รับการศึกษามากในอดีต เพราะค่อนข้างยากในการที่จะศึกษาและเข้าใจ ข้อพึงระวังก็คือ การที่กล่าวว่าระบบเคออส จำต้องเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ไม่ได้หมายความว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นทุกระบบจะเป็นระบบเคออส เสมอไป
- 2) ไม่ใช่เกิดแบบสุ่ม (คือเป็น deterministic ไม่ใช่ probabilistic) หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งก็คือ ในระบบ chaos พฤติกรรมทั้งหลายเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอน เหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าแบบการทอดลูกเต๋า จึงไม่ใช่ ความเป็นเคออส แต่เป็นการสุ่ม การแปลคำนี้เป็นภาษาไทยโดยใช้คำว่า “ทฤษฎีอลวน” จึงเป็นการแปลที่ไม่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเข้าใจผิดว่าการเป็นเคออส ไม่ใช่การสุ่มจึงมีคนเรียกเคออส ว่า deterministic chaos
- 3) ไวต่อสภาวะเริ่มต้น (sensitivity to initial conditions) การเริ่มต้นที่เงื่อนไขต่างกันนิดเดียวอาจทำให้ผลในตอนสุดท้ายต่างกันต่างกันมาก สาเหตุที่ระบบเคออส ไวต่อสภาวะเริ่มต้นก็เพราะว่ามันจะขยายความแตกต่างให้เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วเช่น ที่พบบ่อยก็คือการขยายความแตกต่างให้เร็วขึ้นในระดับเลขยกกำลัง (exponential) ของเวลา
- 4) ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าในระยะยาวได้ (long-term prediction is impossible) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากข้อ 3 เพราะการที่ไวต่อสภาวะเริ่มต้น จะทำให้เราไม่รู้ว่า ระบบที่เราสนใจอยู่จะเป็นอย่างไรในระยะยาว อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติข้อนี้ไม่ได้แปลว่า การทำนายระยะสั้น (short-term prediction) จะเป็นสิ่งที่เป็นไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ระบบเคออส ยังมีสมบัติอีกประการหนึ่ง คือ การแสดงลักษณะ “คล้ายกับตัวเอง” (self similarity) หรือที่เรียกว่า “แฟร็กทัล” (fractal) นั่นเอง ลักษณะนี้จะปรากฏขึ้นเมื่อเราพลอตเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในระบบพิกัดที่บ่งถึงสภาวะ (phase space) ลักษณะคล้ายกับตัวเองนี้ หมายความว่า ไม่ว่า เราจะมองเส้นทางการเคลื่อนที่นี้จากสเกลเล็กหรือใหญ่แค่ไหน มันก็ยังมีลักษณะเหมือนเดิม อย่างไรก็ตาม ลักษณะคล้ายกับตัวเองแบบแฟร็กทัลนี้ ไม่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดเคออส แต่อย่างไรก็ตาม เพียงแต่มีพบร่วมกันบ่อยครั้งเท่านั้น

### ประโยชน์ของเคออส

ในการศึกษาทฤษฎีเคออส มีประโยชน์อย่างน้อยใน 3 ทางด้วยกัน คือ ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต ใช้ในการสร้างระบบเคออส และใช้ในการควบคุม-สร้างความเสถียรให้กับระบบ ดังสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 1) ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต

อย่างที่กล่าวมาข้างต้นว่า แม้ว่าเราจะไม่สามารถทำนายอนาคตของระบบเคออส ในระยะยาวได้ แต่เราก็ยังสามารถทำนายอนาคตของมันในระยะสั้นได้ หากเราสามารถหาโมเดลที่อธิบายพฤติกรรมของระบบนั้น และทราบสภาวะเริ่มต้นอย่างแม่นยำพอสมควร เช่นในปัจจุบัน ได้ใช้เคออส การวิจัยเพื่อทำนายอนุกรมตามลำดับเวลา (time-series data)

#### 2) ใช้ในการสร้างระบบเคออส

ทำไมเราต้องสร้างระบบเคออส ขึ้นมาด้วย ก็เพราะ มีผู้เชื่อว่า “ในธรรมชาติ ความอลวนเป็นสิ่งสากลมากกว่าและดีกว่าระเบียบแบบง่าย ๆ” อย่างเช่น บริษัท มัทลีซิจิเตยังใช้ทฤษฎีเคออสควบคุมหัวฉีดของเครื่องล้างจานซึ่งพบว่าสามารถล้างจานได้สะอาดโดยประหยัดน้ำได้กว่าเครื่องล้างจานแบบอื่นๆ ทั้งนี้เพราะเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดที่ดูเหมือนไร้ระเบียบทำให้ครอบคลุมพื้นที่ได้ดีกว่าการเคลื่อนที่ตามแบบแผนปกติ

#### 3) ใช้ในการควบคุม-สร้างความเสถียรให้กับระบบ

การที่ระบบแบบเคออส นั้นไวต่อสภาวะเริ่มต้นมาก การรบกวนเพียงเล็กน้อยจึงอาจก่อให้เกิดผลขยายได้มากในงานด้านวิศวกรรมควบคุม (control engineering) การเติมสัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยที่เหมาะสมสู่ระบบที่เป็นระบบเคออส จึงสามารถใช้ควบคุมให้ระบบนั้นอยู่ในสภาวะเสถียรหรือขับเคลื่อนให้ระบบนั้นไปสู่สภาวะที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

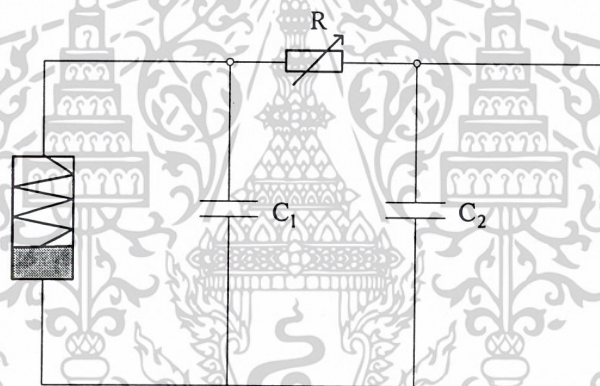
นอกจากการประยุกต์ใช้หลักๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทฤษฎีเคออส ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้

อีกในหลายสาขา เช่น ในด้านการสื่อสาร เราสามารถใช้สัญญาณแบบเคออส ในการเข้ารหัสข้อมูล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(encryption) เพื่อป้องกันคนแอบดูข้อมูล หรือใช้หลักการของทฤษฎีนี้ช่วยให้การหาค่าที่ดีที่สุด (optimization) ของฟังก์ชันหนึ่ง ได้ค่าที่ดีที่สุดที่แท้จริง (global optimum) ได้ง่ายขึ้น เพราะเคออสสามารถช่วยให้หาค่าที่ดีที่สุดเฉพาะบริเวณ (local optimum) ได้

## 2.2 วงจร Chua (Chua's circuit)

วงจร Chua เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณอลวนที่มีความหลากหลาย เนื่องจากความหลากหลาย และเป็นสากลวงจร Chua จึงได้รับความสนใจอย่างมาก และกลายเป็นมาตรฐานสำหรับวงจรอลวน สาเหตุสำคัญที่ทำให้วงจร Chua นี้ง่าย เพราะส่วนประกอบของวงจรประกอบไปด้วยอุปกรณ์เพียงแค่อุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 อุปกรณ์ และอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีก 1 อุปกรณ์



รูปที่ 2.1 วงจร Chua

วงจร Chua ได้แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ตามสมการที่ (2.1)

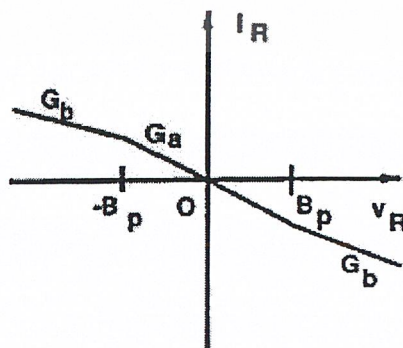
$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{dv_1}{dt} &= \frac{1}{R}(v_2 - v_1) - \hat{f}(v_1) \\
 C_2 \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{R}(v_1 - v_2) + i_3 \\
 L \frac{di_3}{dt} &= -v_2
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

โดยที่

$$i_R = \hat{f}(v_R) = G_b v_R + \frac{1}{2}(G_a - G_b) \{ |v_R + B_p| - |v_R - B_p| \} \tag{2.2}$$

จากสมการที่ (2.2) เป็นการแสดงคุณสมบัติของความต้านทานลบแบบ 3-segment (3-segment odd-symmetric voltage-current characteristic) ของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Chua ไดโอด) โดยมีความชันเป็น  $G_a, G_b$  และโดยจุดแรงดันพังทลาย (breakpoint) อยู่ที่  $v_R = -B_p$  และ  $v_R = B_p$  โดยที่  $v-i$  characteristic ของ Chua ไดโอด แสดงดังรูปที่ 2.2

สมการอนุพันธ์ (differential equation) ดังที่แสดงในสมการที่ (2.1) จัดเป็น *autonomous dynamical system* ซึ่งแสดงว่าเมื่อไม่มีการส่งสัญญาณจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ระบบจะดำเนินไปเรื่อยๆ ตามคุณสมบัติธรรมชาติ (natural dynamics) เมื่อ  $R, L$  และ  $C_1, C_2$  ในวงจร Chua มีค่าเป็นบวกจากจุดที่แสดงถึงพลังงานสะสม ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำงานเพื่อกำเนิดสัญญาณ (oscillate) และเป็นตัวเดียวที่จะทำให้เกิดการอลวน โดยที่ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ตัวอื่นในวงจร (passive linear elements) ในขณะที่ตัวต้านทานจะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่



รูปที่ 2.2  $i-v$  characteristic ของ Chua ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรในของสมการสถานะ (state equation) ในสมการที่ (2.1) ให้อยู่ในรูปที่ไม่มีมิติ (dimensionless)

$$\frac{dx}{d\tau} = k\alpha(y - x - f(x)) \quad (2.3)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = k(x - y + z) \quad (2.4)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = -k\beta y \quad (2.5)$$

โดยที่

$$f(x) = bx + \frac{1}{2}(a-b)\{|x+1| - |x-1|\} \quad (2.6)$$

และ

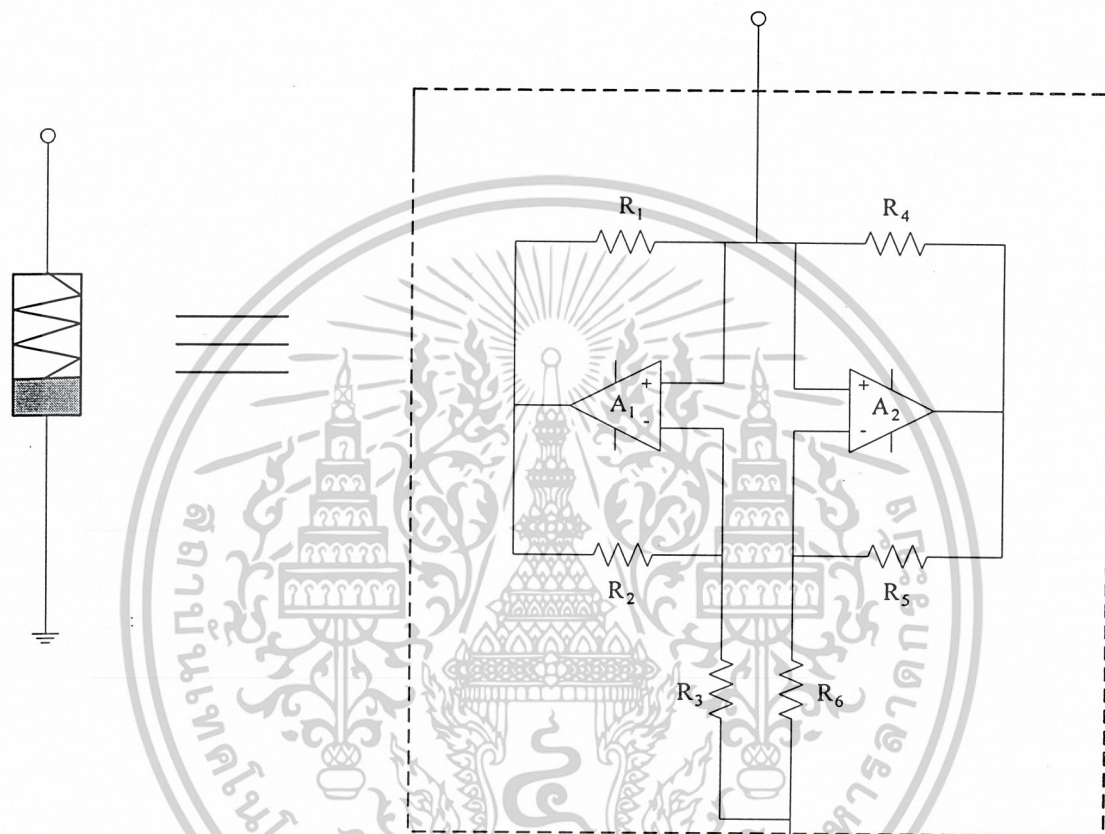
$$\begin{aligned} x &= \frac{\Delta v_1}{B_p}, & y &= \frac{\Delta v_2}{B_p}, & z &= i_3 \left( \frac{R}{B_p} \right) \\ \alpha &= \frac{\Delta C_2}{C_1}, & \beta &= \frac{\Delta R^2 C_2}{L}, & k &= \text{sgn}(RC_2) \\ a &= RG_a, & b &= RG_b, & \tau &= \frac{\Delta t}{|RC_2|} \end{aligned} \quad (2.7)$$

ค่าพารามิเตอร์  $k$  มีค่าเท่ากับ 1 หรือ -1 โดยคำนวณตามทิศทางของเวลา โดยทั้งกรณีที่พารามิเตอร์  $k$  มีค่าเป็น 1 และ -1 จะมีได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกัน ยกเว้นกรณีที่อินทิเกรตระบบ (สมการ (2.3)-(2.5)) ย้อนกลับในรูปของเวลา

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าสัญญาณอลวนที่สร้างจากวงจร Chua นั้นจะแปรตามค่าของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว (Chua ไดโอด) ซึ่งถ้าต้องการปรับเปลี่ยนสัญญาณก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าต่างๆ ตามสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น

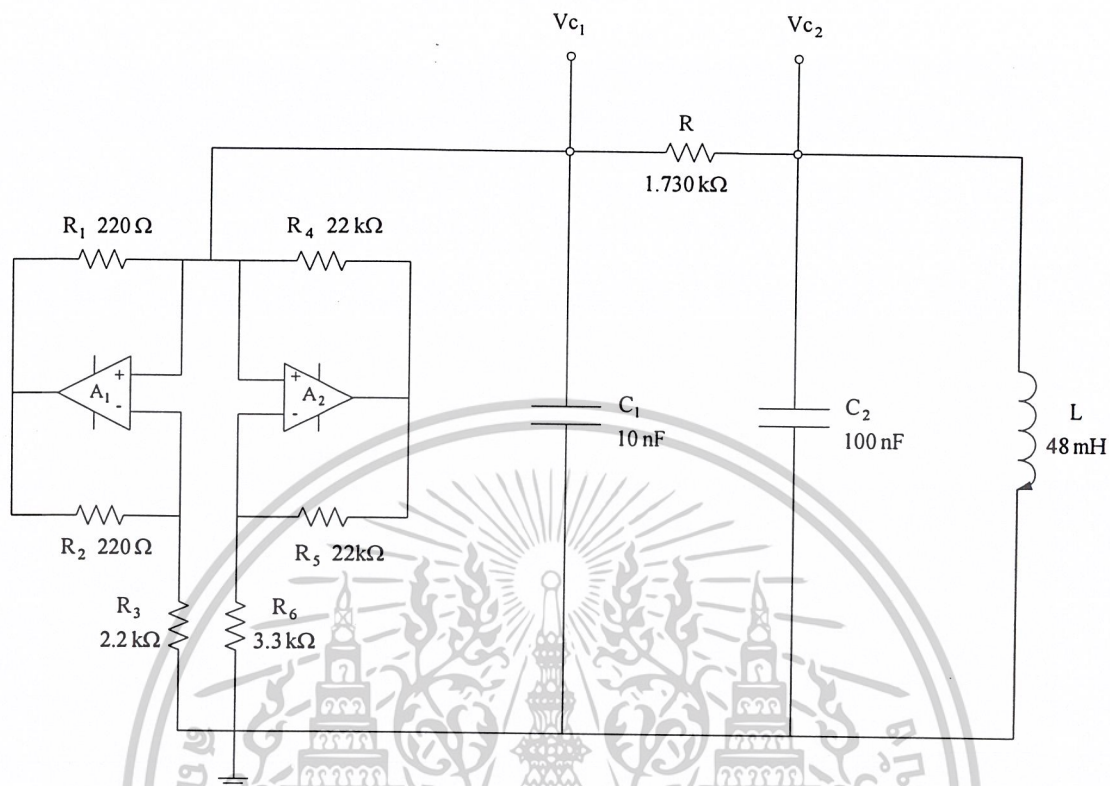
จากรูปที่ 2.1 วงจร Chua มีตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในวงจร Chua มักจะเรียกว่า Chua ไดโอด โดย Chua ไดโอดจะมีคุณลักษณะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear characteristic) ซึ่งสามารถสร้างได้โดยใช้ operation amplifiers (OP-AMP) ซึ่งแสดงคังรูปที่ 2.3 สำหรับตัวอย่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจร Chua ที่ใช้ ออปแอมป์ (OP-AMP) แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยที่ความต่างศักย์ที่  $V_{c1}, V_{c2}$  เทียบกับเวลาจากวงจรรูปที่ 2.4 แสดงในรูปที่ 2.5 และเมื่อนำเอาความต่างศักย์  $V_{c1}, V_{c2}$  มาเปรียบเทียบกันแสดงในรูปที่ 2.6

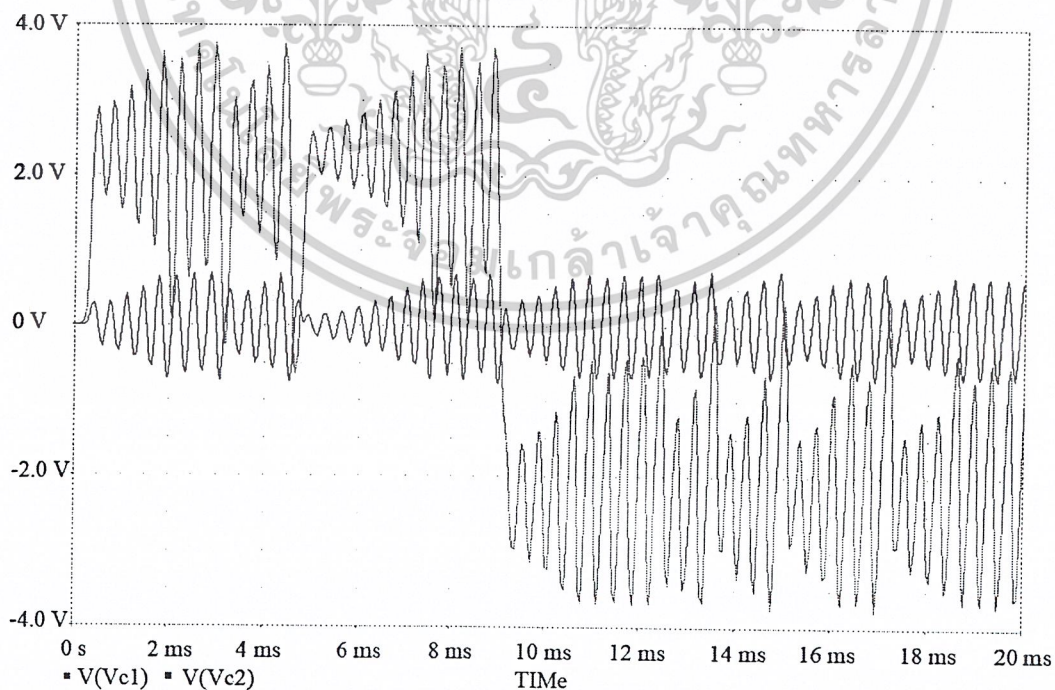


รูปที่ 2.3 Chua ไดโอด

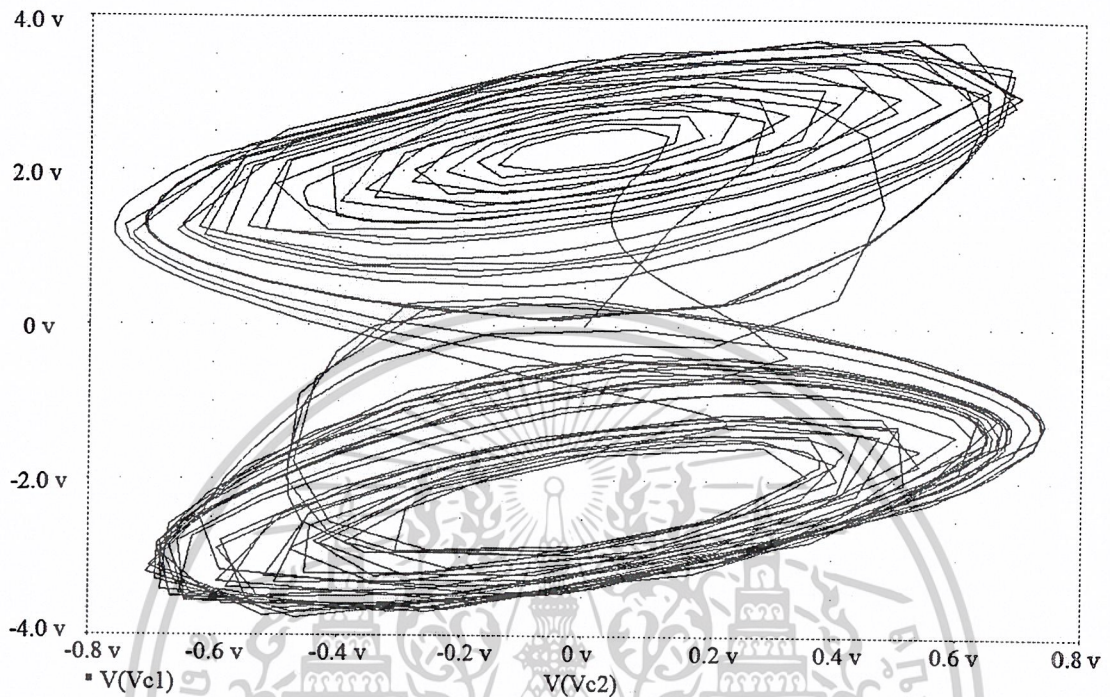
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างวงจร Chua ที่ใช้งานได้ในทางปฏิบัติ



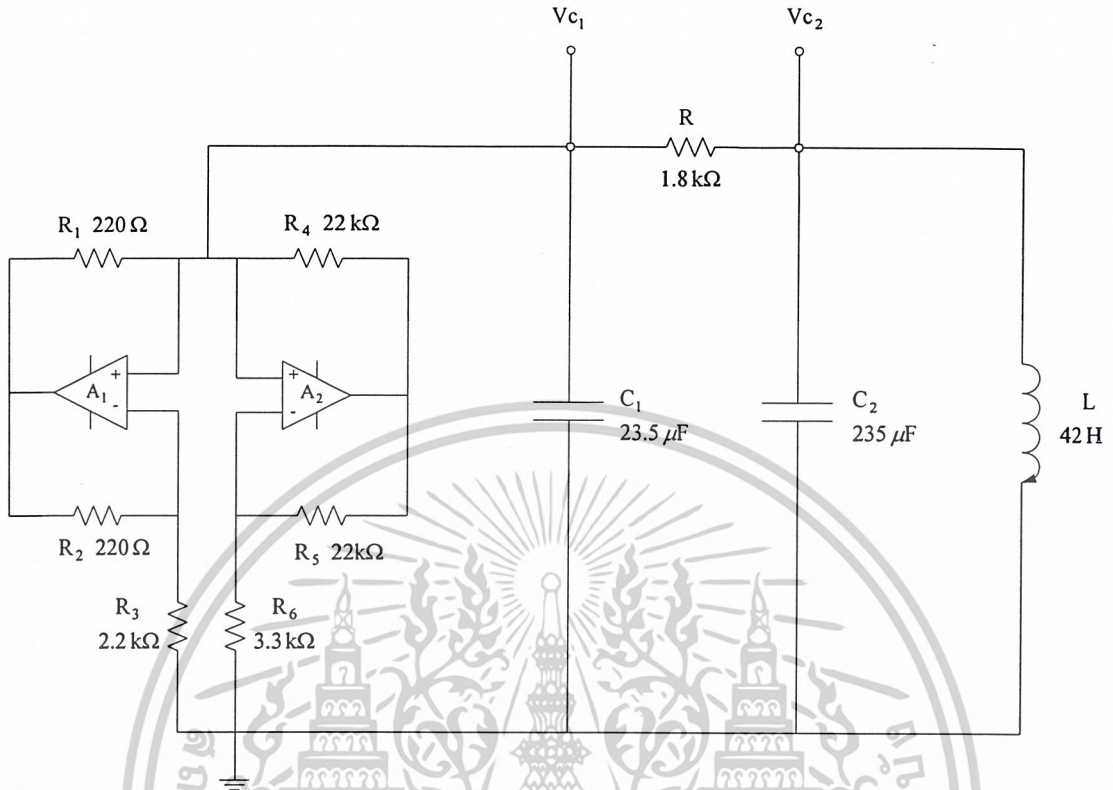
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยผู้จัดทำเอกสารไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.5 สัญญาณที่วัดได้จาก  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  เมื่อเทียบกับเวลา  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



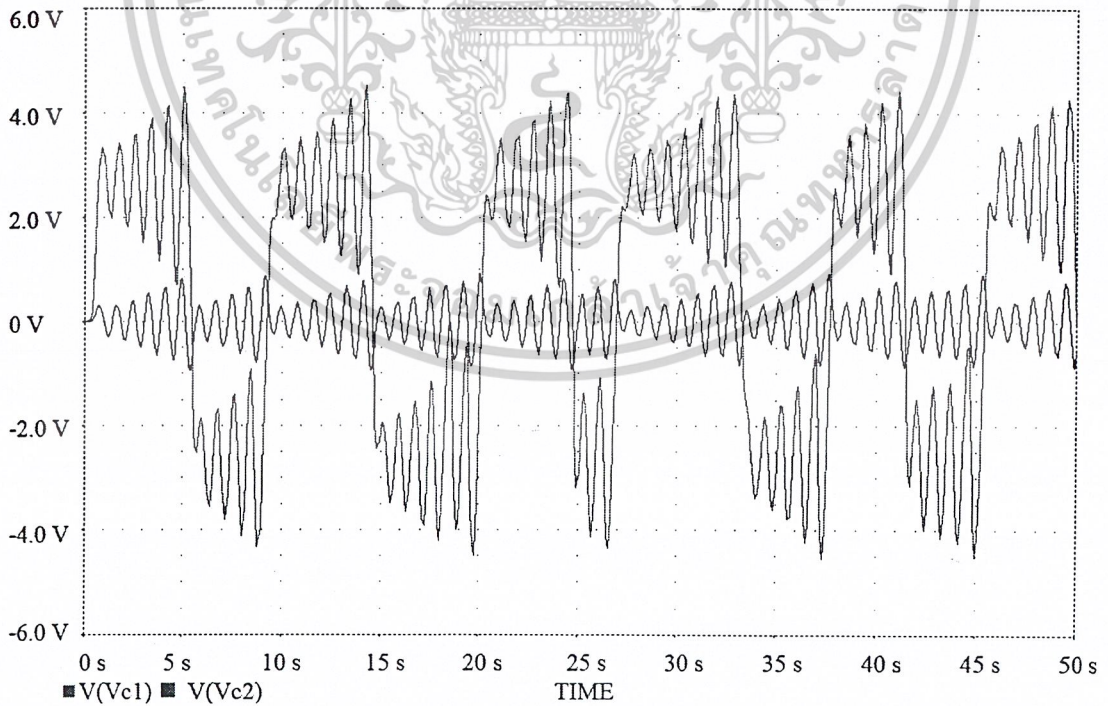
รูปที่ 2.6 สัญญาณอลวนจาก  $V_{c1}$  เป็นแกน y และ  $V_{c2}$  เป็นแกน x

### 2.3 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ (Slow frequency chaotic oscillation)

เมื่อพิจารณาสัญญาณอลวนในรูปที่ 2.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าวงจรมีความถี่สูง ซึ่งเมื่อทำสัญญาณที่ได้ไปขับมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) จะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วงจร Chua ที่มีความถี่ต่ำ ในการที่จะทำให้อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณอลวน (chaotic oscillation) นั้นมีความถี่ช้าลงนั้น จะต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถเก็บพลังงานได้เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น การเพิ่มค่า  $C_1, C_2$  และ  $L$  ในสมการที่ (2.3) – (2.7) จากรูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงวงจร และสัญญาณเมื่อทำการเพิ่มค่า  $C_1, C_2$  และ  $L$  ซึ่งมีค่าถี่ต่ำมากเมื่อเทียบกับวงจรในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.7 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.8 สัญญาณอลวนจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปในรูปที่ 2.7 ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 23.5 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 235.0 \mu\text{F}$  ซึ่งสามารถหาได้ตามห้องตลาด แต่ในขณะที่ค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L = 42 \text{ H}$  ซึ่งสร้างได้ยากในทางปฏิบัติ ถ้าเราทำการผันขดลวดขึ้นมานั้น ขนาดตัวเก็บประจุจะมีขนาดใหญ่ และไม่มีทางเลือกตรงอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (simulation) โดยนำทฤษฎี Generalized Impedance Converter เข้ามาใช้

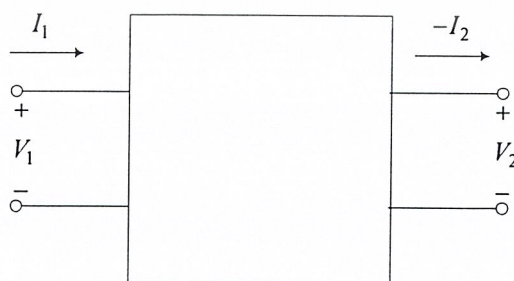
## 2.4 Generalized Impedance Converter

ก่อนที่จะกล่าวถึงทฤษฎี Generalized Impedance Converter นั้นต้องกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ ABCD (transmission parameters) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของ two-port network เราสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\begin{bmatrix} V_1(s) \\ I_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2(s) \\ -I_2(s) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยที่ค่าความต่างศักย์ และกระแสเป็นของ Two-port network ที่แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถเขียนค่าพารามิเตอร์ได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\begin{aligned} A(s) &= \left. \frac{V_1(s)}{V_2(s)} \right|_{I_2(s)=0} & B(s) &= \left. \frac{V_1(s)}{-I_2(s)} \right|_{V_2(s)=0} \\ C(s) &= \left. \frac{I_1(s)}{V_2(s)} \right|_{I_2(s)=0} & D(s) &= \left. \frac{I_1(s)}{-I_2(s)} \right|_{V_2(s)=0} \end{aligned} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.9 Two-port network

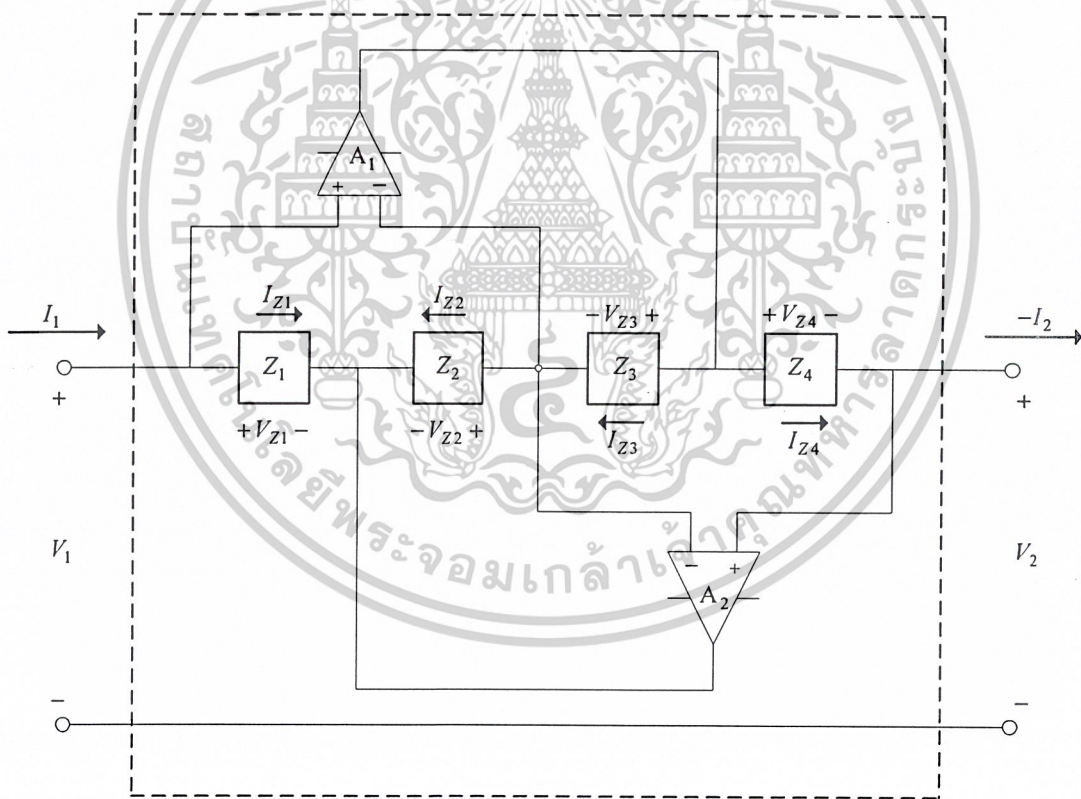
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Generalized Impedance Converter (GIC) คือ การนำ two-port active network ทำให้เป็น active RC passive network เสมือน ซึ่งสามารถทำได้หลายแบบ โดยวงจรแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งการวิเคราะห์ห้วงจรนี้ ขั้นแรกต้องพิจารณาความต่างศักย์ระหว่างอินพุตของออปแอมป์ ซึ่งในอุดมคตินั้นมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจึงสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11)

$$V_{Z1}(s) - V_{Z2}(s) = 0 \rightarrow V_{Z1}(s) = V_{Z2}(s) \tag{2.10}$$

$$V_{Z3}(s) - V_{Z4}(s) = 0 \rightarrow V_{Z3}(s) = V_{Z4}(s) \tag{2.11}$$

ซึ่งทำให้  $V_1(s) = V_2(s)$  ดังนั้นค่า  $A(s) = 1$  และค่า  $B(s) = 0$  โดยค่า  $C(s)$  และค่า  $D(s)$  สามารถหาได้ตามขั้นตอนข้างล่างนี้



รูปที่ 2.10 วงจร GIC

ขั้นตอนการวิเคราะห์ GIC

1.)  $V_{Z4} = Z_4 I_{Z4} = Z_4 (-I_2)$

2.)  $V_{Z3} = Z_3 I_{Z3} = V_{Z4} = Z_4 (-I_2)$  [จาก สมการที่ (2.11) และ 1.)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.)  $I_{Z3} = \frac{Z_4}{Z_3}(-I_2)$  [ จาก 2.) ]
- 4.)  $I_{Z2} = I_{Z3} = \frac{Z_4}{Z_3}(-I_2)$  [ ไม่มีกระแสไหลเข้าขาอินพุทของออปแอมป์ ]
- 5.)  $V_{Z2} = Z_2 I_{Z2} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_3}(-I_2)$  [ จาก 4.) ]
- 6.)  $V_{Z1} = Z_1 I_{Z1} = V_{Z2} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_3}(-I_2)$  [ จาก สมการที่ (2.10) และ 5.) ]
- 7.)  $I_1 = I_{Z1} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_1 Z_3}(-I_2)$  [ จาก 6.) ]

จาก 7.) เป็นสมการ  $I_1(s)$  ในเทอมของ  $-I_2(s)$  และไม่ได้อยู่ในรูปของ  $V_2(s)$  ทำให้สามารถสรุปได้ว่า  $C(s)=0$  และ  $D(s)=Z_2(s)Z_4(s)/Z_1(s)Z_3(s)$  จึงสรุปได้ว่าวงจรในรูปที่ 2.10 มีค่าพารามิเตอร์ ABCD (transmission parameters) แสดงได้ตามสมการที่ (2.12)

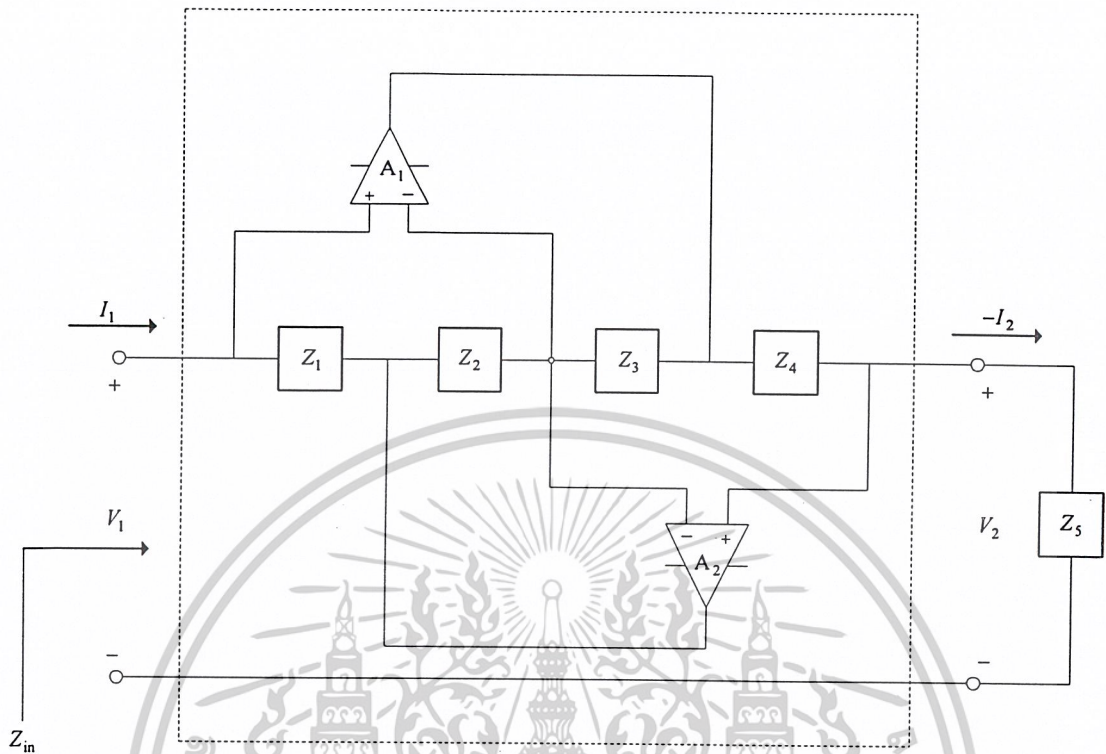
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{Z_2(s)Z_4(s)}{Z_1(s)Z_3(s)} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

## 2.5 Generalized Impedance Network

ถ้านำ impedance  $Z_5(s)$  มาต่อที่พอร์ตทางด้านขวา (พอร์ต 2) ของ network นั้นจะได้ one-port หรือ two-terminal network โดยได้แสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอินพุท impedance  $Z_{in}(s) = V_1(s)/I_1(s)$ ,  $V_2(s) = Z_5(s)[-I_2(s)]$  และสมการที่ (2.8) แสดงได้ตามสมการที่ (2.13)

$$Z_{in}(s) = \frac{V_1(s)}{I_1(s)} = \frac{A(s)V_2(s) - B(s)I_2(s)}{C(s)V_2(s) - D(s)I_2(s)} = \frac{A(s)Z_5(s) + B(s)}{C(s)Z_5(s) + D(s)} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 วงจร GIN

จากรูปที่ 2.11 two-port network นั้นคือ GIC ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นถ้าใช้ ABCD พารามิเตอร์ ในสมการที่ (2.12) แสดงในรูปของ  $Z_{in}(s)$  ในสมการที่ (2.13) นั้นจะได้

$$Z_{in}(s) = \frac{Z_1(s)Z_3(s)Z_5(s)}{Z_2(s)Z_4(s)} \quad (2.14)$$

โดยที่  $Y_{in}(s) = 1/Z_{in}(s)$  จะได้

$$Y_{in}(s) = \frac{Y_1(s)Y_3(s)Y_5(s)}{Y_2(s)Y_4(s)} \quad (2.15)$$

โดยสมการที่ (2.14) และ (2.15) นั้นจะเรียกว่า *generalized impedance network (GIN)*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

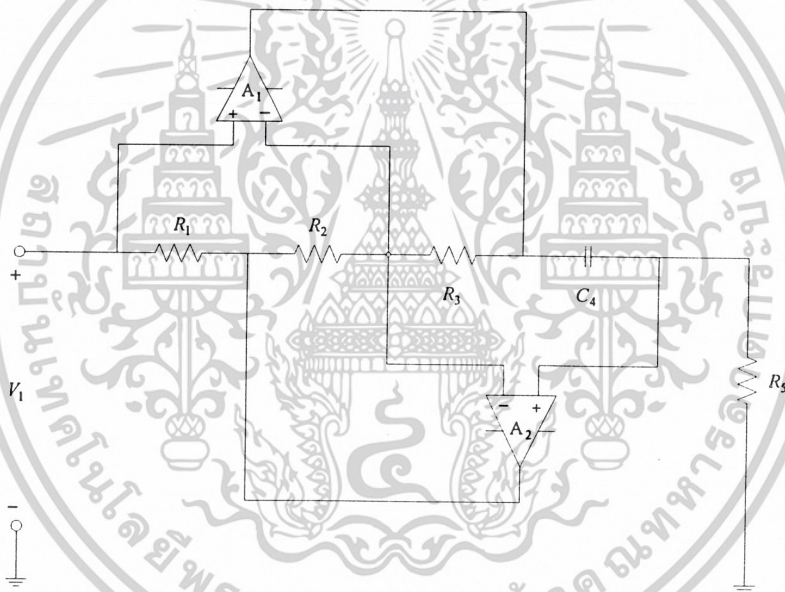
## 2.6 ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance simulation)

ตัวเหนี่ยวนำในเนตเวิร์ค หรือ วงจรใดๆ สามารถใช้อุปกรณ์ RC แทนได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำเลย ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า การสังเคราะห์ความเหนี่ยวนำ (synthetic inductors)

### การสังเคราะห์ความเหนี่ยวนำ (Synthetic inductors)

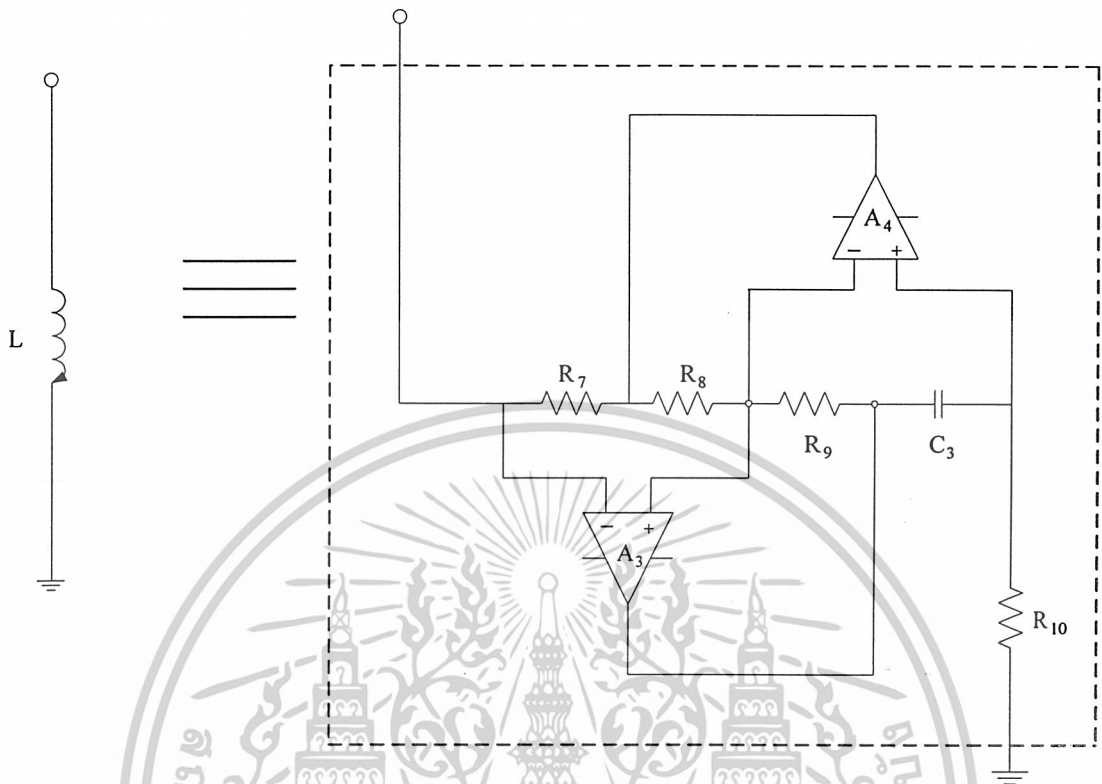
จากหัวข้อ GIN ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ถ้าทำการแทน  $Z_4(s)$  ด้วย ตัวเก็บประจุ  $C_4$  และทำการแทน  $Z_i$  ( $i=1,2,3,5$ ) ด้วย ตัวต้านทาน  $R$  จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.16)

$$Z_{in}(s) = \frac{sR_1 R_3 C_4 R_5}{R_2} \quad L_{eq} = \frac{R_1 R_3 C_4 R_5}{R_2} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.12 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (inductance simulation)

จากหัวข้อที่ผ่านมา นั้น เราต้องการวงจรกำเนิดสัญญาณอสวน ซึ่งมี  $L=42\text{ H}$  สามารถใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนได้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

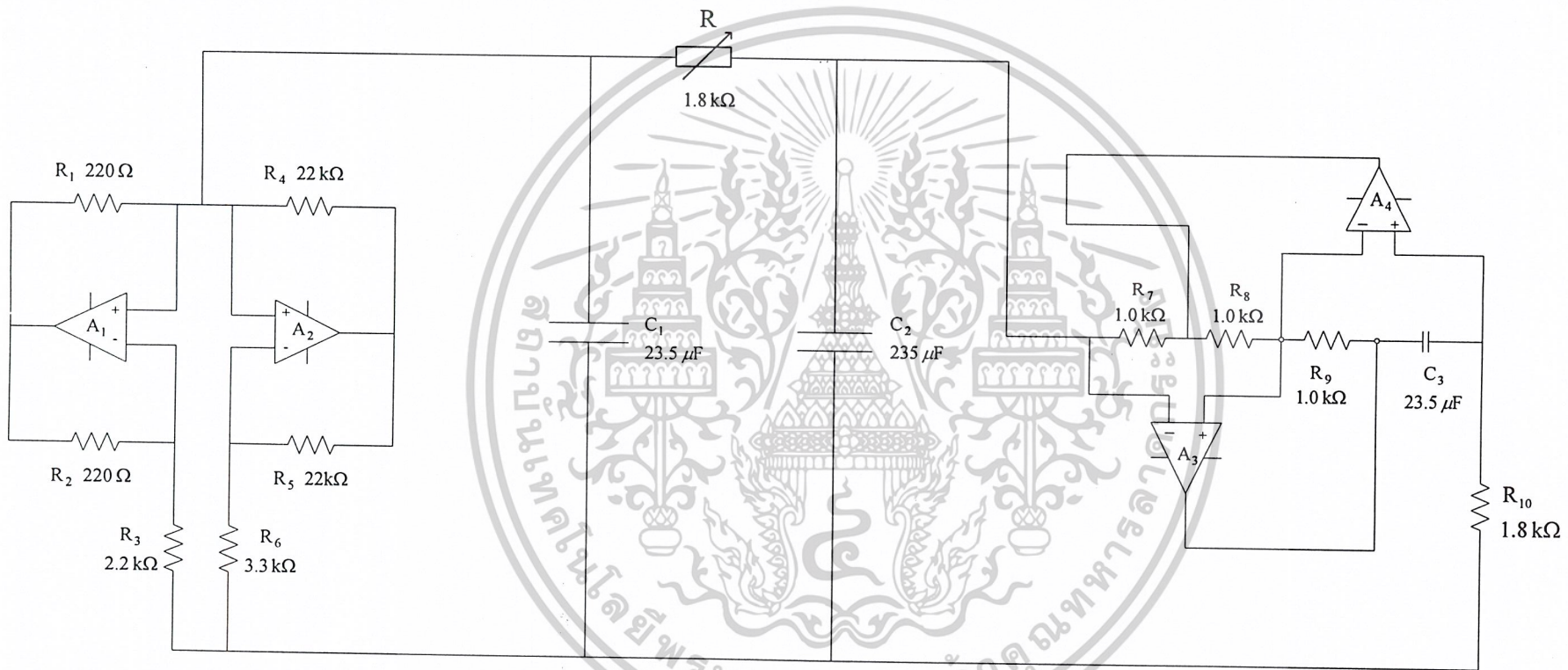


รูปที่ 2.13 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (inductance simulation) ที่นำมาใช้แทนตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง  
 ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.17)

$$L_{eq} = \frac{R_7 R_9 R_{10} C_3}{R_8} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (17) นั้นถ้าต้องการ  $L = L_{eq} = 42.3 \text{ H}$  แล้ว ค่า  $R_7 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_{10} = 1.8 \text{ k}\Omega$  และค่า  $C_3 = 23.5 \mu\text{F}$

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีความถี่ต่ำ โดยใช้วงจร Chua จะได้  
 ดังรูปที่ 2.14



Chua ไดโอด

วงจรถ้าเห็นขานาเสมือน (inductance simulation)

รูปที่ 2.14 วงจรถ้าเห็นขานาเสมือน (inductance simulation) โดยใช้วงจรถ้าเห็นขานาเสมือน (inductance simulation) โดยใช้วงจรถ้าเห็นขานาเสมือน (inductance simulation)

**2.7 สัญญาณซีแควนกึ่งเรนดัม (Pseudo Random Bit Sequence : PRBS)**

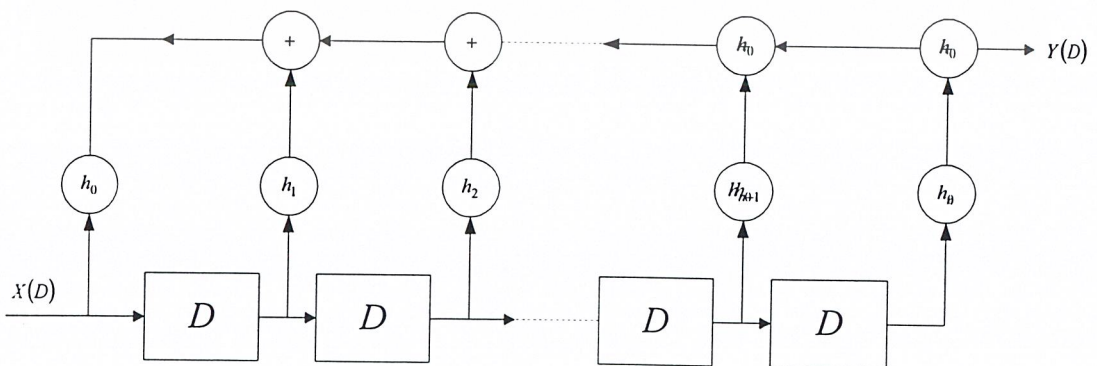
สัญญาณซีแควนกึ่งเรนดัมสามารถสร้างได้จากวงจรที่ประกอบด้วยชิฟต์รีจิสเตอร์และเอ็กคูซีฟออกเกต โดยโครงสร้างวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 จากรูปค่าสัมประสิทธิ์  $h$  ถ้าหากมีค่าเท่ากับ 0 แล้วส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างเอาต์พุตของชิฟต์รีจิสเตอร์แต่ละตัวกับเอ็กคูซีฟออกเกตจะเปิดออก แต่ถ้า  $h$  มีค่าเท่ากับ 1 แล้วจะเป็นการต่อวงจร จากโครงสร้างเราสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างเอาต์พุต  $Y(D)$  และอินพุต  $X(D)$  ได้คือ

$$Z(D) = \frac{Y(D)}{X(D)} = h_0 + h_1 D + h_2 D^2 + \dots + h_n D^n \tag{2.18}$$

โดย  $n$  เป็นขนาดลำดับของโพลีโนเมียลมีขนาดเท่ากับจำนวนของรีจิสเตอร์ จากวงจรอินพุตเป็นการป้อนกลับจากเอาต์พุต ดังนั้นจากโครงสร้างวงจรสามารถเขียนเป็นสมการโพลีโนเมียลได้

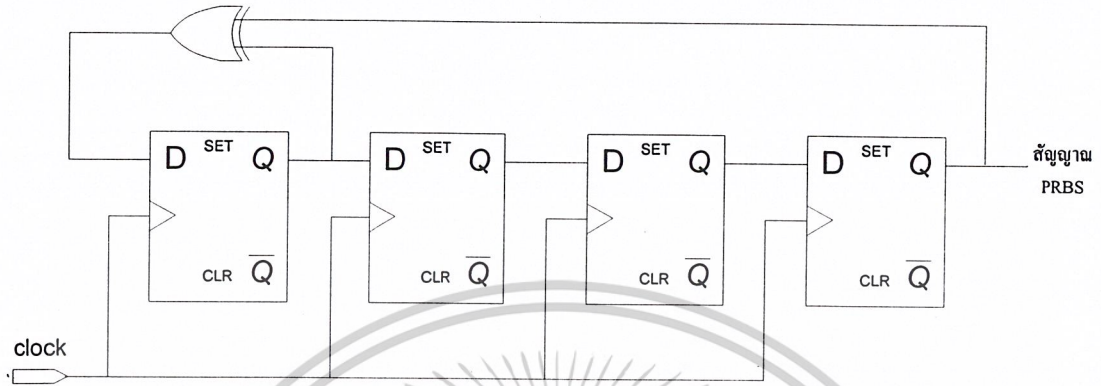
$$Z(D) = 1 + \sum_{i=1}^n h_i D^i \tag{2.19}$$

จากสมการที่ (2.19) เราเรียกโพลีโนเมียลลำดับ  $n$  นี้ว่าโพลีโนเมียลคุณสมบัติ (characteristic polynomial) โดยวงจรกำเนิดสัญญาณซีแควนกึ่งเรนดัมที่ให้ขนาดของซีแควนสูงสุดเมื่อโพลีโนเมียลคุณสมบัติเป็นโพลีโนเมียลที่ไม่สามารถลดรูปหรือแยกตัวประกอบได้ (irreducible polynomial) และเป็นโพลีโนเมียลแบบ primitive โดยคุณสมบัติของโพลีโนเมียลแบบนี้จะไม่เป็นตัวประกอบของ  $(1 + D^k)$  ถ้า  $k$  น้อยกว่า  $(2^n - 1)$  สำหรับค่าโพลีโนเมียลแบบ primitive ลำดับต่าง ๆ แสดงได้  $D$



รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณซีแควนกึ่งเรนดัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงจรกำเนิดสัญญาณกึ่งเรนดัมที่สร้างจากโพลีโนเมียล  $1 + D + D^4$

การกำเนิดสัญญาณกึ่งเรนดัมจากโพลีโนเมียล  $1 + D + D^4$  โดยแสดงวงจรได้ดังรูปที่ 2.16 จากวงจรซีพรีจิสเตอร์ใช้ D ฟลิปฟลอปมีจำนวนเท่ากับลำดับของโพลีโนเมียลคือ 4 ตัว อินพุตของวงจรได้จากการป้อนกลับของการเอ็กซอร์กันระหว่าง  $Q_1$  และ  $Q_4$

สำหรับขนาดซีเควนสูงสุดของวงจรกำเนิดสัญญาณกึ่งเรนดัมที่ออกแบบจากโพลีโนเมียลแบบ primitive ลำดับ  $n$  จะมีขนาด  $2^n - 1$  โดยจำนวนบิต '1' ในซีเควนเท่ากับ  $2^{n-1}$  และจำนวนบิต '0' เท่ากับ  $2^{n-1} - 1$  หรือถ้าหาก  $n$  มีลำดับสูง ๆ แล้วจะถือได้ว่าการเกิดของบิต '0' จะเท่ากับการเกิดบิต '1'

ตารางการแสดงความสัมพันธ์ของซีเควน

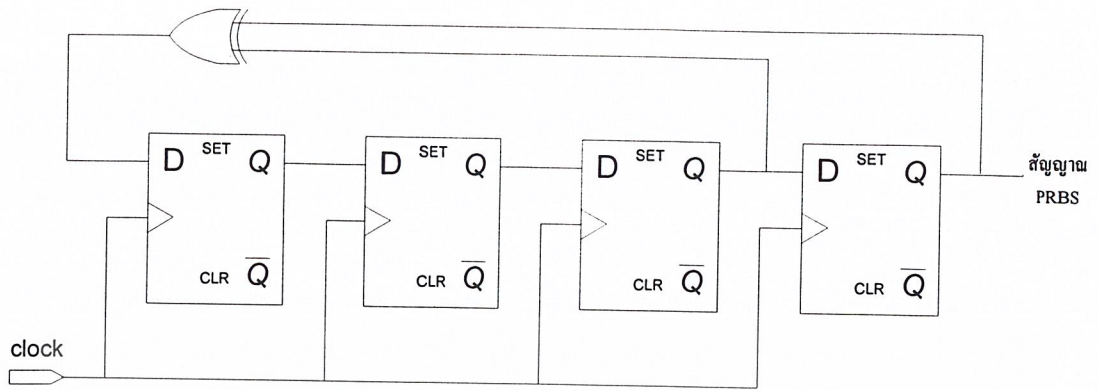
| จำนวนซีเควน<br>หรือจำนวนฟลิปฟลอป $n$ | ความยาวของซีเควน | การต่อสัญญาณป้อนกลับ ณ.<br>ตำแหน่งที่ |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| 2                                    | 3                | [2,1]                                 |
| 3                                    | 7                | [3,2] [3,1]                           |
| 4                                    | 15               | [4,3] [4,1]                           |
| 5                                    | 31               | [5,3] [5,2]                           |
| 6                                    | 63               | [6,5] [6,1]                           |
| 7                                    | 127              | [7,6] [7,3] [7,1]                     |
| 8                                    | 255              | [8,6,5,4] [8,6,5,3]                   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

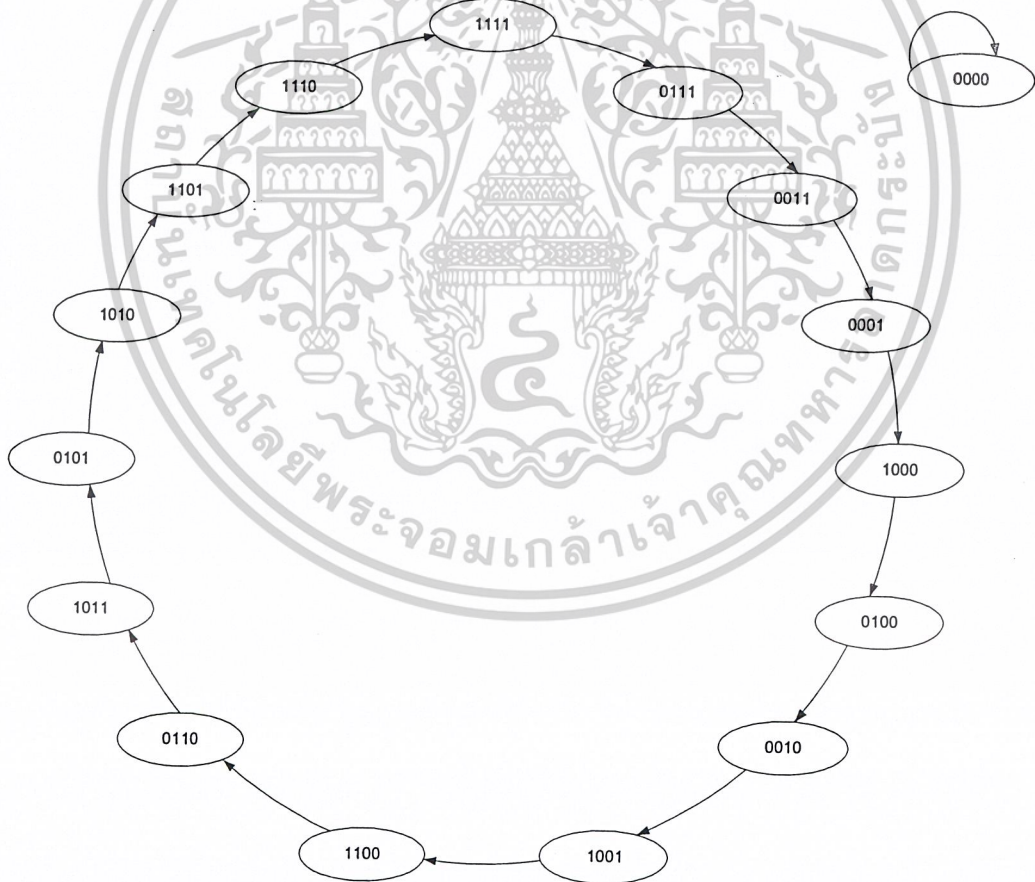
| จำนวนซีเควน<br>หรือจำนวนพลิปพลอย $n$ | ความยาวของซีเควน | การต่อสัญญาณย้อนกลับ ณ.<br>ตำแหน่งที่ |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| 9                                    | 511              | [9,5] [9,6,4,3]                       |
| 10                                   | 1023             | [10,7] [10,3]                         |
| 11                                   | 2047             | [11,9] [11,8,5,2]                     |
| 12                                   | 4095             | [12,6,4,1]                            |
| 13                                   | 8191             | [13,4,3,1]                            |
| 14                                   | 16383            | [14,5,3,1]                            |
| 15                                   | 32767            | [15,14] [15,4]                        |
| 16                                   | 65535            | [16,15,13,4]                          |
| 17                                   | 131071           | [17,14] [17,3]                        |
| 18                                   | 262143           | [18,11] [18,7]                        |
| 19                                   | 524287           | [19,6,2,1]                            |
| 20                                   | 1048575          | [20,17] [20,3]                        |
| 21                                   | 2097151          | [21,19] [21,2]                        |
| 22                                   | 4194303          | [22,21] [22,1]                        |
| 23                                   | 8388607          | [23,18] [23,5]                        |
| 24                                   | 16777215         | [24,23,22,17]                         |
| 25                                   | 33554431         | [25,22] [25,3]                        |

จากตารางจะเห็นได้ว่าเราสามารถสร้างสัญญาณเรณคัม  $n=4$  โดยจะมีขนาด หรือความยาวของซีเควนเป็น 15 ซึ่งจะสามารถสร้างได้จากโพลีโนเมียล  $1+D+D^4$  และ  $1+D^3+D^4$  ซึ่งแบบแรกได้แสดงไปดังรูปที่ 2.16 และโดยแบบที่ 2 จะแสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



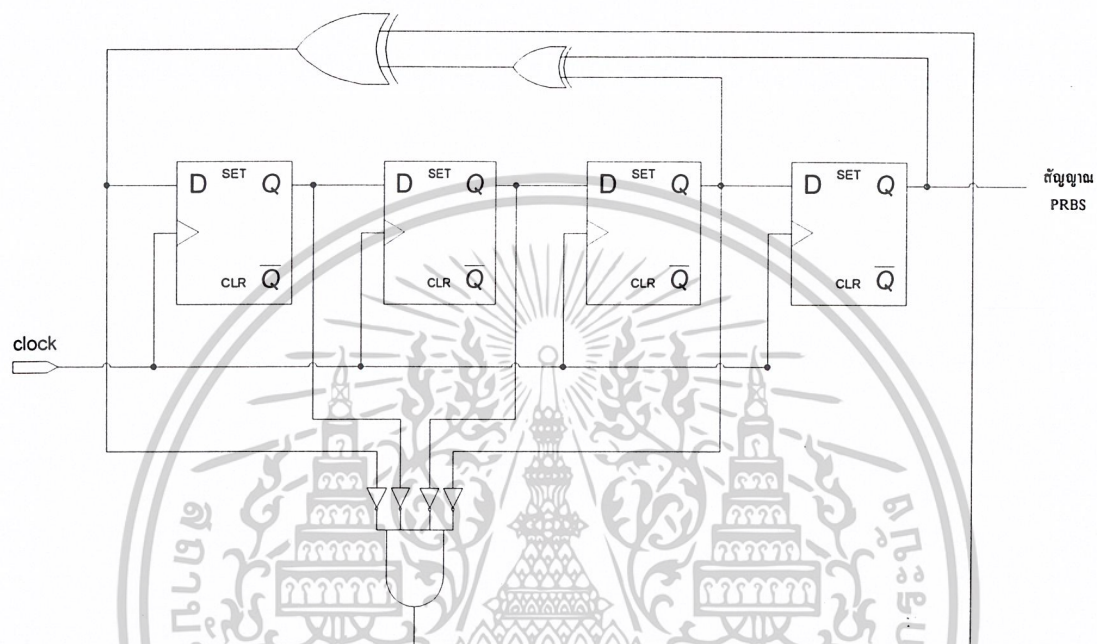
รูปที่ 2.17 วงจรกำเนิดสัญญาณกึ่งแรนดัมที่สร้างจากโพลีโนเมียล  $1 + D^3 + D^4$



รูปที่ 2.18 ซีควนเอาท์พุตของ  $n = 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่เห็นในรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่า ถ้าเกิดสัญญาณซีควีน 0000 วงจรจะเกิดอาการค้าง ดังนั้นเราจะต้องป้องกันการเกิดซีควีน 0000 โดยการเพิ่มเกตเข้าไปในวงจร ดังรูปที่ 2.19 โดยเมื่อเกิด 0000 พร้อมกันจะให้เอาต์พุตเป็น 1



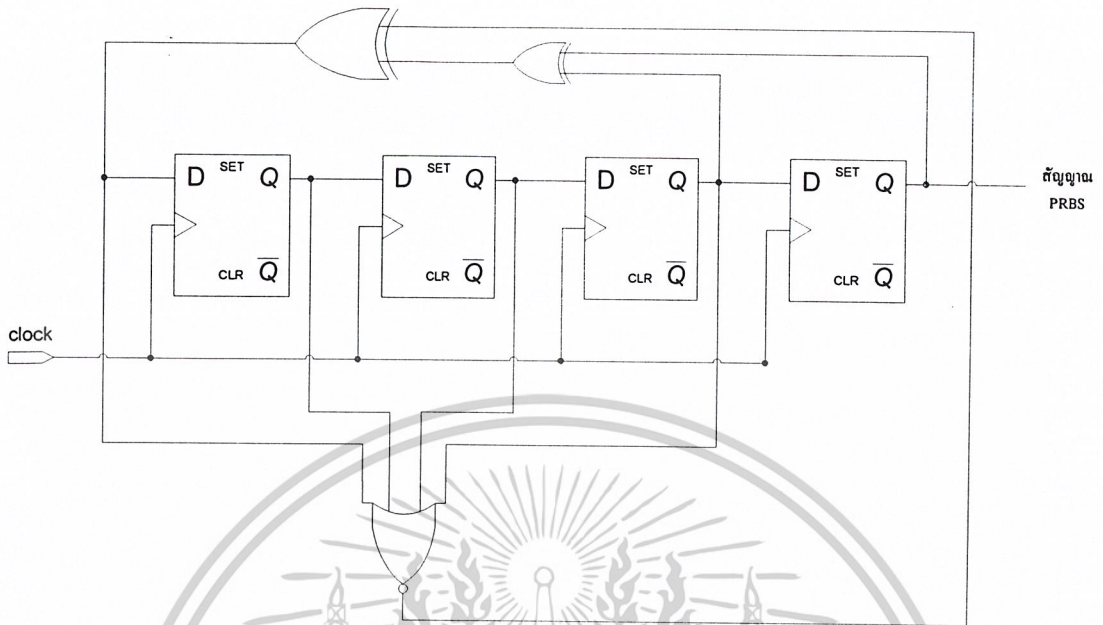
รูปที่ 2.19 วงจรกำเนิดสัญญาณซีควีนกึ่งแรนดัม  $n = 4$  ที่ป้องกันการเกิดซีควีน 0000

โดยวงจรที่ 2.19 สามารถใช้เกตได้อีกแบบ ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งสามารถจัดรูปได้ตามสมการที่ (2.20)

$$\overline{ABCD} = A + B + C + D$$

(2.20)

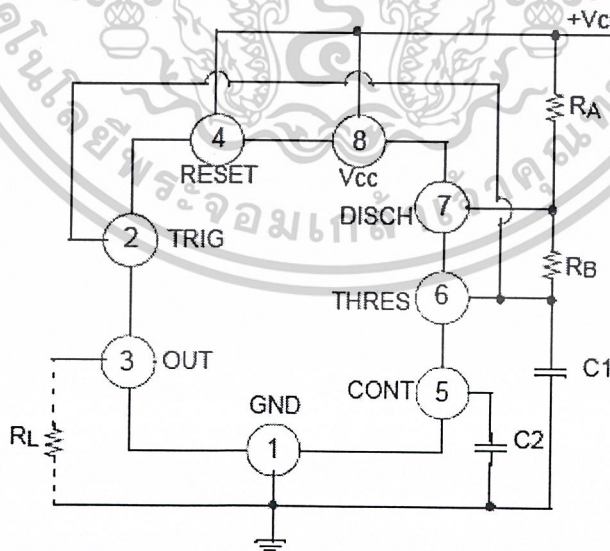
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 วงจรกำเนิดสัญญาณซีแควนกึ่งแรนดัม  $n = 4$  ที่ป้องกันการเกิดซีแควน 0000

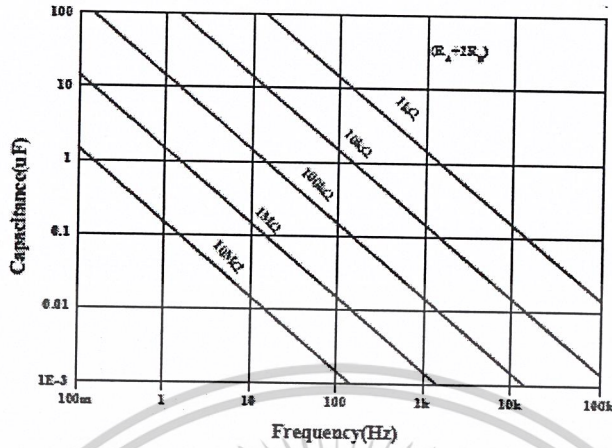
### 2.8 การสร้างสัญญาณนาฬิกา

เราสามารถสร้างสัญญาณนาฬิกาได้จากไอซี LM555 ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ไอซี LM555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ

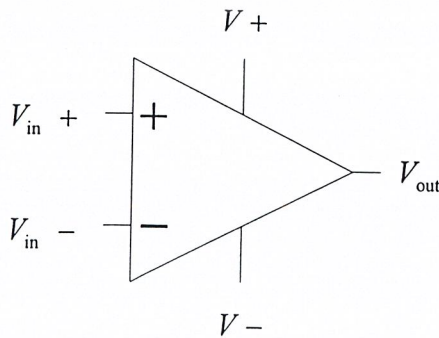
โดยเราสามารถจะกำหนดเวลาช่วงเปิด-ปิด ได้ตามสมการที่ (2.21) และ (2.22)

$$\text{ON Time} = 0.693(R_A + R_B) \times C \tag{2.21}$$

$$\text{OFF Time} = 0.693(R_B) \times C \tag{2.22}$$

### 2.9 วงจรขยาย (Amplifier)

ในวงจรขยาย โดยทั่วไปแล้ว มักจะมี Operational Amplifiers (OP-AMP) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เนื่องจากออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญสำหรับวงจรปรุงแต่งสัญญาณ ซึ่งเป็นตัวกลางในการดำเนินการสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีทั้ง บวก, ลบ, ขยาย, อินดิเกรต, คิฟเฟอเรนเชียล สัญลักษณ์ของออปแอมป์ ได้แสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของออปแอมป์ อย่างคร่าวๆ เพื่อประกอบความเข้าใจในวงจรขยาย



รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.23

$V_{in} +$  คือ Non-inverting Amplifier

$V_{in} -$  คือ Inverting Amplifier

$V+$ ,  $V-$  คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า

### หลักการพื้นฐานของออปแอมป์

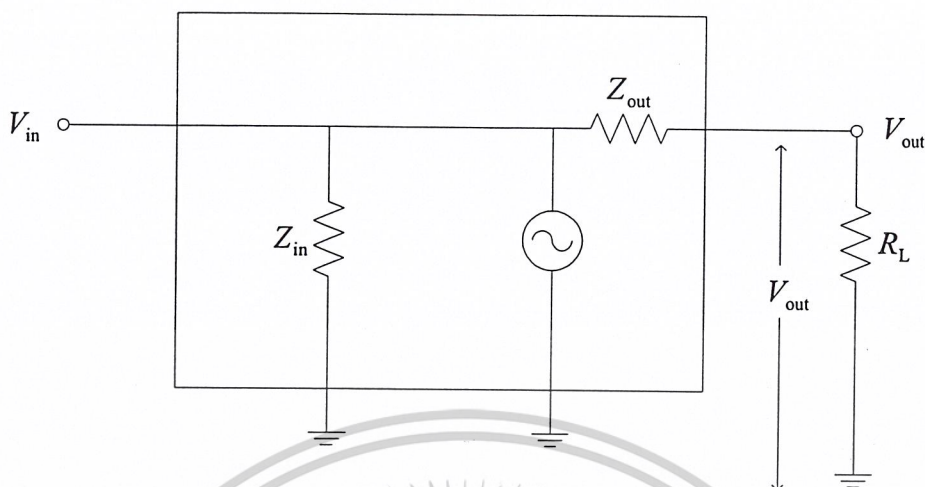
ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราขยายและอิมพีแดนซ์อินพุต  $Z_i$  หรือ  $R_i$  สูงมาก และมีอิมพีแดนซ์เอาต์พุต  $Z_o$  หรือ  $R_o$  ต่ำมาก

ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับขั้วบวกของออปแอมป์ จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่อินเฟสกับสัญญาณอินพุต แต่ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับขั้วลบของออปแอมป์ จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่ต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา หรือมุมตรงกันข้าม

### คุณลักษณะของออปแอมป์ในอุดมคติ (Ideal Op-Amp)

1. อัตราขยายของออปแอมป์แบบวงจรรอบเปิด (Open Loop Gain) มีค่าสูงมากจนเป็นอนันต์  $AVOL = \infty$
2.  $Z_i$  มีค่าสูงมากจนถือได้ว่าเป็น infinity
3.  $Z_o$  มีค่าต่ำมากจนถือได้ว่าเป็น 0
4. อัตราขยายของออปแอมป์ไม่ขึ้นกับความถี่
5. เมื่อ  $V_{in} = 0$  จะได้  $V_{out}$  เป็น 0 ด้วย

จากคุณสมบัติดังกล่าวมาแล้ว มีผลสืบเนื่องคือ  $i_i = 0$  เนื่องจาก  $Z_i$  สูงมาก ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์เป็น 0 เนื่องจาก  $i_i$  และยังให้ค่า  $Z_{out}$  มีค่าต่ำมากจนประมาณได้ว่า  $Z_o = 0$  ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 คุณสมบัติด้านความต้านทานของออปแอมป์

การใช้ออปแอมป์ในวงจรขยายสัญญาณ

1. วงจร BUFFER หรือ VOLTAGE FOLLOWER

อัตราขยายวงจรถชนิดนี้มีค่าประมาณ 1

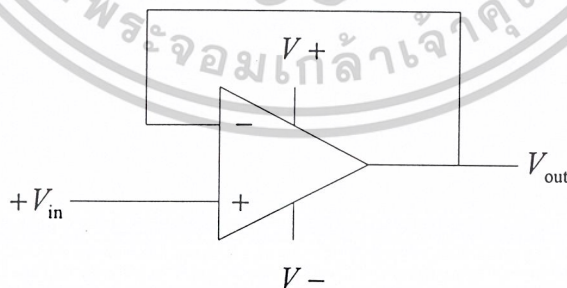
นั่นคือ

$$AV = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$

(2.23)

$$V_{out} = V_{in}$$

(2.24)



รูปที่ 2.25 วงจร Buffer หรือ Voltage follower

2. วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverter Amplifier)

ความต่างศักย์ระหว่าง  $V_{in+}$  และ  $V_{in-} = 0$  ดังนั้น ศักไฟฟ้าที่ขา  $V_{in-} = 0$  กระแส

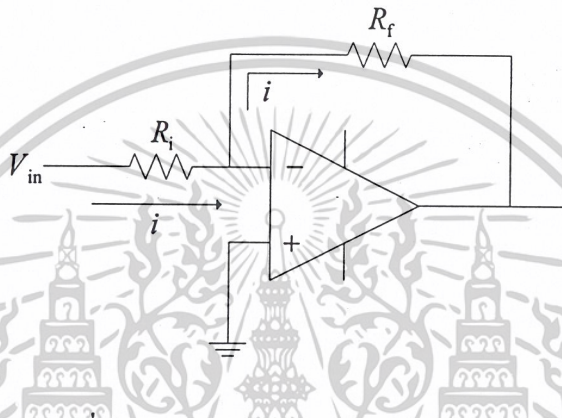
ย่าน  $R_f$  และ  $R_i$  มีค่า  $i$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AV = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-iR_f}{iR_i} = \frac{-R_f}{R_i} \quad (2.25)$$

เพราะฉะนั้น

$$AV = \frac{-R_f}{R_i} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.26 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

ดังนั้น

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} V_{in} \quad (2.27)$$

### 3. วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)

จากรูปที่ 2.27 กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน  $R_i$  และ  $R_f$  มีค่า  $i$  เท่ากัน ดังนั้น

$$V_{in} = iR_i \quad (2.28)$$

$$V_{in} = i(R_i + R_f) \quad (2.29)$$

$$AV = i(R_i + R_f) / iR_i \quad (2.30)$$

$$AV = (R_i + R_f) / R_i \quad (2.31)$$

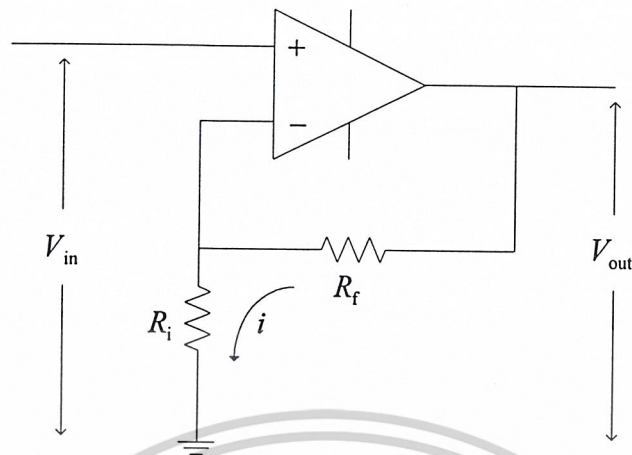
หรือ

$$AV = 1 + \left( \frac{R_f}{R_i} \right) \quad (2.32)$$

ดังนั้น

$$V_{out} = \left( 1 + \frac{R_f}{R_i} \right) V_{in} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

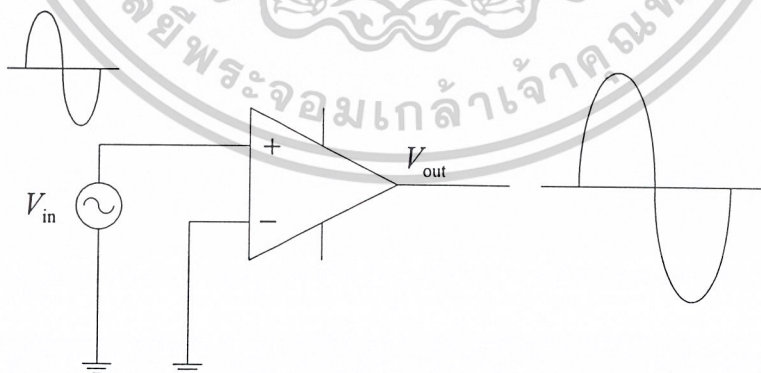


รูปที่ 2.27 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

การทำงานของ OP-AMP แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ การทำงานที่อินพุตด้านเดียว และการทำงานที่อินพุตสองด้าน

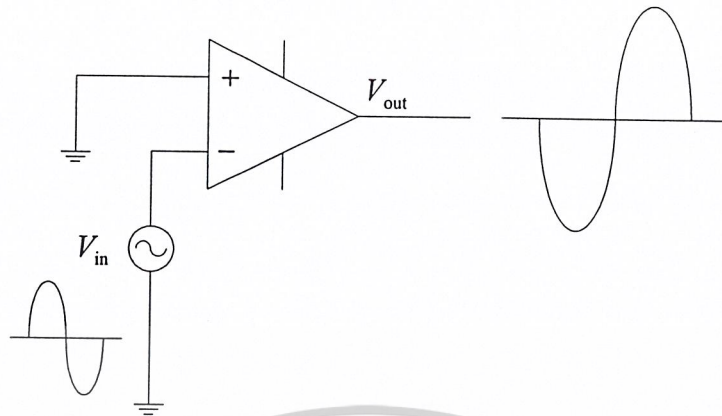
#### การทำงานที่อินพุตด้านเดียว (Single Ended Input)

การทำงานที่อินพุตด้านเดียว คือ การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ส่วนขั้วอินพุตที่เหลือต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 2.28 และ 2.29



รูปที่ 2.28 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



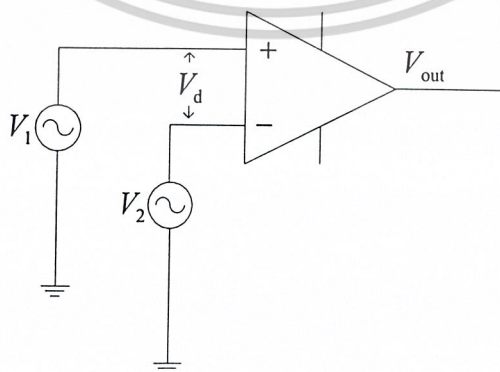
รูปที่ 2.29 การป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบ

ถ้าป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วบวกและต่อขั้วลบลงกราวด์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับการขยายกับสัญญาณอินพุตจะมีมุมอินเฟสกัน ดังรูปที่ 2.28 ในทางตรงข้ามถ้าป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบและต่อขั้วลบลงกราวด์จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีมุมต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา ดังรูปที่ 2.29

#### การทำงานที่อินพุตสองด้าน (Double Ended Input)

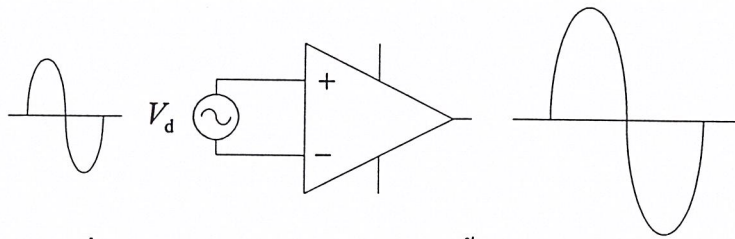
การทำงานที่อินพุตสองด้าน คือการป้อนสัญญาณอินพุตทั้งสองด้าน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) และแบบ โหมดร่วม (Common Mode)

การทำงานแบบดิฟเฟอเรนเชียล คือการป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับขั้วอินพุตทั้งสอง ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับออปแอมป์

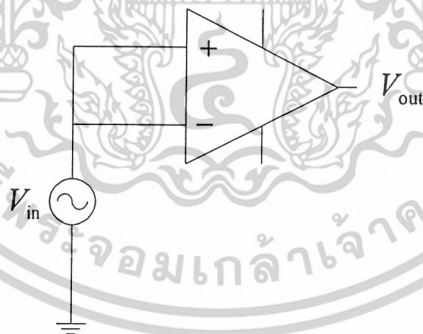
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 การขยายผลต่างของอินพุตทั้งสองของออปแอมป์

เนื่องจากขั้วอินพุตของออปแอมป์เป็นบวกและลบ สัญญาณอินพุตจึงหักล้างกัน ดังนั้น สัญญาณเอาต์พุตจึงเกิดจากการขยายผลต่างของสัญญาณอินพุตทั้ง สอง นั่นคือ  $V_d = V_1 - V_2$  ซึ่งสามารถเขียนรูปใหม่เพื่อพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งสังเกตได้ว่า สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตอินเฟสกัน

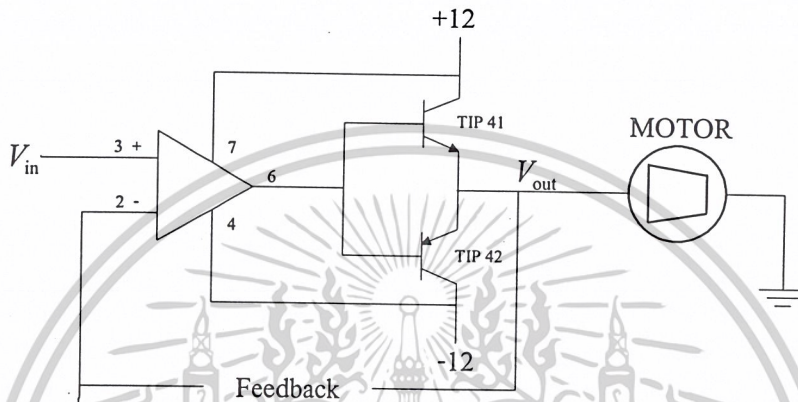
การทำงานแบบโหมคร่วม คือ การป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 การป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์

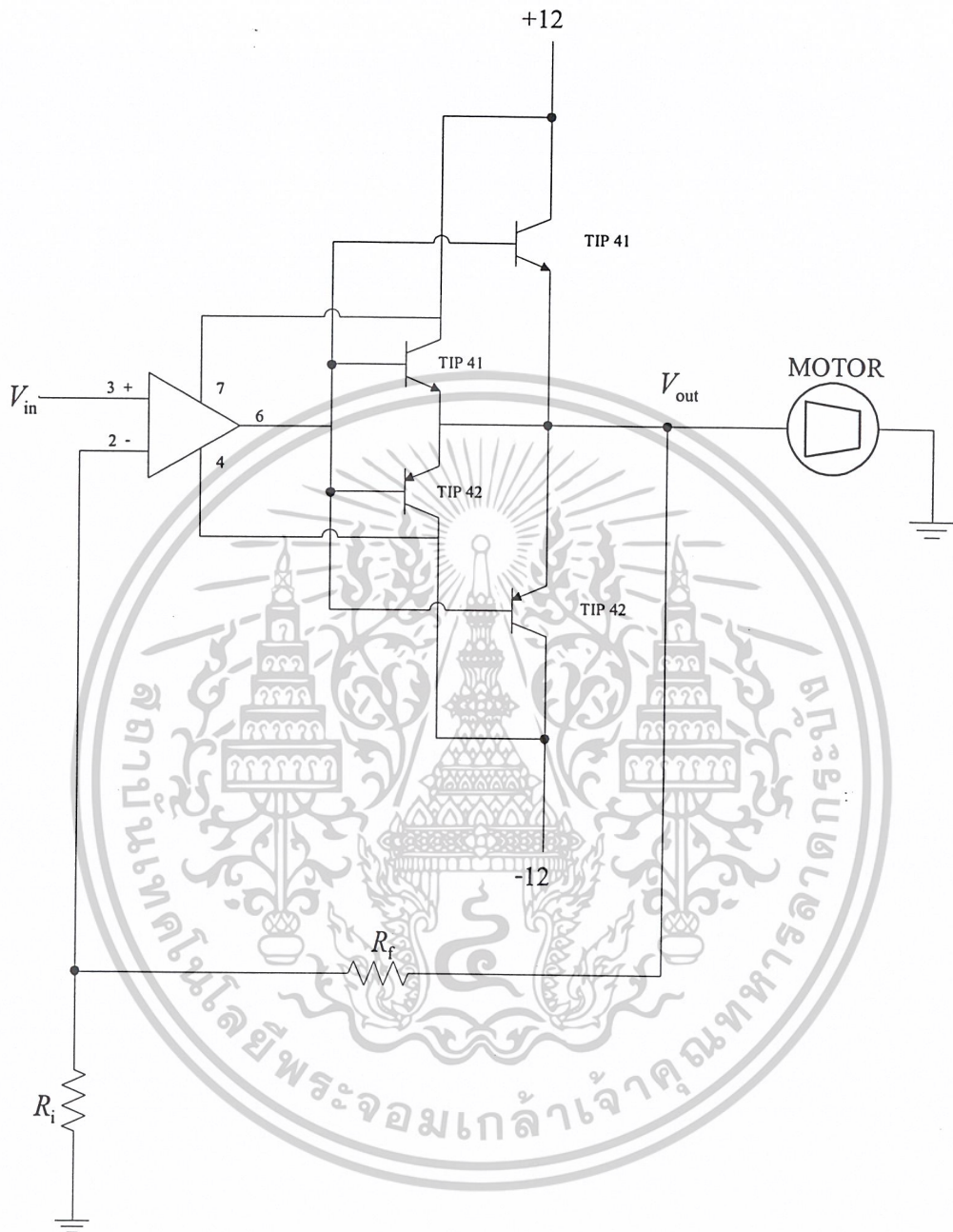
ในทางอุดมคติ สัญญาณอินพุตทั้ง 2 ขั้ว ต้องได้รับการขยายเท่ากัน ทำให้เกิดสัญญาณที่มีขั้วตรงข้ามกันที่อินพุต สัญญาณเหล่านี้หักล้างกันแล้วหยุดหายไป สัญญาณเอาต์พุตจึงเป็น 0 V แต่ในทางปฏิบัติยังมีสัญญาณเอาต์พุตเหลืออยู่เล็กน้อย โดยเราเรียกว่า “สัญญาณโหมคร่วม” ซึ่งในที่นี้จะไม่กล่าวถึง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนี้ ออปแอมป์จะมีคุณสมบัติในการขยายแรงดัน ซึ่งถ้าต้องการขยายกระแสจะต้องใช้ทรานซิสเตอร์มาช่วยในการขยายกระแส ในการทดลองนี้เราได้ใช้วงจขยายตามที่แสดงในรูป 2.33 และรูป 2.34 ซึ่งจะมีอัตราขยายแรงดันเป็น  $1 + \frac{R_f}{R_i}$



รูปที่ 2.33 วงจขยายที่นำมาขยายสัญญาณอลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 วงจรขยายที่นำมาขยายสัญญาณอลวน

## 2.10 มอเตอร์

โดยทั่วไป มอเตอร์ที่ใช้ในงานปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะระบบไฟฟ้าของแหล่งจ่าย หลักการหมุน และ โครงสร้าง ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current motors: AC motors)** เป็นมอเตอร์ที่ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดของมอเตอร์ไหลกลับไปมาตลอดเวลา สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามความสำคัญและสัดส่วนของการใช้งาน ได้ดังนี้

- **มอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motors)**

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (single-phase induction motors) แบ่งเป็น

- เริ่มเดินเครื่องด้วยการแยกเฟส (split-phase start)
- แบบเริ่มเดินเครื่องด้วยตัวเก็บประจุ เดินเครื่องด้วยการเหนี่ยวนำ (capacitor start induction run)
- แบบเริ่มเดินและเดินเครื่องด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor start and run)
- แบบรีพัลชัน (repulsion start)

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (three-phase induction motors) แบ่งเป็น

- แบบกรงกระรอก (squirrel-cage) แบ่งออกเป็นชนิด single speed, two speed และ three speed
- แบบโรเตอร์พันลวด (wound-rotor) แบ่งออกเป็นชนิด slip ring และ commutator

- **มอเตอร์ซิงโครนัส (synchronous motors)**

- **มอเตอร์สเต็ปป์ (stepping motors)**

- **มอเตอร์แบบมีคอมมิวเตเตอร์ (commutator motors)**

**มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current motors: DC motors)**

- **มอเตอร์แบบวงจรร่วมแม่เหล็กขนาน (shunt motors)**

- **มอเตอร์แบบวงจรร่วมแม่เหล็กอนุกรม (series motors)**

- **มอเตอร์แบบวงจรร่วมแม่เหล็กผสม (compound motors)**

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย เพราะมีความแข็งแรงทนทาน ราคาถูก ประสิทธิภาพสูง ความแน่นอนในการใช้งานสูง และบำรุงรักษาสะดวกได้ง่าย ในปัจจุบันอาจกล่าวได้ว่าอุตสาหกรรมเกือบทั้งหมดใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นต้นกำลังกล ขนาดมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะมีขนาดตั้งแต่ต่ำกว่า 1 แรงม้าที่แรงดันต่ำ (110-660 โวลต์) จะกระทั่งถึงหลายพันแรงม้าที่แรงดันสูง (3.0 กิโลโวลต์ หรือสูงกว่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงสร้างและการทำงานพื้นฐาน

มอเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล การหมุนของมอเตอร์เกิดจากแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetic field) 2 ชุด คือที่สเตเตอร์ (stator) และโรเตอร์ (rotor) พยายามที่จะจัดเส้นแรงแม่เหล็กให้อยู่ในแนวเดียวกัน การที่สนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุดกระทำลักษณะดังกล่าวทำให้มอเตอร์หมุนได้และยังมุมที่แตกต่างกันของแนวแกนของสนามแม่เหล็ก ทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์รวมทั้งความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากเท่าไร ก็ยังจะทำให้เกิดแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำให้นิวของสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุดเคลื่อนเข้าหากันมากขึ้นเท่านั้น ผลลัพธ์ของแรงกระทำอันนี้คือ แรงบิดของมอเตอร์หรือทอร์ก (torque) โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กในมอเตอร์แบบต่างๆ จะมีทั้งแบบที่หมุนไปรอบๆ ตัวของมอเตอร์ และแบบที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ ตัวอย่างแบบสนามแม่เหล็กหมุน ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ส่วนแบบสนามหยุดนิ่ง ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างที่ง่าย แข็งแรง และไม่ต้องใช้แปรงถ่าน (carbon brush) มีการทำงานเกิดจากสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (core) ที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) หมุนแล้วเหนี่ยวนำโรเตอร์ที่มีขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) ให้หมุนตาม หรือตัวนำในโรเตอร์เกิดจากสนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ แต่เคลื่อนที่หมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ สนามแม่เหล็กจะถูกส่งผ่านช่องอากาศ (air gap) มาเหนี่ยวนำตัวนำที่โรเตอร์ ทำให้เกิดแรงดัน กระแส และสนามแม่เหล็ก จากโรเตอร์ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เกิดจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้าทางสเตเตอร์ สำหรับในระบบ 50 เฮิร์ตซ์ ที่ใช้กันในประเทศไทยจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วที่ 750 1000 1,500 และ 3,000 รอบต่อนาที สำหรับมอเตอร์แบบ 8 6 4 และ 2 ขั้วตามลำดับเราเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ (synchronous speed)

## ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรงเป็นทรานสดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีคุณลักษณะพิเศษคือแรงบิดของเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ แรงบิดของเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงจะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการนี้แสดงได้ในรูป ในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างสนามที่ประกอบด้วย เส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ  $r$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K\Phi i \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

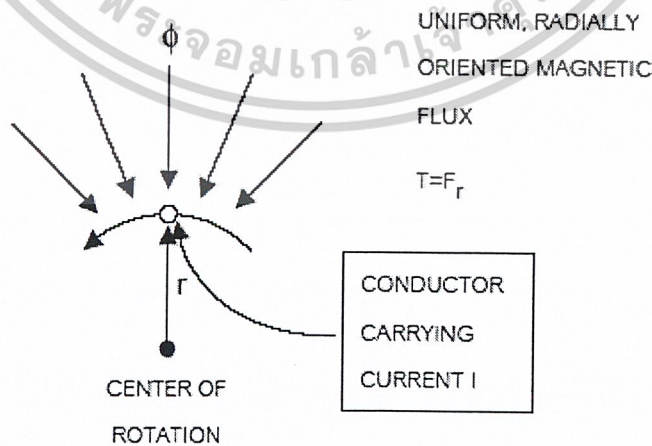
- เมื่อ  $T$  คือ แรงบิดของเพลามีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร  
 $\Phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์  
 $i$  คือ กระแส มีหน่วยเป็น แอมแปร์  
 $K$  คือ ค่าคงตัว

ดังนั้นแรงบิดของเพลาก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแส เมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดโวลต์เตจตกคร่อมตัวมันเอง โวลต์เตจนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลามากน้อยและด้านารไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจย้อนกลับนี้ และความเร็วของเพลามากน้อยคือ

$$E = K\Phi\omega \quad (2.35)$$

- เมื่อ  $E$  คือ โวลต์เตจย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็น โวลต์  
 $\Phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์  
 $\omega$  คือ ความเร็วของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที

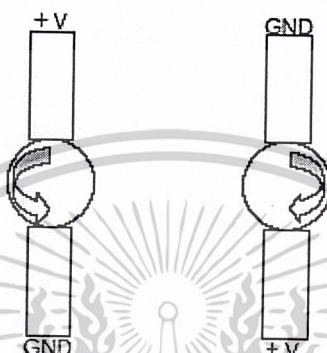
สมการ (2.34) – (2.35) เป็นสมการที่แสดงถึงหลักการทํางานพื้นฐานของมอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 2.35 การเกิดแรงบิดในตัวมอเตอร์กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้มอเตอร์กระแสตรงทำงาน ก็เพียงเราป้อนความต่างศักย์แล้วทำให้กระแสไหลผ่านมอเตอร์กระแสตรง โดยการหมุนจะหมุนเป็นหมุนตามเข็มนาฬิกา หรือหมุนทวนเข็มนาฬิกา ก็จะเป็นขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ที่เป็นบวกให้กับขั้วไหน



รูปที่ 2.36 การหมุนของมอเตอร์ในทิศทางเมื่อกลับขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

จากสมการที่ (2.35) จะเห็นได้ว่า ความเร็วของมอเตอร์แปรผันตามความต่างศักย์ที่ตกคร่อมมอเตอร์ ดังนั้นถ้ามีความต่างศักย์ที่ตกคร่อมมอเตอร์กระแสตรงสูง จะทำให้มอเตอร์กระแสตรงจะหมุนด้วยความเร็วรอบสูง ในทางกลับกัน ถ้าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมมอเตอร์กระแสตรงต่ำ จะทำให้มอเตอร์กระแสตรงหมุนด้วยความเร็วรอบที่ต่ำเช่นกัน

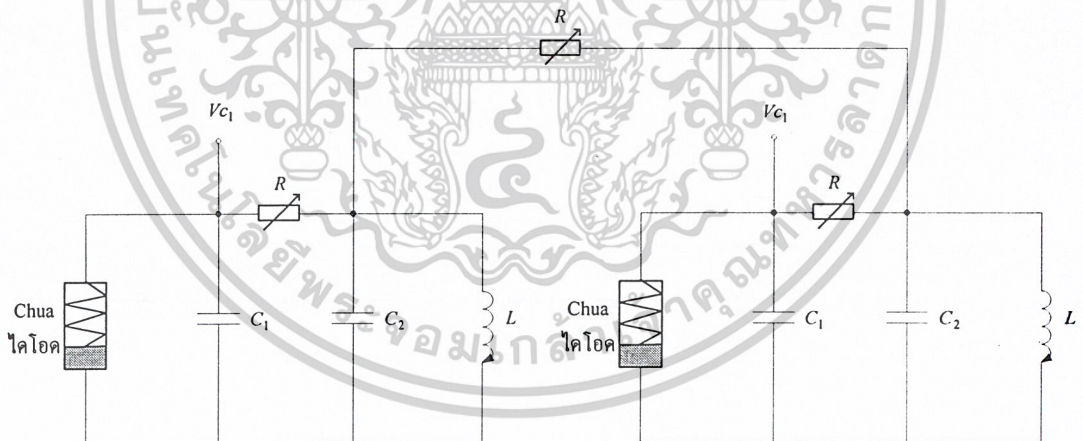
## บทที่ 3

### วงจรที่สร้างขึ้น

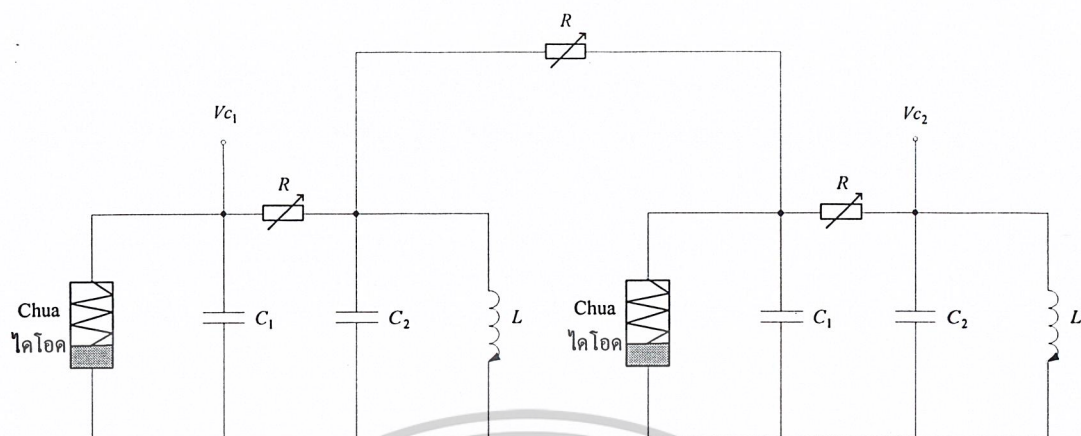
จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชัน เราต้องการสัญญาณออสซิลเลชันที่มีความซับซ้อนสูง ดังนั้นเราจึงต้องทำการเพิ่มเทคนิคต่าง ๆ เข้าไปในวงจร Chua โดยมีเทคนิค ดังต่อไปนี้

#### 3.1 วงจร Chua แบบคัปเปิล (Coupled Chua's circuits)

จากวงจร Chua แบบปกติ ยังมีความซับซ้อนมากไม่เพียงพอ ดังนั้นเทคนิคแรกที่น่าเสนอคือการใช้เทคนิคเชื่อมต่่วงจร (coupling) ตามรูปที่ 3.1 โดยเราจะใช้ค่าความต้านทานต่อคร่อมระหว่างวงจร Chua สองวงจร ซึ่งเราจะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ค่อนข้างมีความละเอียดในการปรับค่า เนื่องจากมีความไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้นมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

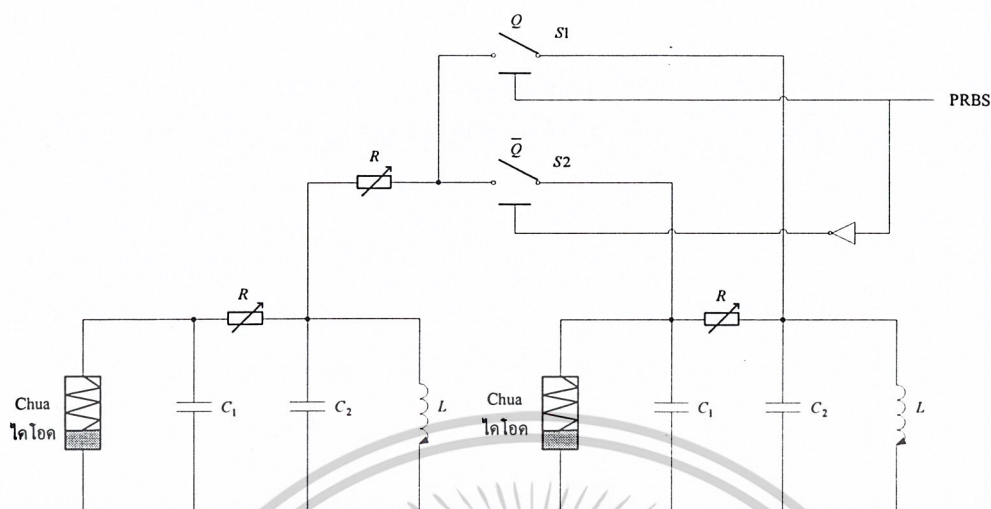


รูปที่ 3.1 วงจร Chua แบบคัปเปิล

จากรูปที่ 3.1 วงจร Chua แบบคัปเปิล มี 2 รูปแบบ คือ การเชื่อมต่อกันระหว่างจุด  $V_{c2}$  กับจุด  $V_{c1}$  และการเชื่อมต่อระหว่างจุด  $V_{c2}$  กับจุด  $V_{c1}$  ซึ่งวงจรทั้งสองนั้นจะให้สัญญาณอลวนที่มีความแตกต่างกัน ทั้งความซับซ้อน และแรงค้ำของสัญญาณ

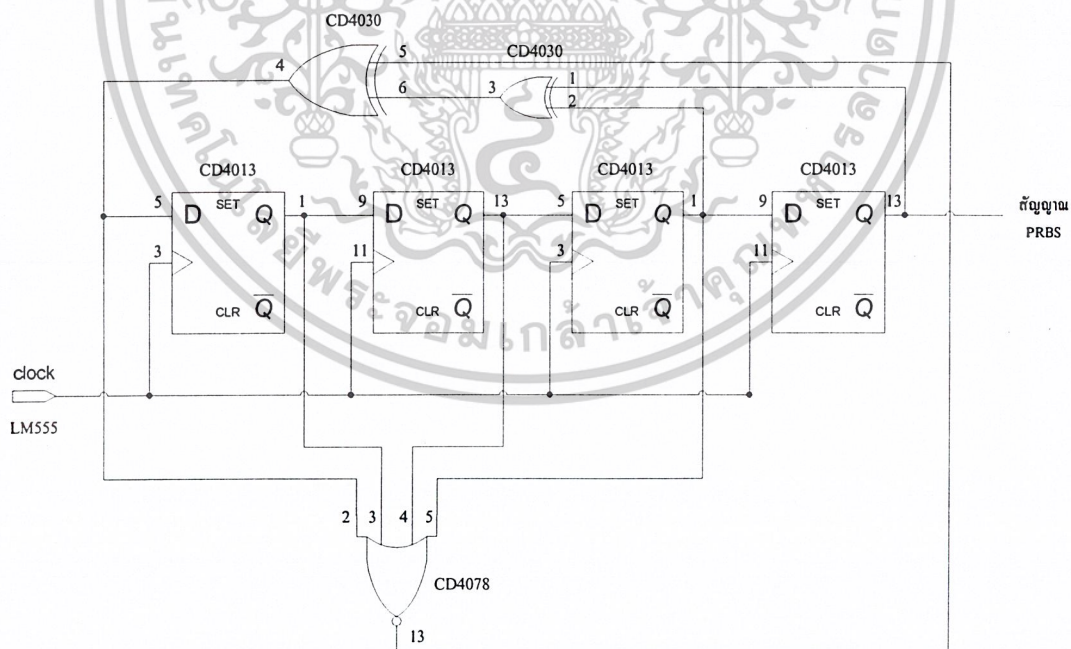
### 3.2 วงจร Chua แบบคัปเปิล ที่ควบคุมโดยสัญญาณซีเควนกึ่งแรนดัม (Coupled Chua's circuits control by PRBS)

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากวงจร Chua แบบคัปเปิลทั้งสองวงจรวงจรดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1 มีความน่าสนใจทั้งสองสัญญาณ ถ้าเราสามารถนำสัญญาณทั้งสองนี้มาใช้ร่วมกัน ก็จะเกิดสัญญาณอลวนที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นเราจึงนำสัญญาณซีเควนกึ่งแรนดัมเข้ามาควบคุมการเลือกใช้สัญญาณอลวนที่มาจากวงจร Chua แบบคัปเปิลทั้งสองแบบ ดังที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.2



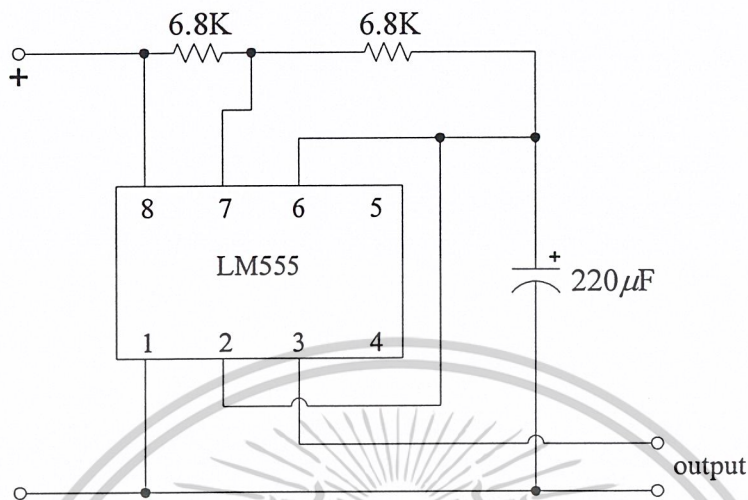
รูปที่ 3.2 วงจร Chua แบบคัปเปิล ที่ควบคุมโดยสัญญาณซีแควนซ์เรเนดัม

จากที่เห็นในรูปที่ 3.2 สวิตซ์จะถูกควบคุมโดยสัญญาณซีแควนซ์เรเนดัม ซึ่งสร้างได้จาก วงจรที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.7 โดยวงจรจริงแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณซีแควนซ์เรเนดัมที่นำไปใช้งานจริง

จากรูปที่ 3.3 ต้องใช้สัญญาณนาฬิกาที่สร้าง LM555 ซึ่งวงจรที่ใช้กำเนิดสัญญาณนาฬิกาได้ แสดงในรูปที่ 3.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

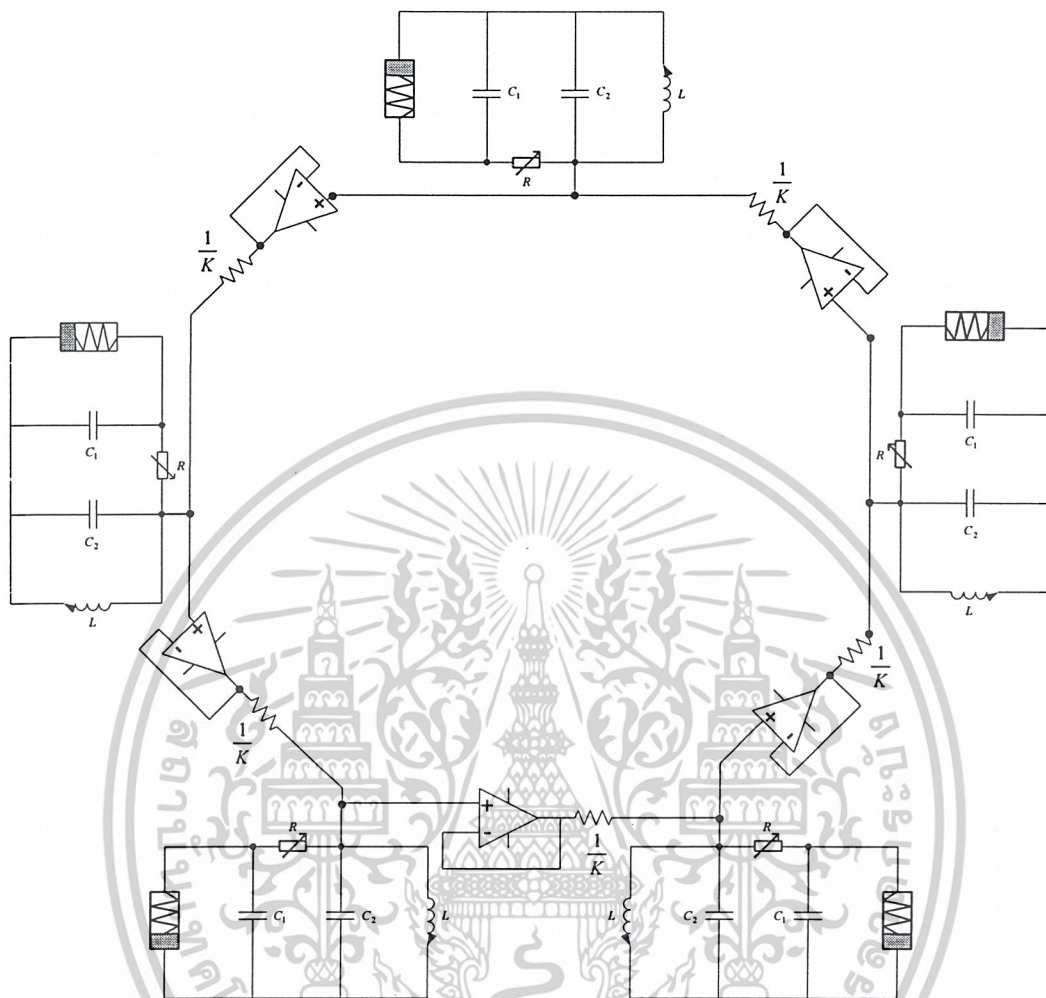


รูปที่ 3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

จากค่าความต้านทาน และตัวเก็บประจุสามารถคำนวณช่วงเปิด-ปิด ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.21) และ (2.22) โดยจะได้ค่าช่วงเปิดเท่ากับ 2.07 วินาที และช่วงปิดเท่ากับ 1.04 วินาที

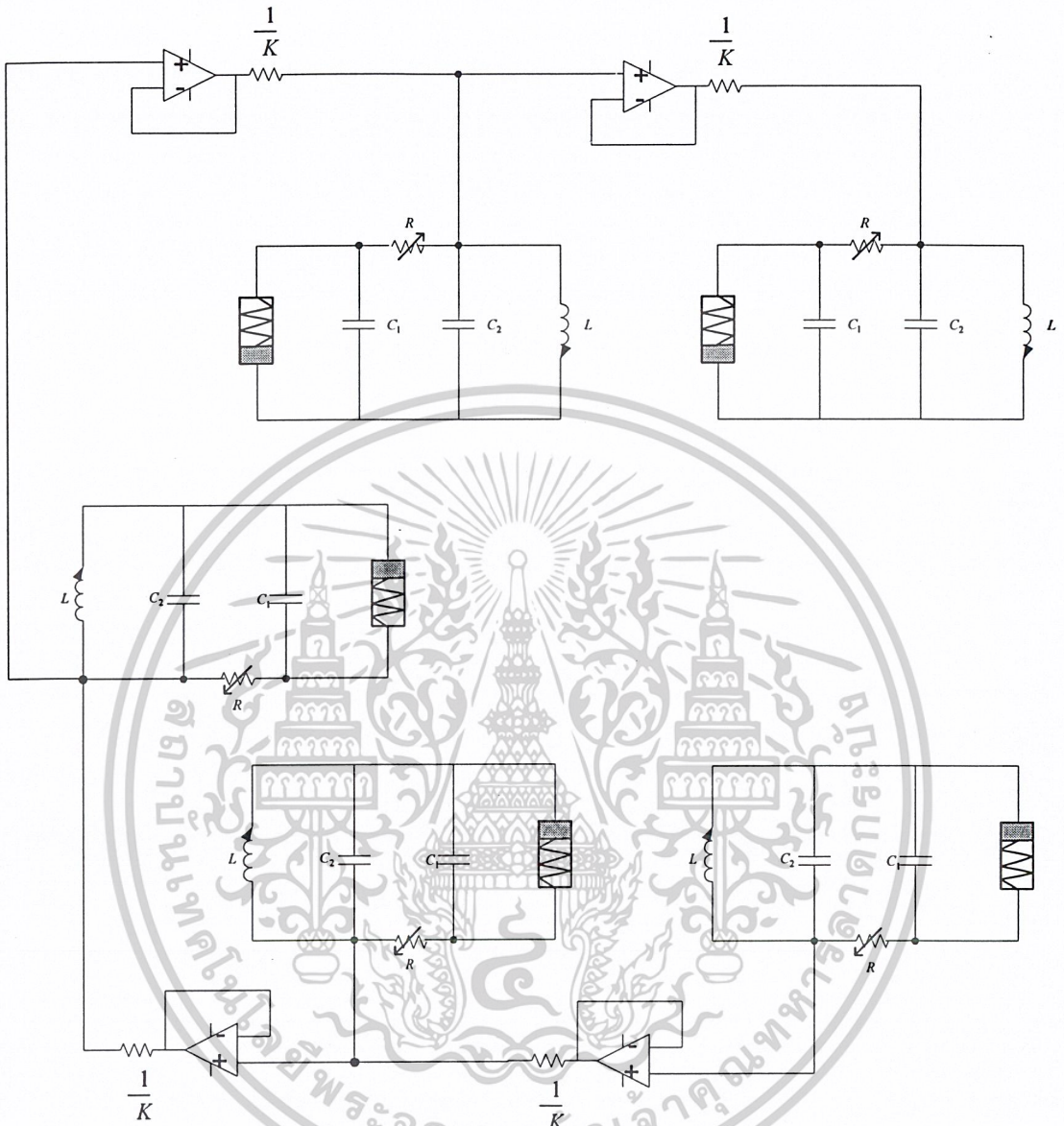
### 3.3 วงจร Chua แบบห่วงโซ่ (Chains of Chua's circuits)

วงจร Chua แบบห่วงโซ่เป็นวงจรที่เพิ่มความซับซ้อนของสัญญาณอลวน ซึ่งจะนำวงจร Chua มาต่อเชื่อมกัน โดยวงจร Chua แบบห่วงโซ่จะมี 2 แบบ คือ วงจร Chua ห่วงโซ่แบบเปิด (open chains of Chua's circuits) ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 3.5 และวงจร Chua ห่วงโซ่แบบปิด (close chains of Chua's circuits) ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 3.6 โดยค่า  $K$  คือ ค่ากระแสลบป้อนกลับ (negative feedback current) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า คืออัตราส่วนการคัปเปิล



รูปที่ 3.5 วงจร Chua ห่วงโซ่แบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



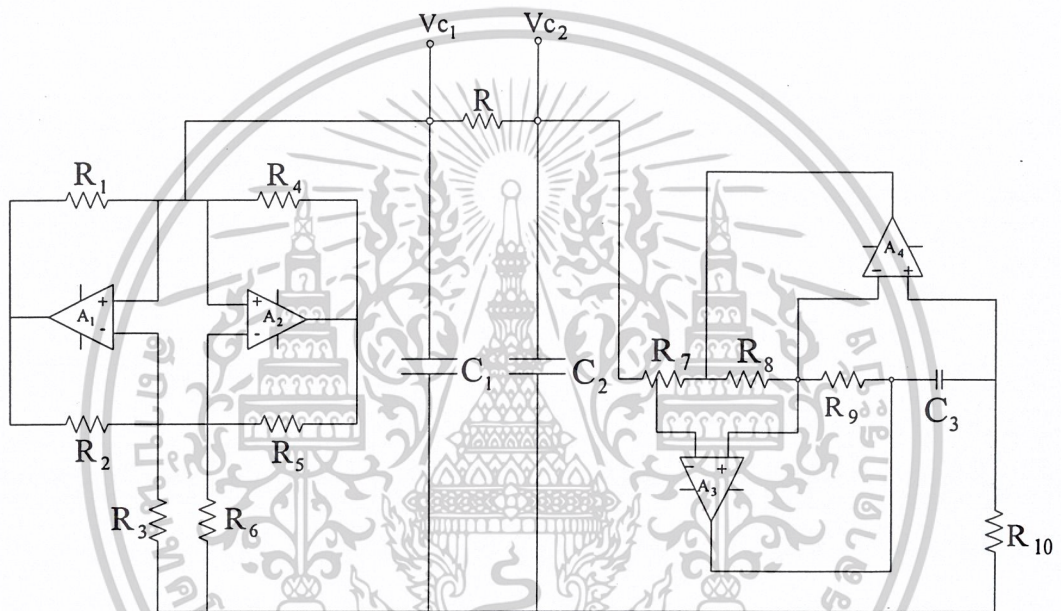
รูปที่ 3.6 วงจร Chua ห่วงโซ่แบบเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจร Chua

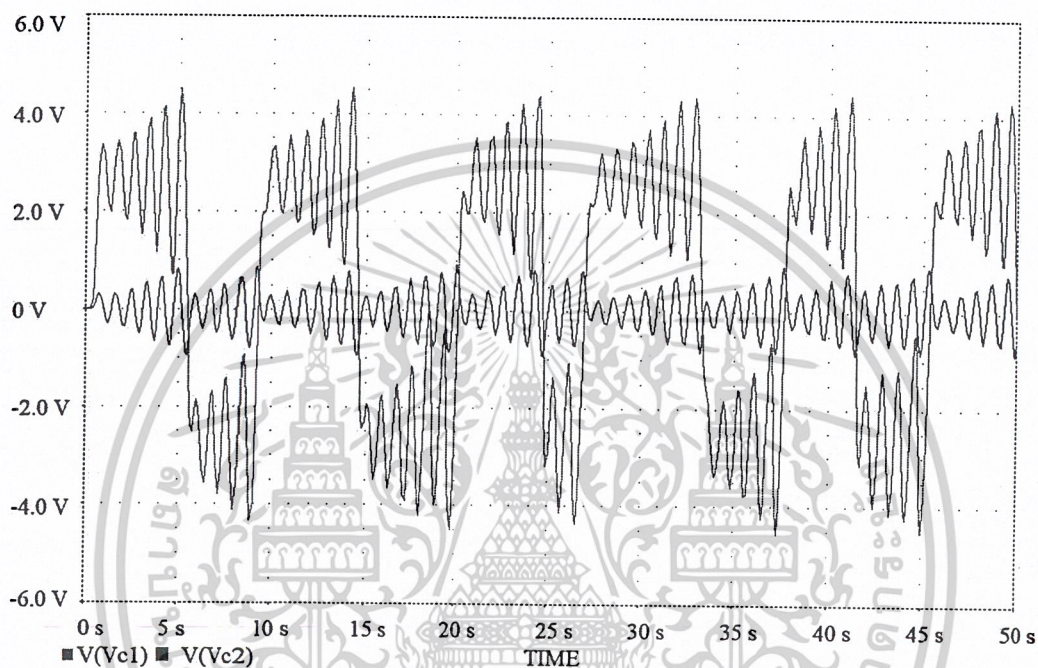


รูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบความถี่ต่ำ ที่ใช้ในการทดลอง

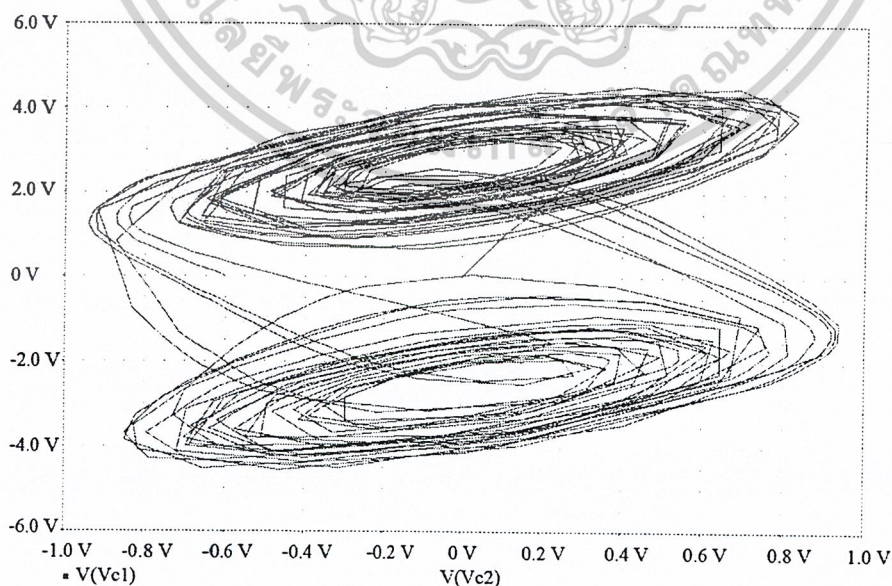
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรในรูป 4.1 เป็นดังนี้

$R_1 = 220 \Omega$ ,  $R_2 = 220 \Omega$ ,  $R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_7 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{10} = 1.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 23.5 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 235 \mu\text{F}$  และ  
 $C_3 = 23.5 \mu\text{F}$  จะได้ผลจำลองสัญญาณจากโปรแกรม Pspice ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ผลการทดลอง 4.1.1



รูปที่ 4.3 ผลการทดลอง 4.1.1 เมื่อ  $V_{c1}$  เป็นแกน y และ  $V_{c2}$  เป็นแกน x

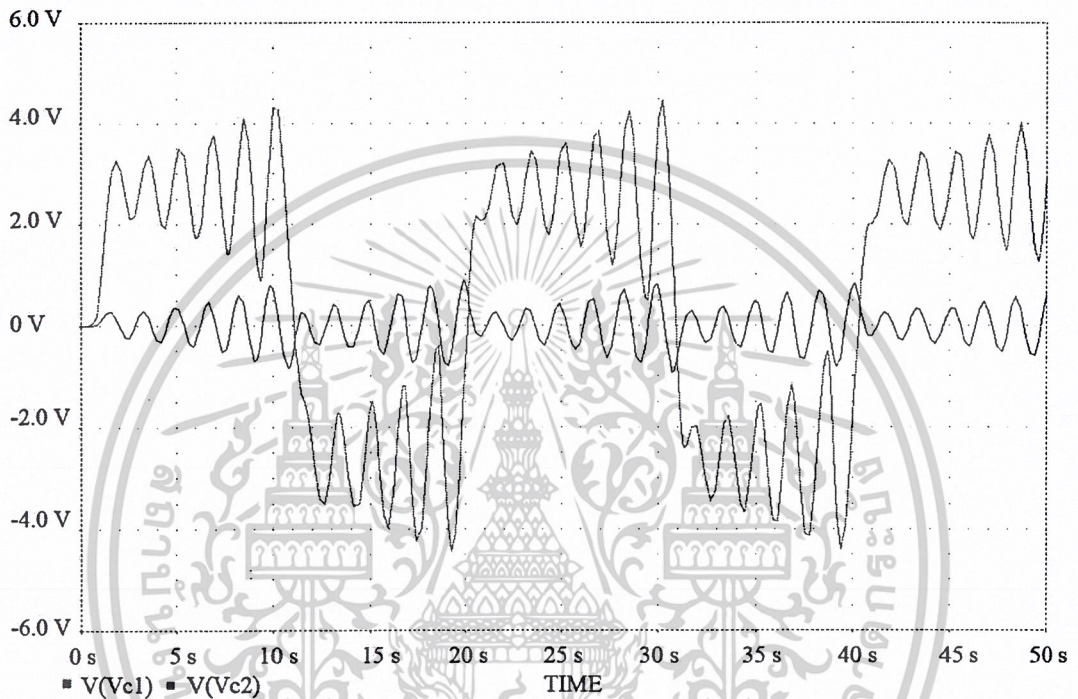
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรในรูป 4.1 เป็นดังนี้

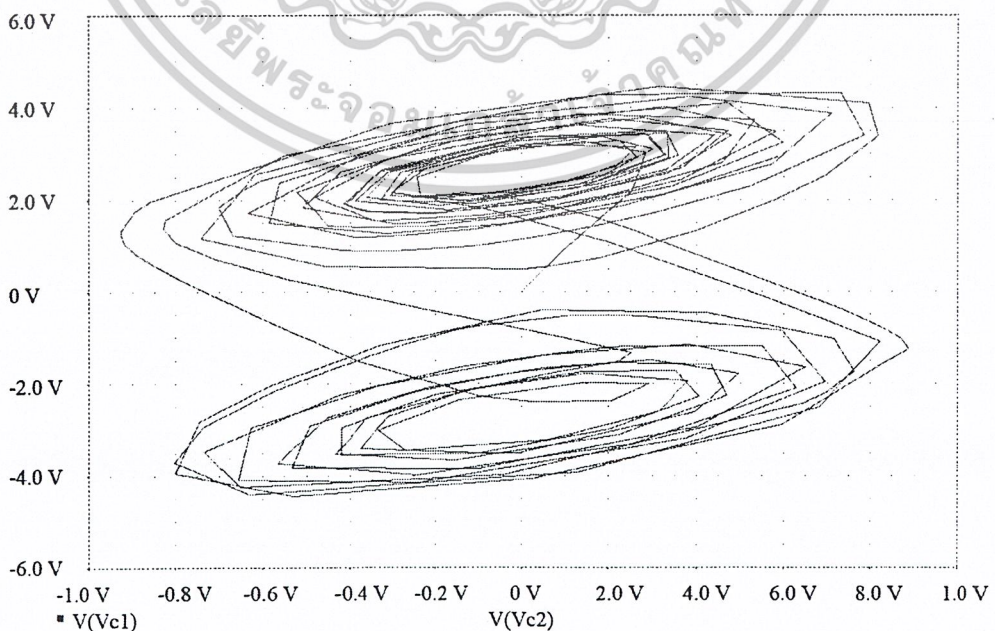
$R_1 = 220 \Omega$ ,  $R_2 = 220 \Omega$ ,  $R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,

$R_7 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{10} = 1.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 47 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 470 \mu\text{F}$  และ

$C_3 = 47 \mu\text{F}$  จะได้ผลจำลองสัญญาณจากโปรแกรม Pspice ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ผลการทดลอง 4.1.2

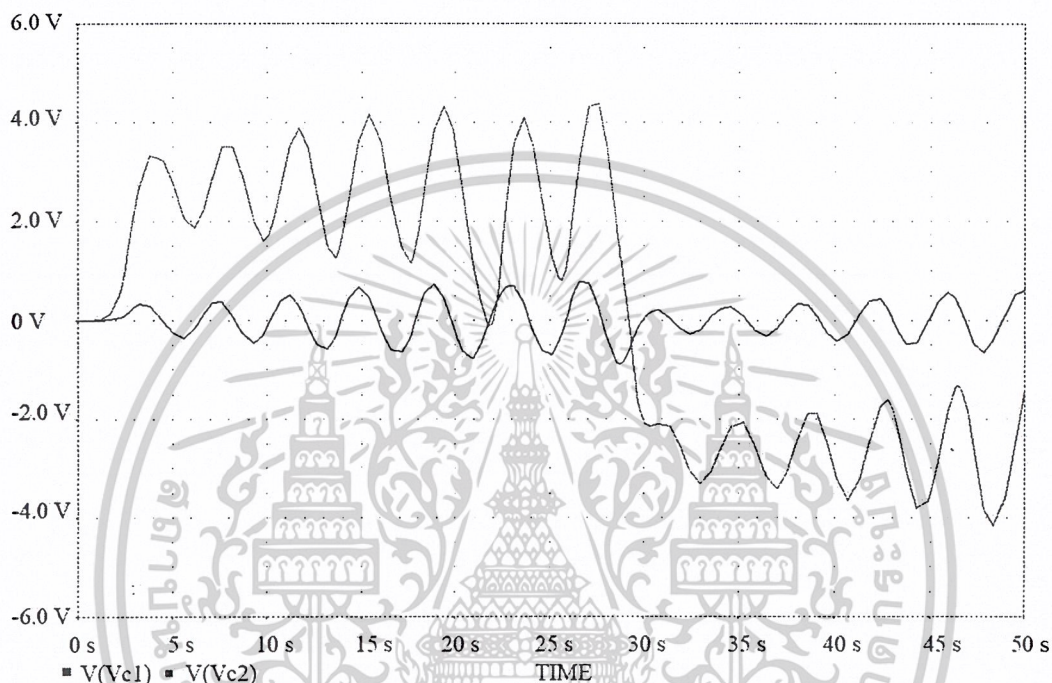


รูปที่ 4.5 ผลการทดลอง 4.1.2 เมื่อ  $V_{c1}$  เป็นแกน y และ  $V_{c2}$  เป็นแกน x

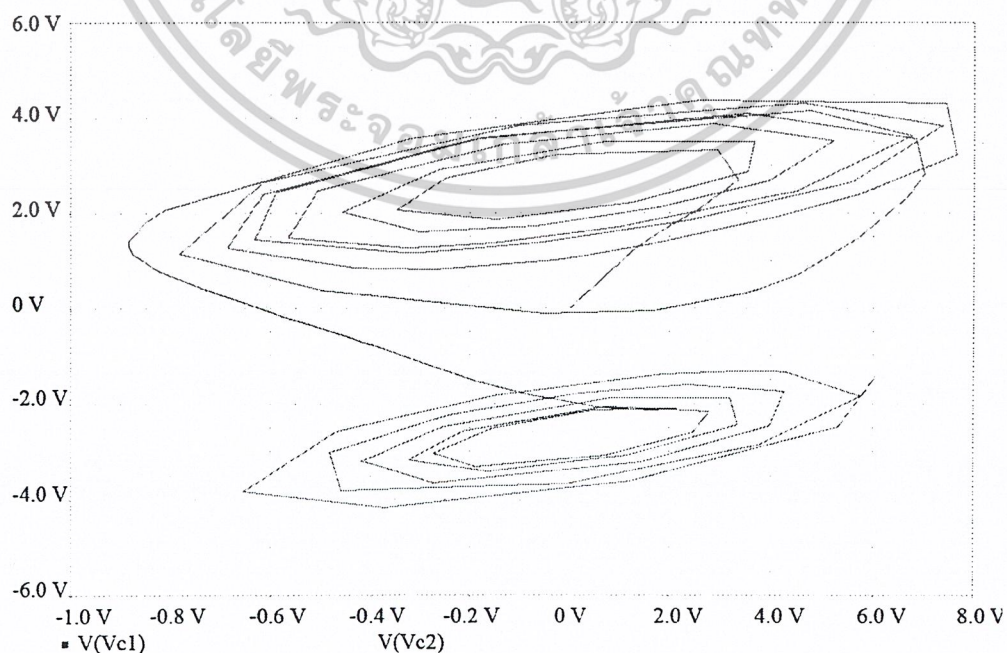
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาในชื่อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรในรูป 4.1 เป็นดังนี้

$R_1 = 220 \Omega$ ,  $R_2 = 220 \Omega$ ,  $R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_7 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{10} = 1.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 107.5 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 1075 \mu\text{F}$   
 และ  $C_3 = 107.5 \mu\text{F}$  จะได้ผลจำลองสัญญาณจากโปรแกรม Pspice ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ผลการทดลอง 4.1.3



รูปที่ 4.7 ผลการทดลอง 4.1.3 เมื่อ  $V_{c1}$  เป็นแกน y และ  $V_{c2}$  เป็นแกน x

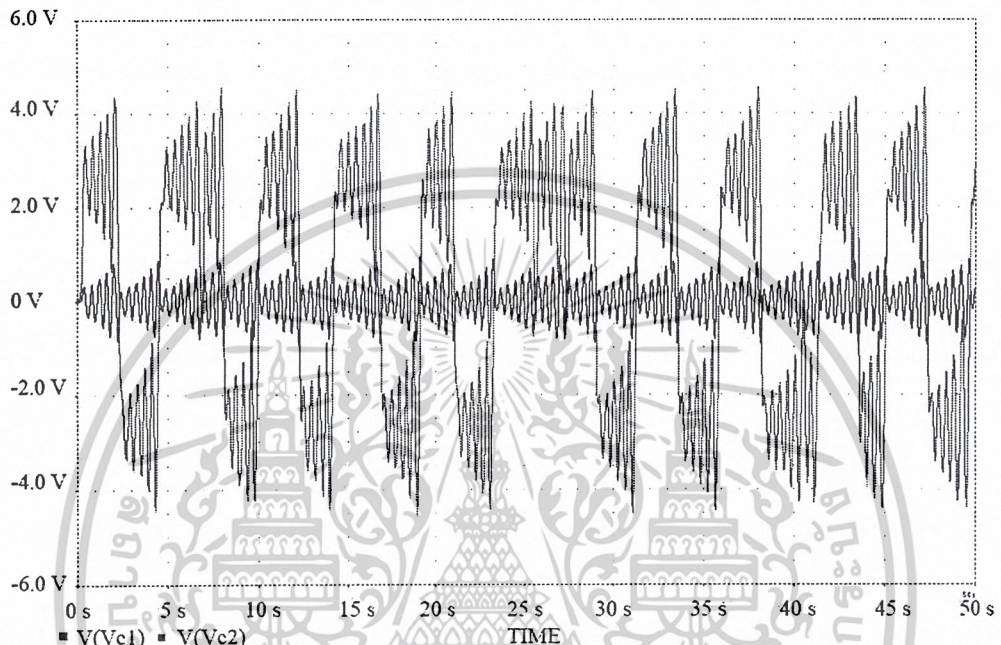
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรในรูป 4.1 เป็นดังนี้

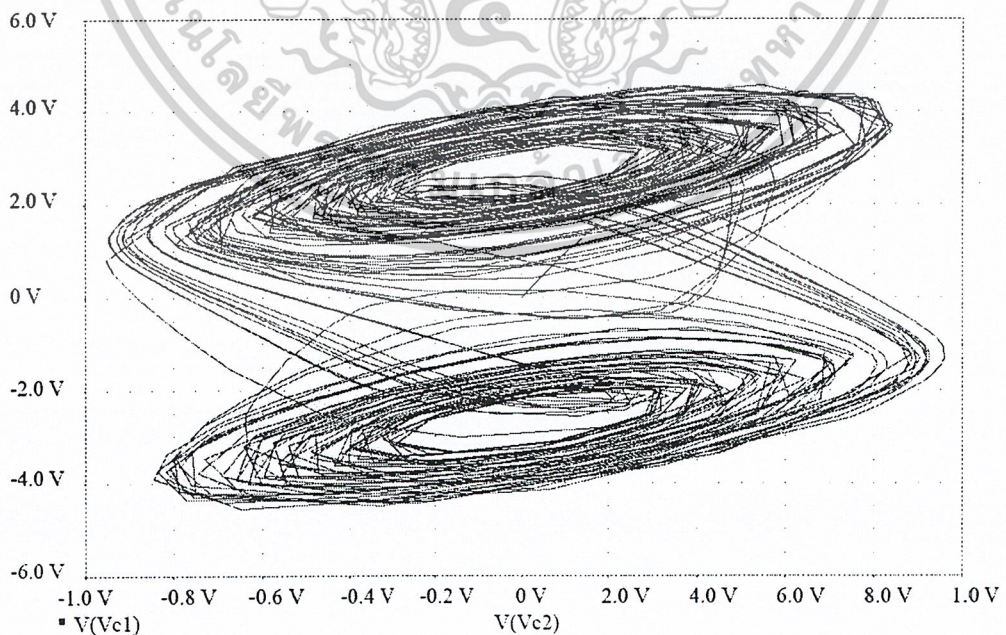
$R_1 = 220 \Omega$ ,  $R_2 = 220 \Omega$ ,  $R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,

$R_7 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{10} = 1.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 11.75 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 117.5 \mu\text{F}$

และ  $C_3 = 11.75 \mu\text{F}$  จะได้ผลจำลองสัญญาณจาก โปรแกรม Pspice ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ผลการทดลอง 4.1.4



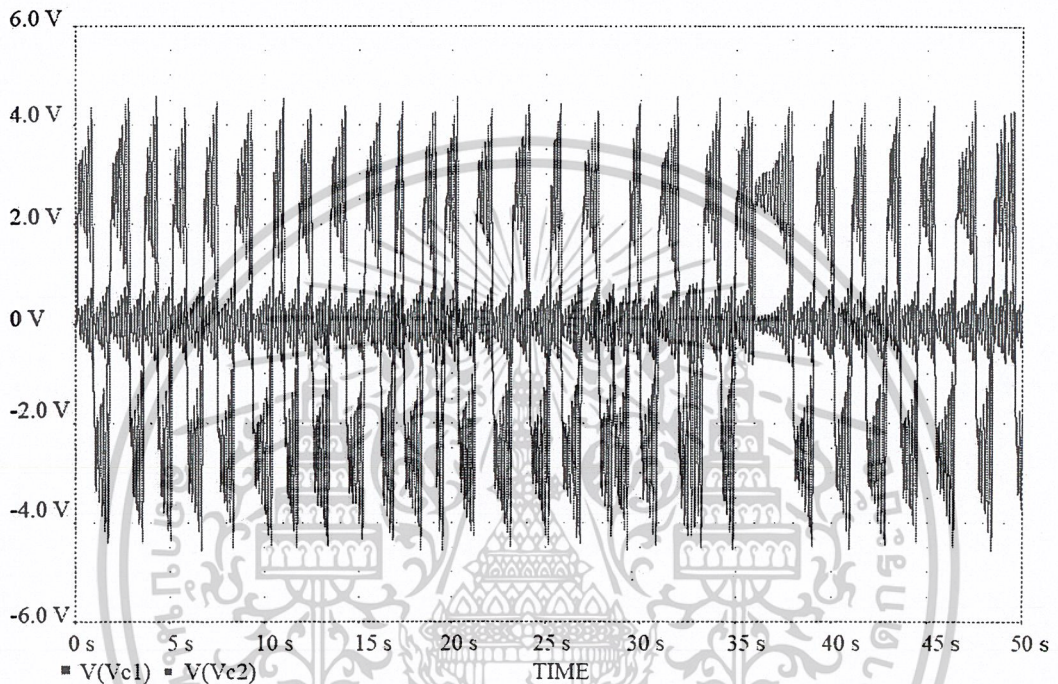
รูปที่ 4.9 ผลการทดลอง 4.1.4 เมื่อ  $V_{c1}$  เป็นแกน y และ  $V_{c2}$  เป็นแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

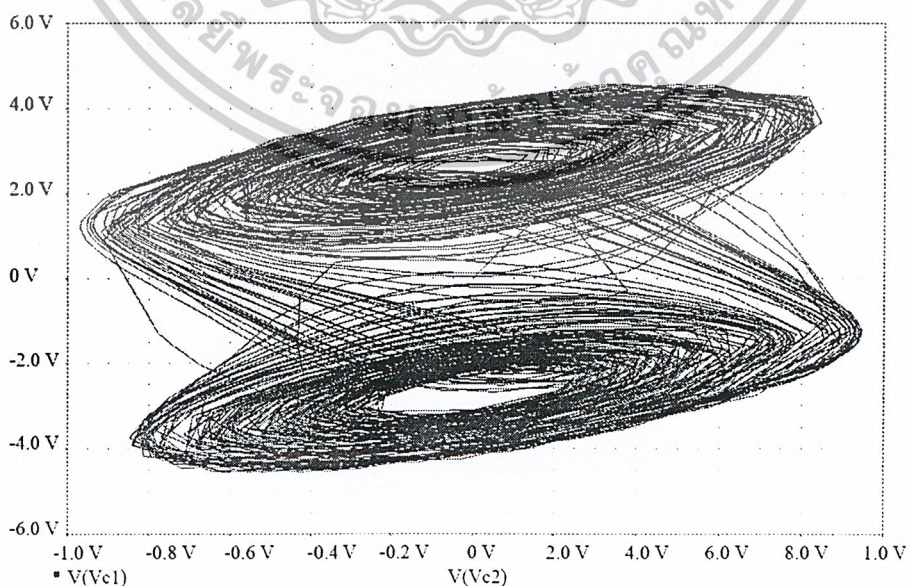
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรในรูป 4.1 เป็นดังนี้

$R_1 = 220 \Omega$ ,  $R_2 = 220 \Omega$ ,  $R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_7 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{10} = 1.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 4.7 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 47 \mu\text{F}$  และ  
 $C_3 = 4.7 \mu\text{F}$  จะได้ผลจำลองสัญญาณจากโปรแกรม Pspice ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 ผลการทดลอง 4.1.5

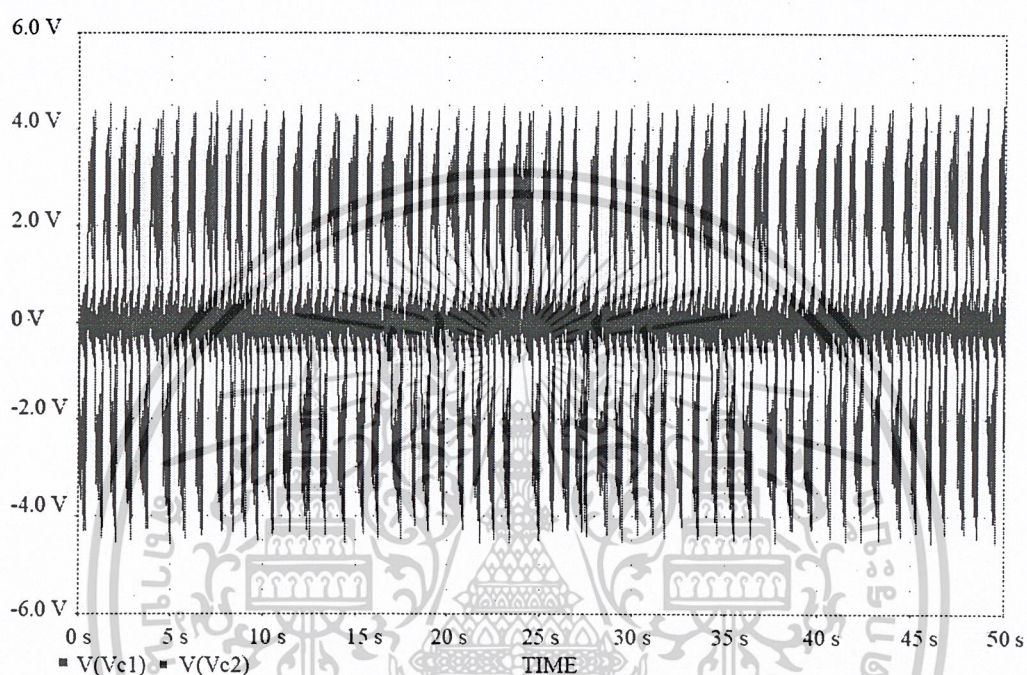


รูปที่ 4.11 ผลการทดลอง 4.1.5 เมื่อ  $V_c$  เป็นแกน y และ  $V_c$  เป็นแกน x

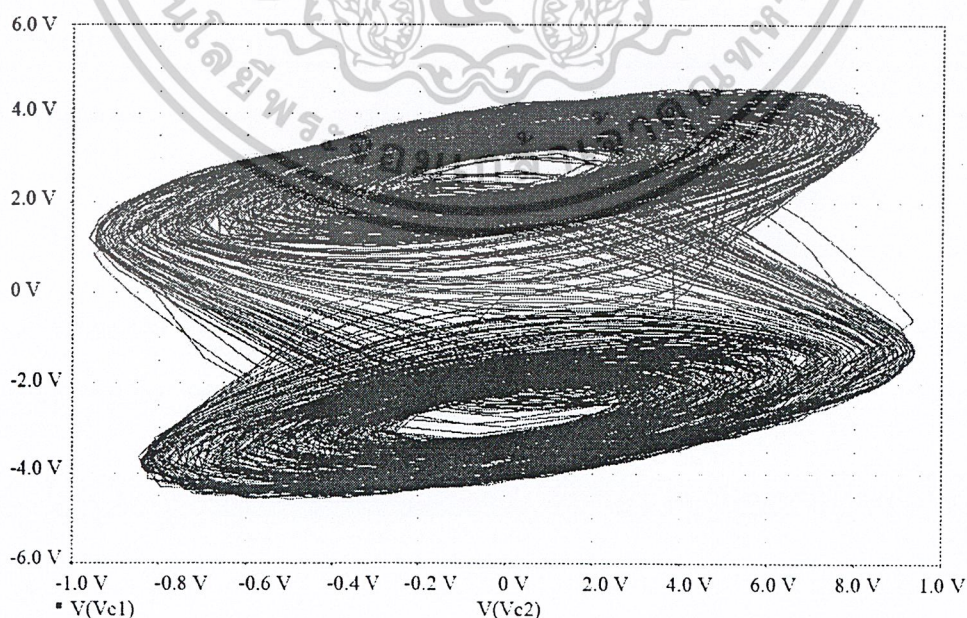
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรในรูป 4.1 เป็นดังนี้

$R_1 = 220 \Omega$ ,  $R_2 = 220 \Omega$ ,  $R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  
 $R_7 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{10} = 1.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 2.35 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 23.5 \mu\text{F}$  และ  
 $C_3 = 2.35 \mu\text{F}$  จะได้ผลจำลองสัญญาณจากโปรแกรม Pspice ที่ 4.12 และ 4.13



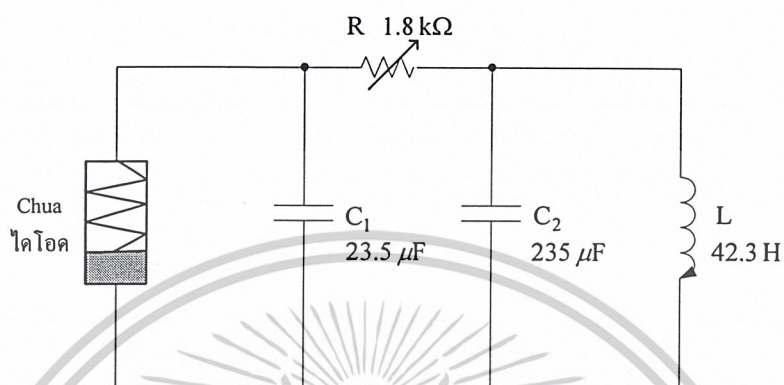
รูปที่ 4.12 ผลการทดลอง 4.1.6



รูปที่ 4.13 ผลการทดลอง 4.1.6 เมื่อ  $V_{c1}$  เป็นแกน y และ  $V_{c2}$  เป็นแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจร Chua



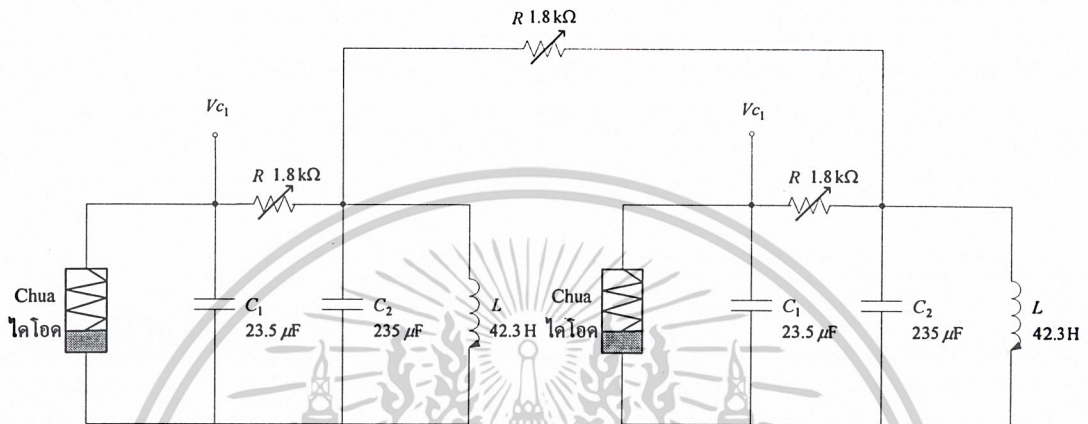
รูปที่ 4.14 วงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบความถี่ต่ำ

รูปที่ 4.15 สัญญาณออสซิลเลชันจากวงจร Chua ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจร Chua แบบคัปเป็ด

#### 4.3.1 วงจร Chua แบบคัปเป็ดเมื่อวัดสัญญาณจากจุด $V_{C_1}$ กับจุด $V_{C_1}$



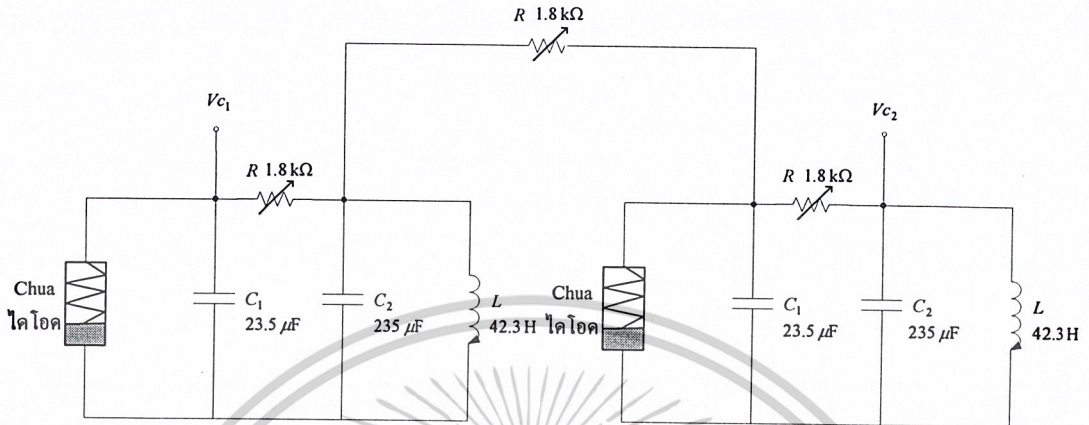
รูปที่ 4.16 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบคัปเป็ดที่วัดสัญญาณจากจุด  $V_{C_1}$  กับจุด  $V_{C_1}$



รูปที่ 4.17 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบคัปเป็ดที่วัดได้จากจุด  $V_{C_1}$  กับจุด  $V_{C_1}$  ย่าน X-Y ของ ออสซิลอสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 วงจร Chua แบบคัปเปิ้ลเมื่อวัดสัญญาณจากจุด $V_{c_1}$ กับจุด $V_{c_2}$



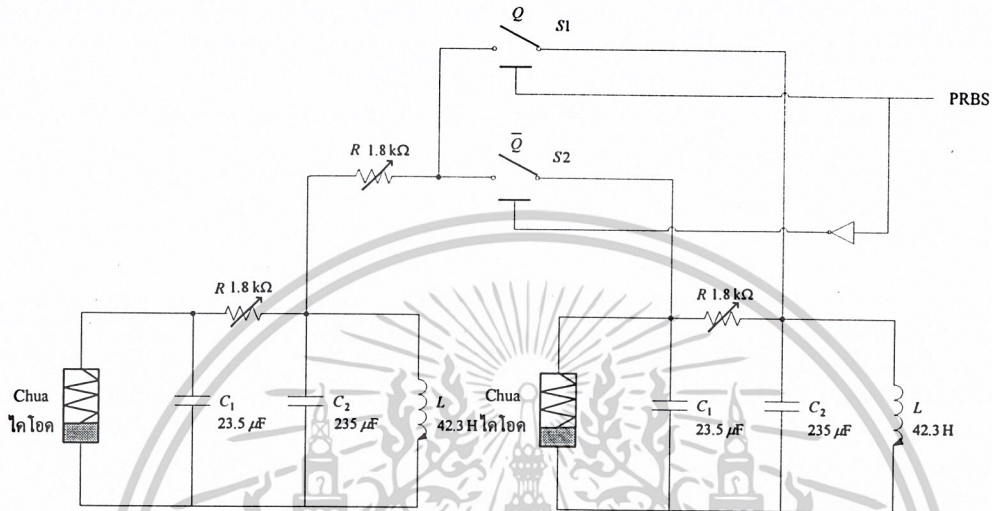
รูปที่ 4.18 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบคัปเปิ้ลที่วัดสัญญาณจากจุด  $V_{c_1}$  กับจุด  $V_{c_2}$



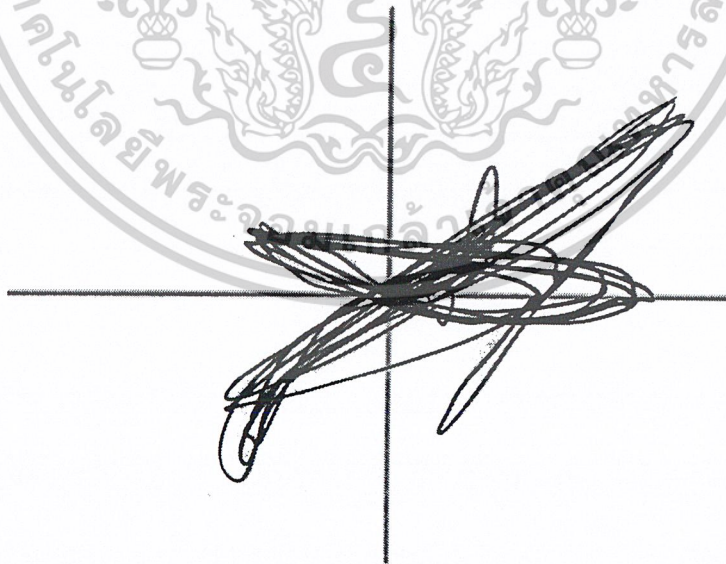
รูปที่ 4.19 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบคัปเปิ้ลที่วัดได้จากจุด  $V_{c_1}$  กับจุด  $V_{c_2}$  ย่าน X-Y ของ ออสซิลอสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจร Chua แบบคัปเปิ้ลที่ควบคุมโดยสัญญาณซีเควอนกึ่งแรนดัม



รูปที่ 4.20 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบคัปเปิ้ลที่ควบคุม โดยสัญญาณซีเควอนกึ่งแรนดัม



รูปที่ 4.21 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบคัปเปิ้ลที่ควบคุม โดยสัญญาณซีเควอนกึ่งแรนดัม ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจร Chua แบบห้วงโซ่

### 4.5.1 วงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบปิด



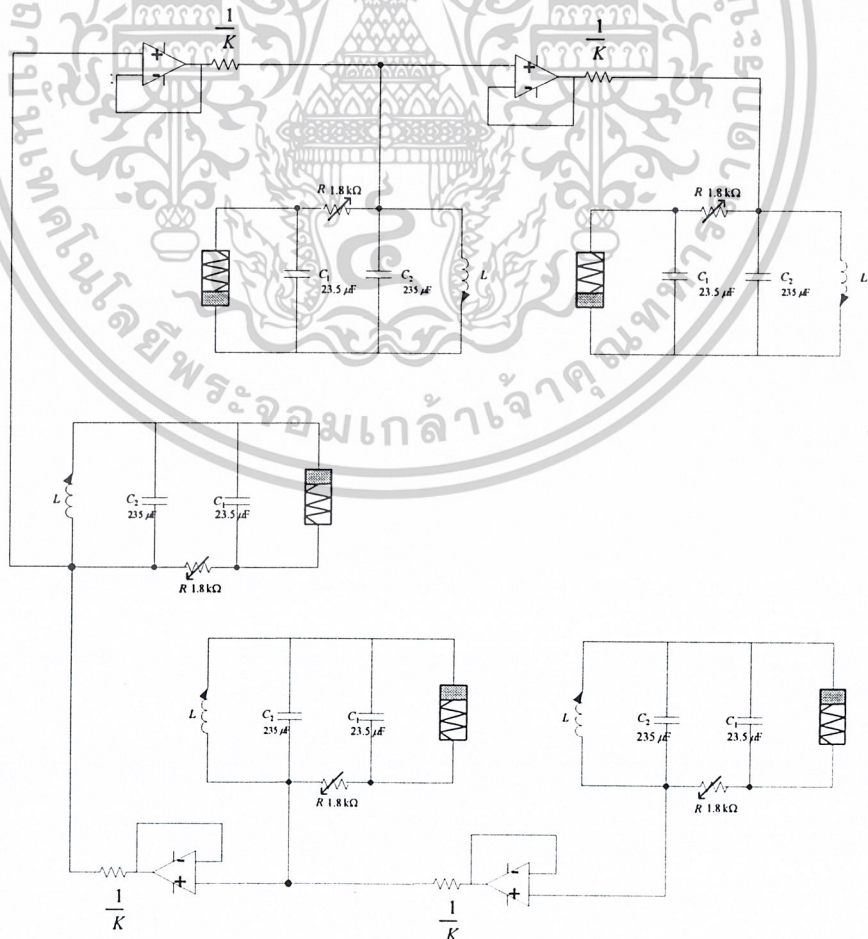
รูปที่ 4.22 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

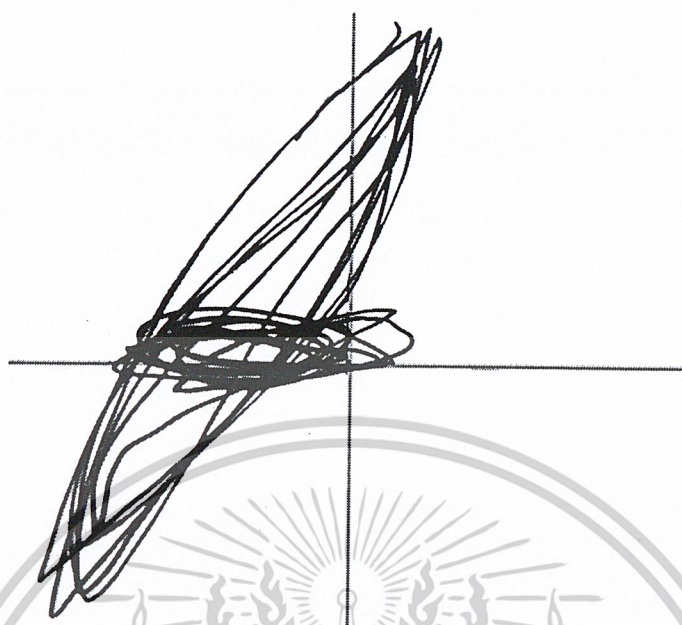


รูปที่ 4.23 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบปิด ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป

4.5.1 วงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบเปิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.24 วงจรกำเนิดสัญญาณจากวงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบเปิด ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 สัญญาณอลวนจากวงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบเปิด ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป

#### 4.6 ผลการทดลองเรื่องวงจรขยายสัญญาณอลวน

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาหลักการควบคุม และวงจรขยายเพื่อนำไปขับมอเตอร์กระแสตรงขนาดเล็ก

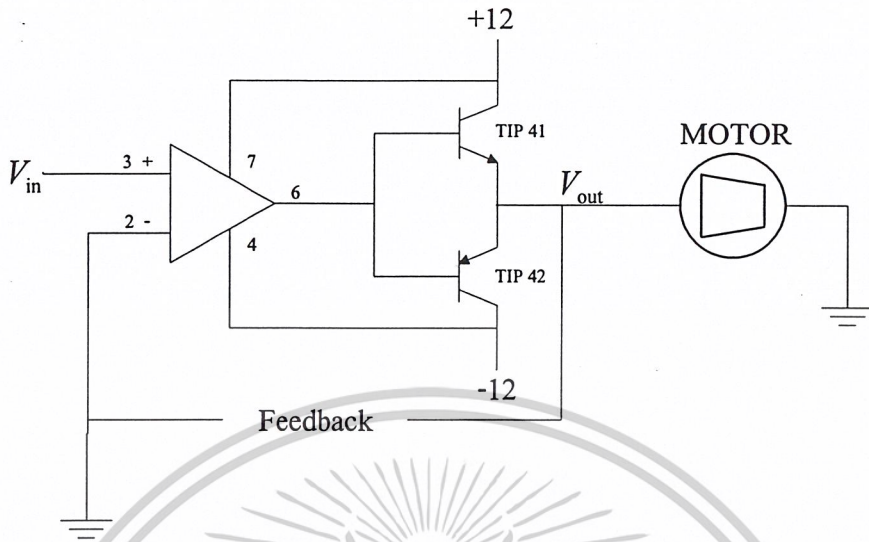
อุปกรณ์

1. มอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็ก ถาวรขนาดเล็ก
2. แหล่งจ่ายแรงงานดัน  $+12\text{ v}$ ,  $-12\text{ v}$
3. IC LF 351
4. R,C

วิธีการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 รูปวงจรมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

2. เปิดสวิตช์จ่ายไฟให้กับวงจร ปรับให้  $V_{in} = 0$  volt วัดค่า  $V_{out}$
3. ปรับ  $V_{in}$  ให้เป็น + และ - สลับกันหลายๆ ค่า วัด  $V_{out}$  และบันทึกผลที่ถูกต้อง

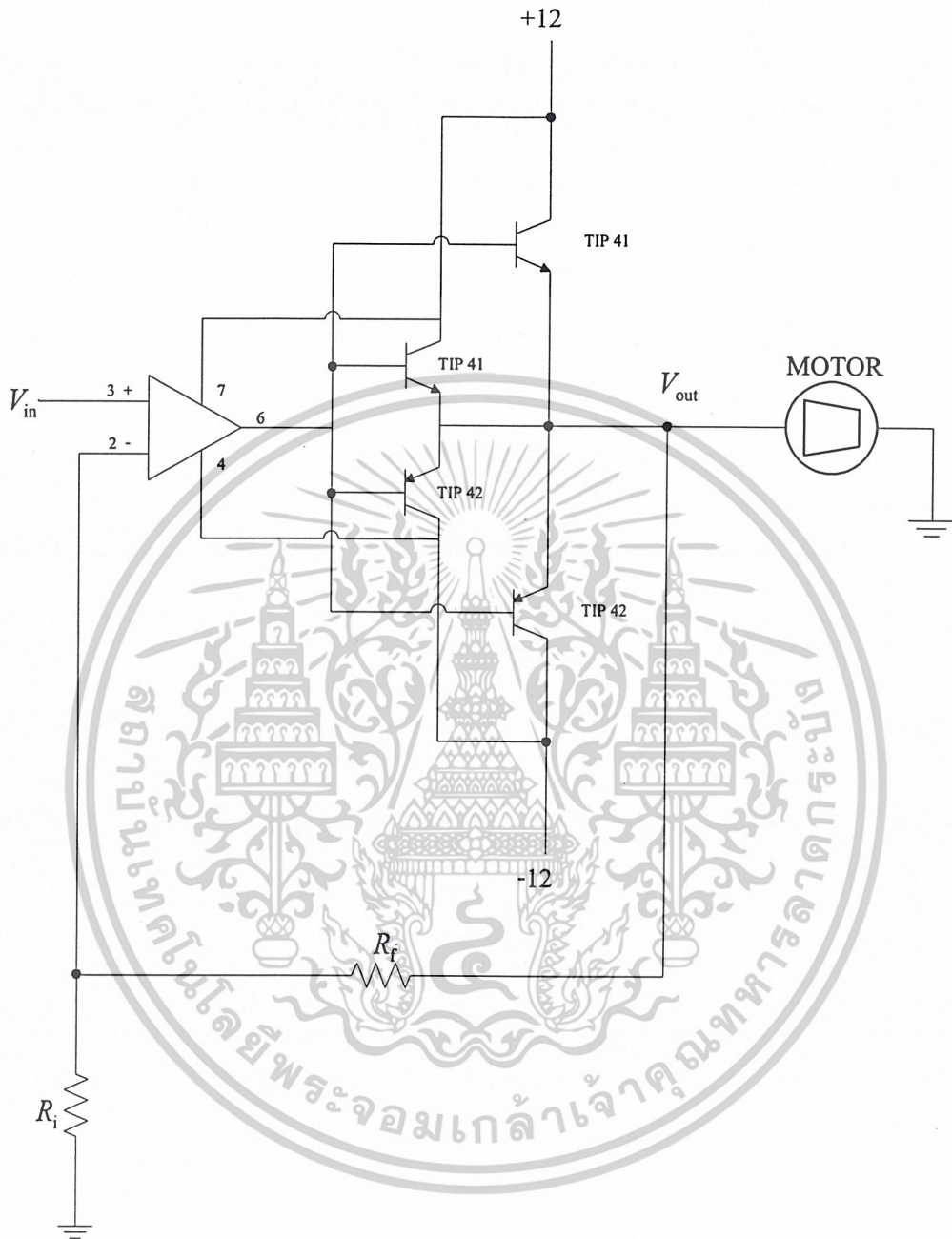
#### บันทึกผลการทดลอง

- จากวิธีการทดลองในข้อ 2.  $V_{out} = 0$  v
- จากวิธีการทดลองในข้อ 3.

| $V_{in}$ (volt) | $V_{out}$ (volt) | ผลที่เกิดขึ้น           |
|-----------------|------------------|-------------------------|
| 12              | 10.5             | มอเตอร์หมุน             |
| 10              | 10               | มอเตอร์หมุน             |
| 8               | 8                | มอเตอร์หมุน             |
| 6               | 6                | มอเตอร์หมุน             |
| 4               | 4                | มอเตอร์หมุน             |
| 2               | 2                | มอเตอร์หมุน             |
| 0               | 5, -8            | ความเร็วมอเตอร์ไม่คงที่ |
| -2              | 5, -8            | ความเร็วมอเตอร์ไม่คงที่ |
| -4              | -                | มอเตอร์เกิดการกระตุก    |
| -6              | -6.6             | มอเตอร์หมุน             |
| -8              | -8.8             | มอเตอร์หมุน             |
| -10             | -10              | มอเตอร์หมุน             |
| -12             | -12.5            | มอเตอร์หมุน             |

#### 4. ต่อดวงจรมอเตอร์ที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



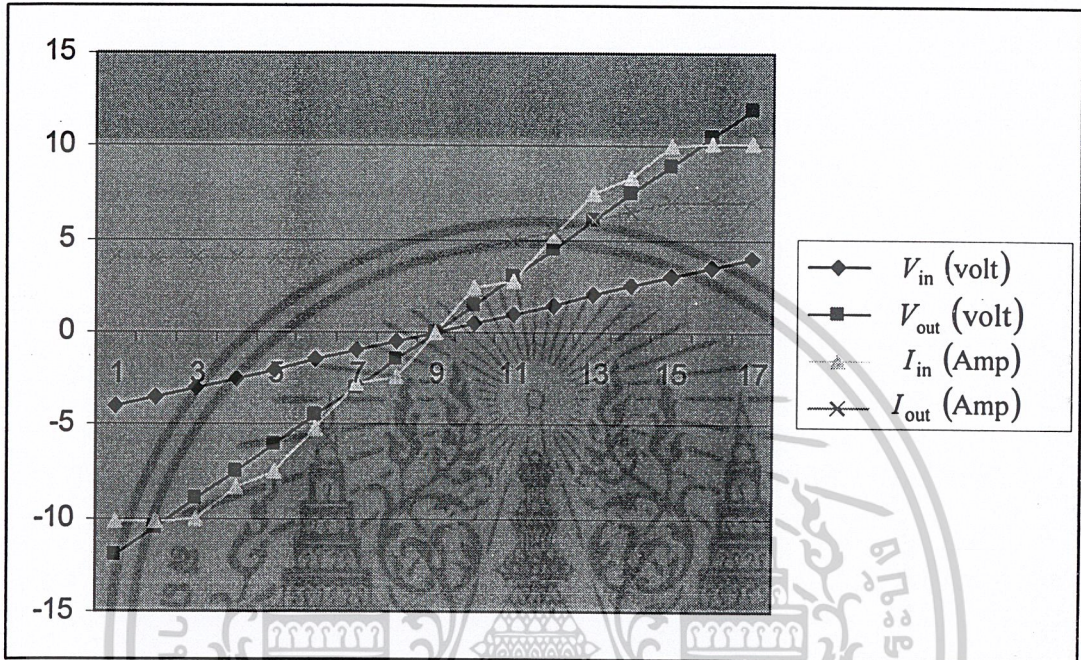
รูปที่ 4.27 รูปวงจรขยายที่ใช้ในการทดลอง

5. เปิดสวิทช์จ่ายไฟให้กับวงจร ปรับให้  $V_{in} = 0$  volt วัดค่า  $V_{out}$ ,  $I_{in}$  และ  $I_{out}$
6. ปรับ  $V_{in}$  ให้เป็น + และ - สลับกันหลายๆ ค่า วัด  $V_{out}$ ,  $I_{in}$  และ  $I_{out}$  และบันทึกผลที่ถูกต้อง

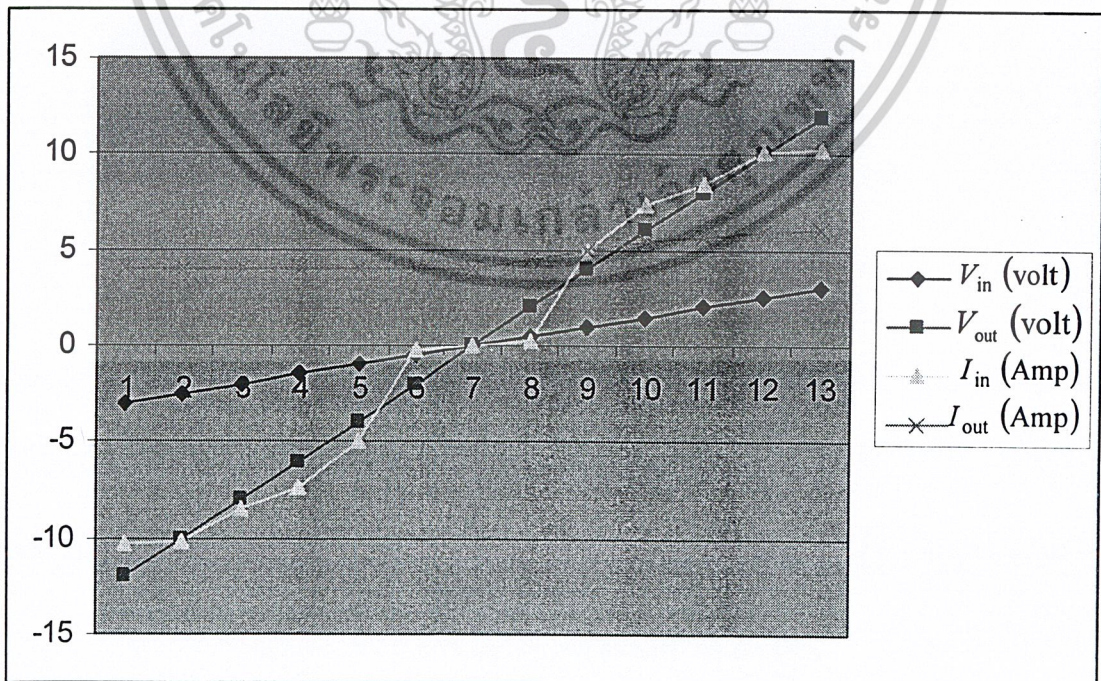
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บันทึกผลการทดลอง

- จากวิธีการทดลองในข้อ 4. และ 5.

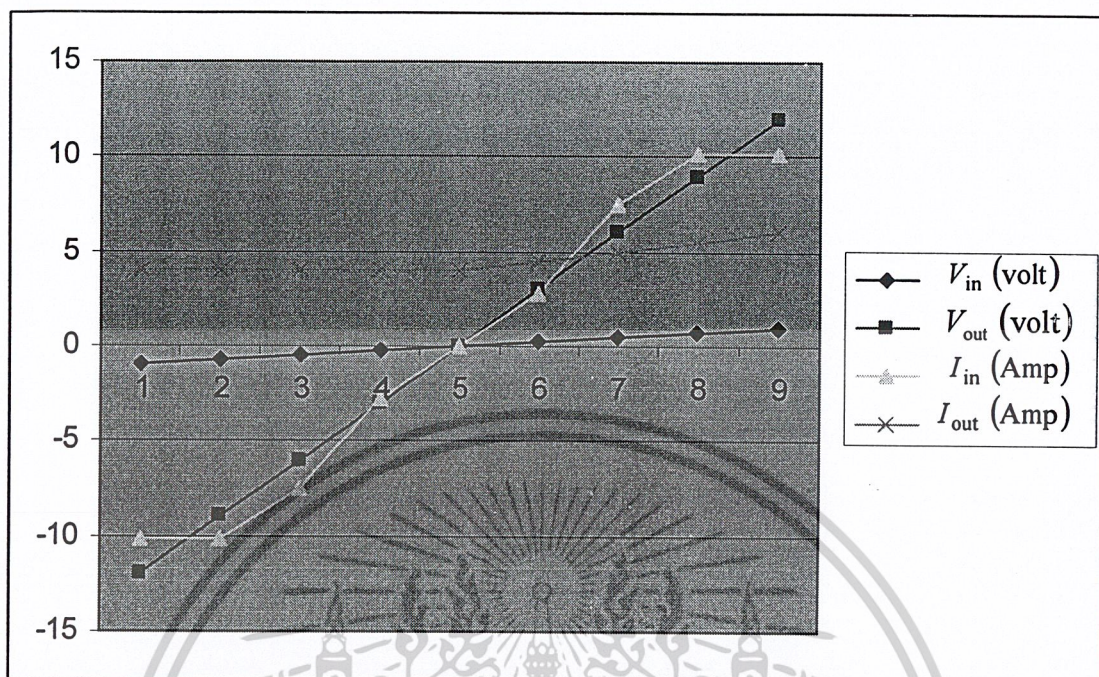


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่ออัตราขยายเท่ากับ 3



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่ออัตราขยายเท่ากับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

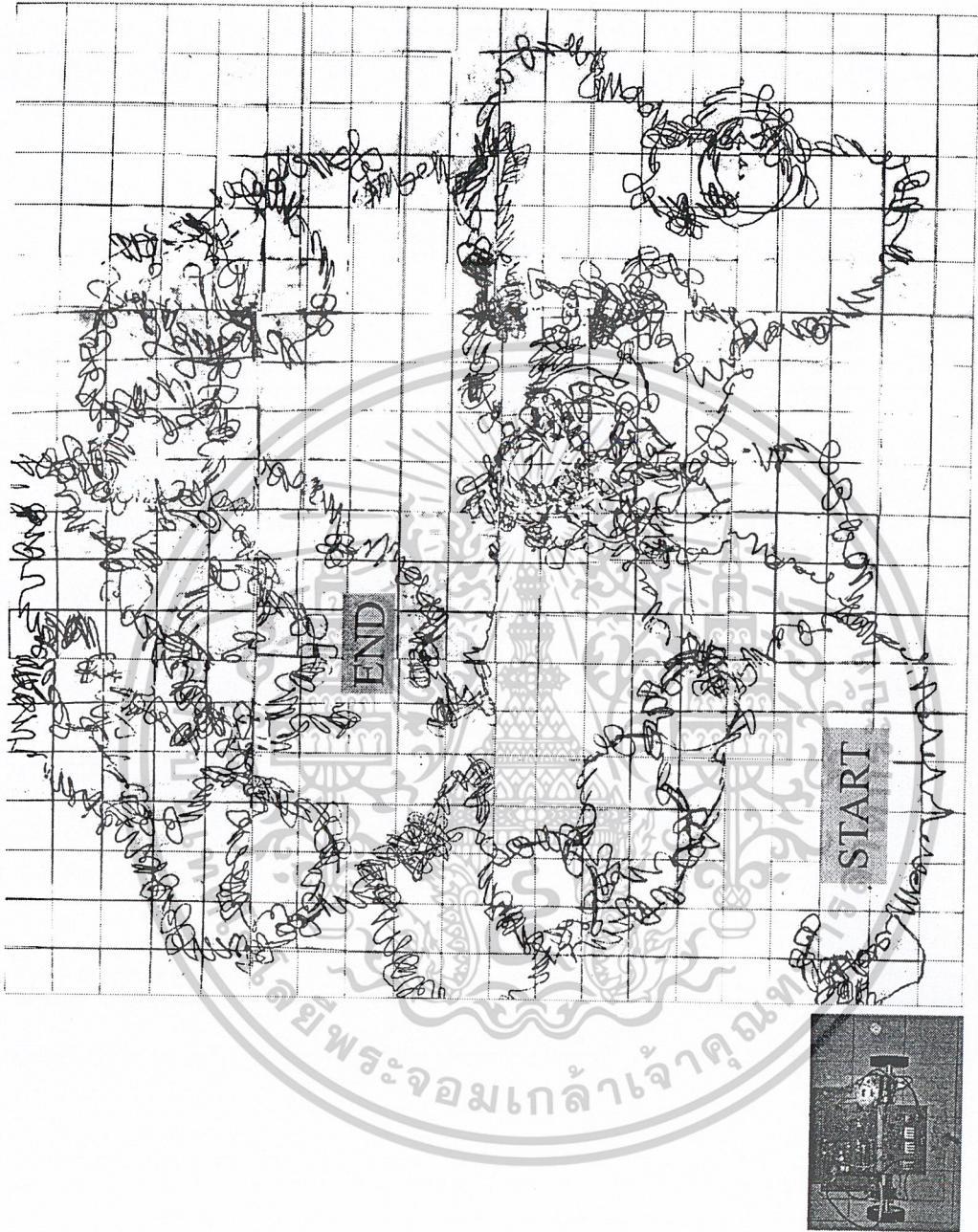


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่ออัตราขยายเท่ากับ 12

#### 4.7 ผลการจำลองทางเดินของหุ่นยนต์ต่อสวน

##### 4.7.1 ผลการจำลองทางเดินเพื่อหาพื้นที่ที่ครอบคลุมทางเดินของหุ่นยนต์ต่อสวน

โดยนำหุ่นยนต์ต่อสวนมาวิ่งบนแบบจำลองที่มีขนาด 20x20 บล็อก ซึ่งแต่ละบล็อกมีขนาด 10x10 ซม.เป็นเวลา 30 นาที ผลที่ได้เมื่อเราปล่อยให้หุ่นยนต์ต่อสวนวิ่งไปเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที หุ่นยนต์ต่อสวนจะสามารถวิ่งได้ครอบคลุมพื้นที่ 289 บล็อก จากพื้นที่ทั้งหมด 400 บล็อก ซึ่งคิดได้เป็น 72.25% ของพื้นที่ทั้งหมด ดังรูป



รูปที่ 4.31 ผลการจำลองทางเดินของหุ่นยนต์ถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

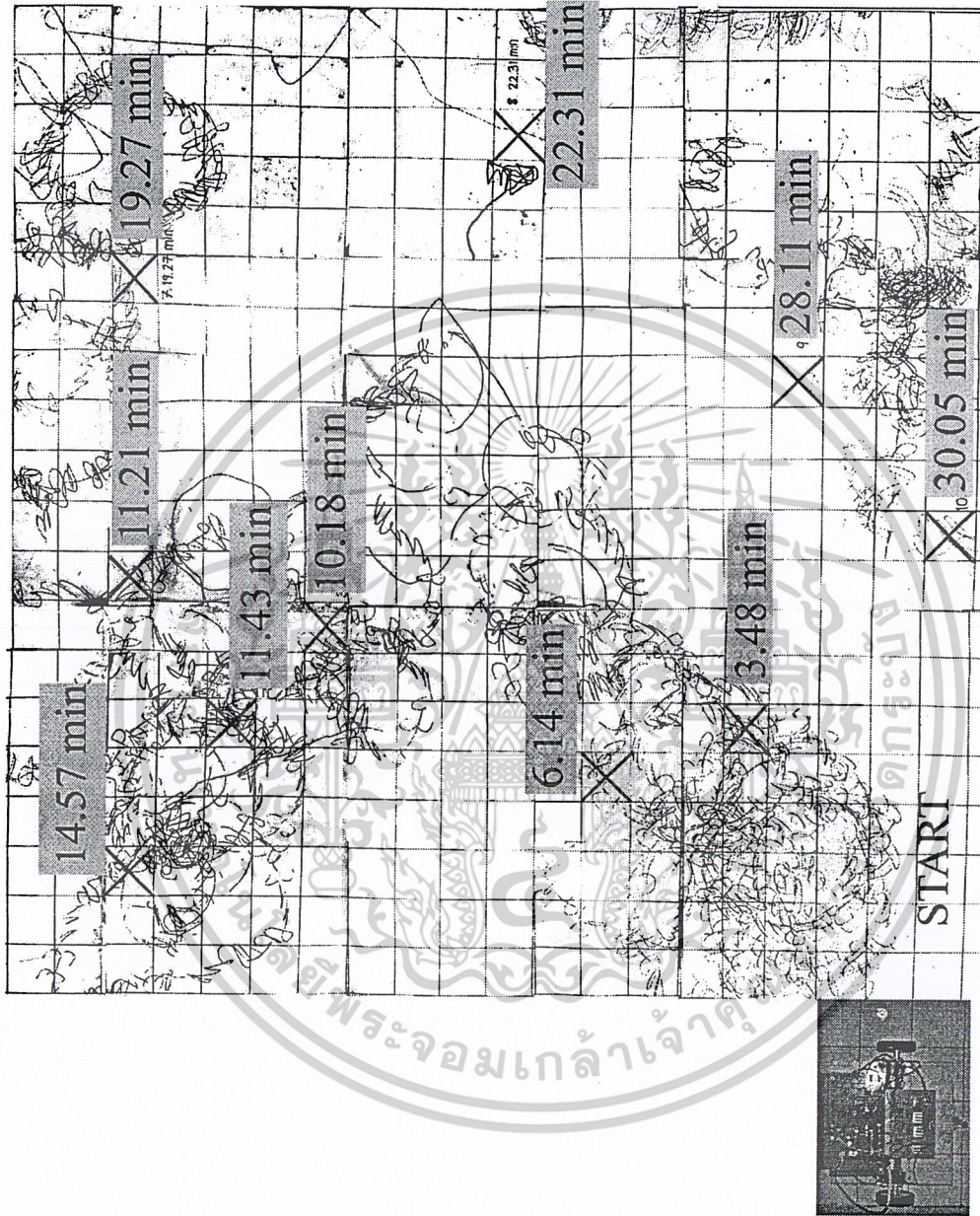
#### 4.7.2 ผลการจำลองทางเดิน โดยกำหนดจุดที่ผ่านของหุ่นยนต์อลวน

โดยการสุ่มตำแหน่ง 10 ตำแหน่ง บนแบบจำลองแล้วจับเวลาที่หุ่นยนต์อลวนวิ่งผ่านในแต่ละตำแหน่งไปเรื่อยๆ จนครบ 10 ตำแหน่ง ซึ่งผลของการจับเวลาที่หุ่นยนต์อลวนวิ่งผ่านได้ในแต่ละตำแหน่งเป็นดังนี้

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| - ตำแหน่งแรกที่เวลา     | 3.48 นาที  |
| - ตำแหน่งที่สองที่เวลา  | 6.14 นาที  |
| - ตำแหน่งที่สามที่เวลา  | 10.18 นาที |
| - ตำแหน่งที่สี่ที่เวลา  | 11.21 นาที |
| - ตำแหน่งที่ห้าที่เวลา  | 11.43 นาที |
| - ตำแหน่งที่หกที่เวลา   | 14.57 นาที |
| - ตำแหน่งที่เจ็ดที่เวลา | 19.27 นาที |
| - ตำแหน่งที่แปดที่เวลา  | 22.31 นาที |
| - ตำแหน่งที่เก้าที่เวลา | 28.11 นาที |
| - ตำแหน่งที่สิบที่เวลา  | 30.05 นาที |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ผลการกำจัดทางเดินของหุ่นยนต์ถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลที่ได้

#### 5.1 สรุปผลการทดลองจากวงจร Chua แบบต่างๆ

โครงการนี้เป็นารออกแบบและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนซึ่งได้มีการสร้างสัญญาณอลวนที่มีความซับซ้อนแบบต่างๆ โดยได้อาศัยการพัฒนาจากวงจร Chua

จากผลการทดลองวงจร Chua แบบปกติสรุปได้ว่า สัญญาณอลวนที่สร้างจากวงจร Chua นั้นจะแปรตามค่าของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ในที่นี้เราใช้วิธีการการสังเคราะห์ความเหนี่ยวนำ (synthetic inductors)), ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว (Chua ไดโอด) ซึ่งถ้าต้องการปรับเปลี่ยนสัญญาณก็สามารถทำได้ โดยการเปลี่ยนค่าต่างๆ ตามสมการที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2

ส่วนวงจร Chua แบบคัปเปิล คือการนำวงจร Chua สองวงจร ซึ่งเราจะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ค่อนข้างมีความละเอียดในการปรับค่า เนื่องจากมีความไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้นมาก ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจะทำให้สัญญาณอลวนมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยวงจร Chua แบบคัปเปิลจะมีสองชนิดดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

เนื่องจากสัญญาณจากวงจร Chua แบบคัปเปิลมีความน่าสนใจเราจึงนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยการนำวงจร Chua แบบคัปเปิล ที่ควบคุมโดยสัญญาณเซเวนกิ่งแรนด้อม (PRBS) มาทำการควบคุมการเลือกใช้สัญญาณอลวนควบคุมจากวงจรคัปเปิลทั้งสองแบบ

นอกจากนี้เมื่อนำวงจร Chua มาต่อเชื่อมต่อกันแบบห้วงโซ่ จะทำให้สัญญาณอลวนมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยวงจร Chua แบบห้วงโซ่ จะแบ่งออกเป็นวงจร Chua ห่วงโซ่แบบปิด และวงจร Chua ห่วงโซ่แบบเปิด

#### 5.2 สรุปผลการทดลองเรื่องวงจรรขยายสัญญาณอลวน

จากการที่ได้ทดลองวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงขนาดเล็กที่ได้ผ่านวงจรแอมพลิไฟเออร์เพื่อขยายสัญญาณ เมื่อเราได้ทำการปรับค่า  $V_m$  ให้เป็น + และ - สลับกันหลายๆ ค่า วัด  $V_{out}$  จากนั้นบันทึกผลที่ได้โดยวัดเทียบค่าความต่างศักย์ของมอเตอร์กระแสตรงเทียบกับกราวด์ของวงจรปรากฏว่า วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงนั้นเอาท์พุทจะมีอัตราขยายที่ดีในช่วงที่ความต่างศักย์ต่ำๆ เท่านั้น แต่ในช่วงที่ใช้ความต่างศักย์สูงนั้นจะมีอัตราขยายความต่างศักย์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเมื่อเราทำการต่อค่าความต้านทานเข้ากับ feedback แล้วทำให้เป็น non-inverting Amplifier จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเราสามารถปรับค่าอัตราขยายได้ตามที่เราต้องการตามสมการของ Non-inverting Amplifier ที่เราได้กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 และเมื่อนำทรานซิสเตอร์อีก 2 ตัวเข้ามาต่อขนานกันเข้าไปจะช่วยทำให้วงจรแอมป์สามารถขยายกระแสได้สูงขึ้นและมากยิ่งขึ้น เนื่องจากจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 4 ตัวช่วยกันขยายกระแส

### 5.3 สรุปผลการทดลองเมื่อนำสัญญาณอลวนแบบต่าง ไปขับมอเตอร์กระแสตรง

จากการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อนำสัญญาณที่สร้างจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ สามารถขยายสัญญาณ ซึ่งทำให้แบบจำลองหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ แต่เนื่องจากวงจรขยายที่นำมาใช้ มีอัตราขยายไม่มากเพียงพอ อีกทั้งวงจรขยายไม่สามารถตอบสนองสัญญาณอลวนได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นลักษณะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองจึงไม่ตรงตามในอุดมคติ

ซึ่งสัญญาณอลวนที่ได้จากวงจร Chua แบบคัปเปิล ที่ควบคุมโดยสัญญาณไซน์แอมพลิจูดเรกคูลัมจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด แต่ในขณะที่สัญญาณที่ได้จากวงจร Chua แบบห้วงโซ่ ทั้งสองแบบจะให้กำเนิดสัญญาณที่ซับซ้อนออกมาได้ยากเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของวงจรปรับแต่งได้ยาก และเมื่อปรับได้แล้วก็ไม่มีความเสถียรจึงทำให้สัญญาณที่ได้จากวงจร Chua แบบห้วงโซ่ ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้

### 5.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบมีความซับซ้อนมากแบบต่างๆ ปัญหาที่พบโดยทั่วไปก็คือ ถ้าเราเอาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมและทฤษฎี มาทำการปรับแต่งให้กับอุปกรณ์แล้วสัญญาณที่ได้ไม่ตรงตามที่ได้จากโปรแกรม เป็นเพราะค่าอุปกรณ์ต่างๆ มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น และสัญญาณอลวนเป็นสัญญาณที่มีความละเอียดอ่อนมากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับวงจร เพราะถ้าเราทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไปเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้รูปแบบของสัญญาณเปลี่ยนแปลงหายไปเลย ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่

อีกทั้งวงจรขยายที่เรานำมาใช้ขยายสัญญาณอลวนนั้นไม่สามารถขยายสัญญาณออกมาได้เกินค่าของความต่างศักย์ที่ต่อเลี้ยงให้กับวงจรขยาย ดังนั้นจึงทำให้มีขอบเขตในการขยายสัญญาณอลวน ทำให้สัญญาณที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณอลวนไม่แรงพอที่จะไปขับมอเตอร์กระแสตรงได้ และเนื่องจากสัญญาณอลวนเป็นสัญญาณที่มีความละเอียดและซับซ้อนสูงจึงทำให้มอเตอร์กระแสตรงไม่สามารถตอบสนองต่อสัญญาณได้ดีพอ

## 5.5 แนวทางในการพัฒนา

จากการที่เราได้สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีความซับซ้อนแบบต่าง ทำให้เราสามารถให้กำเนิดสัญญาณออกมาได้หลากหลายรูปแบบ ซึ่งสัญญาณเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับลักษณะการใช้งานในภาคสนามในหลายๆลักษณะ แล้วแต่ความเหมาะสมของงานได้ เช่น หุ่นยนต์ตัดหญ้า หุ่นยนต์ถูพื้น หุ่นยนต์ดูดฝุ่น เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถนำสัญญาณอลวนที่มีความซับซ้อนแบบต่างๆ ไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับงานในโรงงานอุตสาหกรรมแบบต่างๆได้อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

1. Vasudev K Aatre, **Network Theory and Filter Design**, Wiley Eastern Limited, New Delhi Bangalore Bombay Calcutta, 1983.
2. Paul W. Tuinenga, Spice, **A Guide to Circuit Simulation & Analysis Using Pspice**, Second Edition, Prentice Hall A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey , 1985.
3. Michael Peter Kennedy, “Three Steps to Chaos-Part-I: Evolution,” IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUIT AND SYSTEM, FUNDAMENTAL THEORY AND APPLICATIONS, Vo. 40 NO. 10, Oct. 1993.
4. Michael Peter Kennedy, “Three Steps to Chaos-Part II: A Chua’s Circuit Primer,” IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUIT AND SYSTEM, FUNDAMENTAL THEORY AND APPLICATIONS, Vol. 40 NO. 10, Oct. 1993.
5. Rabinder N. Madan, **Chua’s Circuit, A Paradigm for CHAOS**, World Scientific series on nonlinear science, 1993.
6. Sundaram Natarajan, **Theory and Design of linear active networks**, McGrawhill Book Company, 1989.
7. Wai-Kai Chen, **Passive and Active Filters theory and implementations**, John Willy & Sons, 1986.
8. รศ.ดร โยธิน เปรมปราณีรัชต์, วิเคราะห์และออกแบบระบบการควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. V.N. Yamorik, S.N. Demidenko, **Generation and Application of Pseudorandom Sequences for random testing**, John Willy & Sons, 1988.

10. Solomon W. Golomb, **Shift Register Sequences**, Holden-day, Inc., San Francisco, 1967.

11. U. Tietze Ch.Schenk, **Advance Electronic Circuits**, Springer-Verlag Heidelberg NewYork 1978.

12. กฤดากร ก่ออมการ, การสื่อสารข้อมูล, วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ, 2540.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้