



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์  
การสร้างตัวเลียนแบบอุปกรณ์แมมริสเตอร์สำหรับการเรียนรู้  
Construction of Memristor Emulator for Education Propose

กฤตดาคร กล่อมการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

TK

7870

ก 213ก

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 131115

วัน,เดือน,ปี 22, 7, 2557

b. 12603661  
i. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) การสร้างตัวเลียนแบบอุปกรณ์แมมริสเตอร์สำหรับการเรียนรู้  
แหล่งเงิน เงินรายได้

ประจำปี งบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 72,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2554 - 30 กันยายน 2555 /

หัวหน้าโครงการ นาย กฤดากร กล่อมการ ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้แบบการสร้างตัวเลียนแบบแมมริสเตอร์เพื่อเป็นชุดทดลองการเรียนรู้ สำหรับนักศึกษา  
ระดับปริญญาตรีของคณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยสร้างเลียนแบบจากวงจรสมมูลย์ที่ค้นพบ โดยห้องปฏิบัติการ  
ของบริษัท HP วงจรที่สร้างขึ้นใช้อุปกรณ์ที่หาได้ตามท้องตลาด โดยขนาดของวงจรต้นแบบสามารถใช้สาธิต  
และทดลองให้สำหรับนักศึกษาในการลงปฏิบัติการวิชาปฏิบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ได้จริง

คำสำคัญ : แมมริสเตอร์ วงจรไม่เป็นเชิงเส้น ตัวเลียนแบบอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title Construction of Memristor Emulator for Education Propose**

**Researcher Mr. Kitdakorn Klomkarn**

**Faculty Engineering, Department Computer Engineering**

### ABSTRACT

This research report presented the construction of memristor emulator for under graduate engineering student for experiment in laboratory. A memristor emulator imitates the behavior of a nano-scaled memristor discovered by Hewlet Packcard researcher. The electronic circuit implemented using off the-shelf-components which suitable for experiment and demonstration for undergraduate student.

Keyword Memristor, Nonlinear circuit, emulating circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ด้วย  
เงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2555



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	V
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b> .....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีแมมริสเตอร์.....	5
<b>บทที่ 3 การจำลองแมมริสเตอร์</b> .....	10
3.1 การจำลองโดยคณิตศาสตร์.....	10
3.2 การเลียนแบบแมมริสเตอร์โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	16
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองตัวเลียนแบบแมมริสเตอร์</b> .....	21
4.1 การทดลองแสดงผลของ pinched hysteresis.....	21
4.1 การทดลองใช้แมมริสเตอร์เป็นตัวกรองความถี่.....	24
4.1 การทดลองใช้แมมริสเตอร์เป็นวงจรสร้างสัญญาณอลวน.....	25
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	28
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	28

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าและอุปกรณ์สองพอร์ต	6
2.2 สัญญาลักษณ์ของเมมริสเตอร์	7
2.3 แสดงลักษณะของรูปของ pinch hysteresis	8
2.4 โครงสร้างของเมมริสเตอร์ที่สร้างโดย บริษัท HP	9
3.1 ผลการจำลองของค่าประจุและฟลักซ์แม่เหล็กโดยมีค่า $R_{ON} = 100\Omega, R_{OFF} = 1600\Omega, \mu_D$ drift mobility $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right), D = 10nm$ ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 3 rad/s	13
3.2 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดย มีค่า $R_{ON} = 100\Omega, R_{OFF} = 1600\Omega, \mu_D$ drift mobility $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right), D = 10nm$ ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 3 rad/s	13
3.3 ผลการจำลองของค่าประจุและฟลักซ์แม่เหล็กโดยมีค่า $R_{ON} = 100\Omega, R_{OFF} = 1600\Omega, \mu_D$ drift mobility $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right), D = 10nm$ ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 10 rad/s	14
3.4 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดย มีค่า $R_{ON} = 100\Omega, R_{OFF} = 1600\Omega, \mu_D$ drift mobility $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right), D = 10nm$ ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 10 rad/s	14
3.5 ผลการจำลองของค่าประจุและฟลักซ์แม่เหล็กโดยมีค่า $R_{ON} = 100\Omega, R_{OFF} = 1600\Omega, \mu_D$ drift mobility $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right), D = 10nm$ ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 50 rad/s	15
3.6 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดย มีค่า $R_{ON} = 100\Omega, R_{OFF} = 1600\Omega, \mu_D$ drift mobility $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right), D = 10nm$ ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 50 rad/s	15
3.7 โครงสร้างวงจรถ่ายแบบเมมริสเตอร์	17
3.8 วงจรถ่ายแบบเมมริสเตอร์	18
3.9 วงจรหารที่ใช้ในวงจรในรูป 3.8	19
3.10 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดยวงจรที่สร้างขึ้น โดยมีค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 20 Hz	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดยวงจรที่สร้างขึ้น โดยมีค่าความถี่อินพุทของสัญญาณ ไซน์เท่ากับ 50 Hz .....	20
3.12 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดยวงจรที่สร้างขึ้น โดยมีค่าความถี่อินพุทของสัญญาณ ไซน์เท่ากับ 100 Hz .....	20
4.1 การทดลองหาปรากฏการณ์ pinched hysteresis .....	21
4.2 ผลของ pinched hysteresis เมื่อป้อนด้วยสัญญาณ ไซน์ขนาด 10Hz .....	22
4.3 ผลสัญญาณตกค่อมที่ขั้วของแมมริสเตอร์เมื่อป้อนด้วยสัญญาณ ไซน์ขนาด 10Hz .....	22
4.4 ผลสัญญาณตกค่อมที่ขั้วของแมมริสเตอร์เมื่อป้อนด้วยสัญญาณ ไซน์ขนาด 20Hz .....	23
4.5 ผลสัญญาณตกค่อมที่ขั้วของแมมริสเตอร์เมื่อป้อนด้วยสัญญาณ ไซน์ขนาด 30Hz .....	23
4.6 ผลสัญญาณตกค่อมที่ขั้วของแมมริสเตอร์เมื่อป้อนด้วยสัญญาณ ไซน์ขนาด 40Hz .....	24
4.7 การทดลองใช้แมมริสเตอร์เป็นตัวกรองความถี่ .....	24
4.8 ผลสัญญาณตกค่อมที่ขั้วของแมมริสเตอร์เมื่อด้วยสัญญาณ ไซน์ขนาด 100Hz โดยการจำลองโดย โปรแกรม Pspice .....	25
4.9 การทดลองใช้แมมริสเตอร์เป็นตัวกรองความถี่ .....	26
4.10 ผลสัญญาณอลวนตกค่อมที่ขั้วของแมมริสเตอร์เมื่อด้วยสัญญาณ ไซน์ขนาด 100Hz โดยการจำลองโดย โปรแกรม Pspice .....	26
4.11 ผลสัญญาณอลวนตกค่อมที่ขั้วของแมมริสเตอร์เมื่อด้วยสัญญาณ ไซน์ขนาด 200Hz โดยการจำลองโดย โปรแกรม Pspice .....	27

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมมริสเตอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอโดย ศาสตราจารย์ Leon Chua ในปี ค.ศ.1971 โดยเสนอเหตุผลของความสัมพันธ์ของปริมาณทางไฟฟ้าและอุปกรณ์พื้นฐานทางไฟฟ้าคือความต้านทาน ความจุ และตัวเหนี่ยวนำ โดยจากค่าความต้านทาน เป็นความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้า ต่อแรงดัน และค่าตัวเหนี่ยวนำเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์แม่เหล็กต่อแรงดันแล้ว Chua ได้พิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ว่า น่าจะมีอุปกรณ์พื้นฐานตัวที่ 4 ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง ประจุไฟฟ้ากับ ฟลักซ์แม่เหล็กซึ่ง Chua เรียกว่า Memristor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ 2 พอร์ท เช่นเดียวกับความต้านทาน ความจุ และตัวเหนี่ยวนำ และฟลักซ์แม่เหล็กเกิดจากผลรวมของแรงดันในช่วงระยะเวลาส่วนประจุไฟฟ้าเกิดจากผลรวมของกระแสในช่วงเวลา ดังนั้น Memristor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กต่อประจุไฟฟ้า จึงนอกจากแสดงค่าเป็นความต้านทานแล้วซึ่งค่าความต้านทานนี้ เกิดจากผลรวมซึ่งเกิดจากเวลาในอดีต จึงเสมือนว่าค่าความต้านทานนี้มีความจำ หรือเป็นความต้านทานรู้จำ จากข้อเสนอของ Chua นี้ซึ่งเป็นเพียงทฤษฎี และไม่ได้ได้รับความสนใจมากนัก เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ของ Chua เอง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2008 กลุ่มนักวิจัยของห้องปฏิบัติการ HP ได้ประกาศการสร้าง Memristor ลงบนอุปกรณ์ขนาดนาโนได้สำเร็จ และเนื่องจาก Memristor มีคุณสมบัติในการเป็นหน่วยความจำ ดังนั้นจึงสามารถเท่ากับว่าเป็นการสร้างหน่วยความจำขนาดใหญ่มากมายน่าสนใจ ซึ่งมีผลในการปฏิวัติวงการคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะวงจรปัญญาประดิษฐ์ และเปลี่ยนทฤษฎีวงจรไฟฟ้าไปในทิศทางใหม่ซึ่ง Leon Chua ซึ่งเป็นศาสตราจารย์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าผู้ค้นและเป็นนักวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้รับการอ้างอิงสูงคนหนึ่งของโลก และเป็นผู้เดียวที่ได้รับรางวัลสูงสุด (Gustav Robert Kirchhoff Award, 2005) จาก IEEE Circuit and System society ได้กล่าวหลังการสร้างตัว Memristor ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานตัวที่ 4 ของวงจรไฟฟ้าได้จริงแล้วว่า “ในอนาคตอันใกล้นี้ตำราวิศวกรรมไฟฟ้าจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงทั้งหมด” รวมทั้งหลังจากค้นพบงานวิจัยที่เผยแพร่ได้เกิดการกระตุ้นให้มีการวิจัยทั้งพื้นฐานและเชิงประยุกต์ขึ้นมาก และตีพิมพ์ในวารสารที่มี Impact factor สูงเช่น Nature, หรือตีพิมพ์ลงในวารสารหลักของ IEEE เช่น *IEEE Spectrum* และ *Proceeding IEEE* รวมทั้งจากการค้นด้วย google มีผลปรากฏมากถึง 600,000 กว่ารายการ

ดังนั้นจากผลกระทบดังกล่าว เพื่อให้นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ของประเทศไทย ได้เข้าใจเรียนรู้ทฤษฎี และคุณสมบัติรวมทั้งการประยุกต์ของ Memristor แบบง่ายๆ เพื่อให้ทันการเปลี่ยนแปลงอันใกล้นี้ ในโครงการวิจัยนี้ ได้เสนอการสร้างตัวเลียนแบบ Memristor และรูปแบบการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองเบื้องต้นแบบต่างๆพร้อมด้วยวงจรสาริตการประยุกต์ใช้งานคือวงจรอลวนซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจโดยทำเป็นต้นแบบชุดทดลอง

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สร้างตัวเลียนแบบ Memristor เพื่อเป็นชุดทดลองการเรียนรู้ โดยจะเริ่มทดลองให้นักศึกษาระดับปริญญาตรีของหลักสูตรวิศวกรรมสารสนเทศ สจล ในปีการศึกษา 2555
2. สร้างองค์ความรู้เรื่อง สร้างตัวเลียนแบบ Memristor ให้กับนักศึกษาระดับปริญญาตรีของคณะวิศวกรรมศาสตร์
3. เผยแพร่เรื่องการทดลองในการเรียนรู้เรื่อง Memristor ให้กับระดับอุดมศึกษาอื่นๆ ในประเทศ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สร้างเครื่องต้นแบบการทดลองขึ้น 1 ชุด โดยประกอบด้วยโมดูลต่อไปนี้คือ

1. ตัวเลียนแบบ Memristor ที่สร้างจากวงจรสมมูลย์ที่ค้นพบ โดยห้องปฏิบัติการ HP
2. วงจรประกอบการเรียนรู้พื้นฐานของ Memristor
3. วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนจากตัวเลียนแบบ Memristor
4. ชุดเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์พร้อม software วิเคราะห์เพื่อแสดงคุณสมบัติและรูปแบบสัญญาณ

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

สร้างเครื่องต้นแบบการทดลองขึ้น 1 ชุด โดยประกอบด้วย

1. สร้างตัวเลียนแบบ Memristor ที่สร้างวงจรสมมูลย์ที่ค้นพบโดยห้องปฏิบัติการ HP จากข้อมูลของวงจรสมมูลย์ PSPICE ที่เสนอใน [13-16] โดยสร้างเป็นอุปกรณ์ 2 พอร์ทำให้มีขนาดเหมาะสมในการใช้ทดลองในวิชาปฏิบัติการระดับ ป.ตรี
2. สร้างวงจรประกอบการเรียนรู้พื้นฐานของ Memristor โดยสร้างวงจรการเรียนรู้พื้นฐานเช่น วงจรกรองความถี่พร้อมทำการทดสอบเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองในวิชาปฏิบัติการ
3. สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนจากตัวเลียนแบบ Memristor ทำการหา topology ของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนจากสร้างตัวเลียนแบบ Memristor ที่สร้างขึ้น โดยหารูปแบบที่เหมาะสมในการสร้างและอธิบายปรากฏการณ์ แก่นศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 ได้ชุดการเรียนรู้เรื่อง memristor สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี เพื่อให้เกิดความเข้าใจในทฤษฎี และสามารถนำองค์ความรู้ไปใช้งานได้
- 2 ได้องค์ความรู้เรื่อง memristor ในมุมมองของวิศวกรรมไฟฟ้า
- 3 เป็นเครื่องต้นแบบการสอนที่สามารถเผยแพร่หรือสร้างจำหน่ายได้ในเชิงพาณิชย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Memristor ได้ถูกเสนอโดย Chua [1] ในปี ค.ศ.1971 โดยได้แสดงสมการคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์พื้นฐานความต้านทาน ความจุ และตัวเหนี่ยวนำและพิสูจน์ว่าจะต้องมีอุปกรณ์พื้นฐานตัวที่ 4 คือ Memristor โดย Chua ได้สร้างวงจรเลียนแบบขึ้น พร้อมกับแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ Memristor ให้เห็นว่ามียุทธศาสตร์เป็น pinched hysteresis loop หรือพิสูจน์ว่าอุปกรณ์สามารถมีคุณสมบัติรู้จำได้ต่อมา Chua ได้นำเสนอว่านอกจากจะสร้าง Memristor ได้แล้วยังสามารถสร้าง Memconductor และ Meminductor ได้เช่นกัน [2] และทิ้งระยะเวลากว่า 30 ปีโดยในต้นศตวรรษที่ 20 ซึ่งเริ่มเข้าสู่ยุคนาโนเทคโนโลยี Chua [3] ได้เสนอวิธีการสร้างอุปกรณ์พื้นฐานบนเทคโนโลยีแบบนาโน และคาดคะเนว่า Memristor สามารถสร้างได้โดยเทคโนโลยีดังกล่าว สำหรับการสร้าง Memristor ทำได้จริงในทางปฏิบัติในปี ค.ศ. 2008 โดยนักวิจัยของบริษัท HEWLETT PACKARD:HP ได้สร้าง Memristor ด้วยขบวนการใช้ Silicon titanium oxide บนเทคโนโลยีแบบนาโนและประกาศสู่สาธารณะชน [4] และ S. Williams หัวหน้าคณะวิจัยได้กล่าวถึงวิธีการที่ค้นพบในวารสาร IEEE spectrum[5] โดย Chua ผู้นำเสนอ memristor คนแรกได้กล่าวถึงการเปลี่ยนครั้งยิ่งใหญ่ว่า [6] “ ในอนาคตอันใกล้นี้ตำราวิศวกรรมไฟฟ้า จำจะต้องเปลี่ยนแปลงทั้งหมด”

สำหรับการสร้าง Memristor ขึ้นนี้ HP มีจุดประสงค์จะใช้ให้เป็นหน่วยความจำขนาดสูงมาก [7] และคาดว่าความจำจะมีขนาด  $100\text{Gb}/\text{cm}^2$  โดยขนาดของ DRAM ตามการทำนายโดยกฎของ Moore แล้วในปี ค.ศ. 2012 จะมีขนาดเพียง  $18\text{Gb}/\text{cm}^2$  และข้อได้เปรียบของ Memristor คือเป็นอุปกรณ์ passive ซึ่งไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแบบ DRAM ดังนั้นจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ทั้งหมด และในงานวิจัย [2] ของ Chua แสดงให้เห็นว่าจุดประสานประสาท(synapses) ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้เกิดการเรียนรู้ของระบบเซลล์ประสาท (neurons) มีคุณสมบัติเป็น Memristive ดังนั้นจากการที่สามารถสร้าง Memristor ลงบนเทคโนโลยีขนาดนาโนซึ่งมีขนาดความจุสูง จึงสามารถนำเอา Memristor ไปเป็นส่วนประกอบในการสร้างสมองเทียม[8] และจากการสร้างเป็น crossbar array [7] ของหน่วยความจำ ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนอุปกรณ์ Program Logic Array:PLA จึงสามารถสร้าง PLA ที่มีความจุสูงๆ บนนาโนเทคโนโลยีจาก Memristor ได้เช่นกัน [9-10] และการที่ Memristor มีคุณสมบัติควบคุมได้อย่างแม่นยำจึงมีแนวโน้มที่จะประยุกต์ในงานวงจรอนาล็อกได้อีกด้วย[11-12]

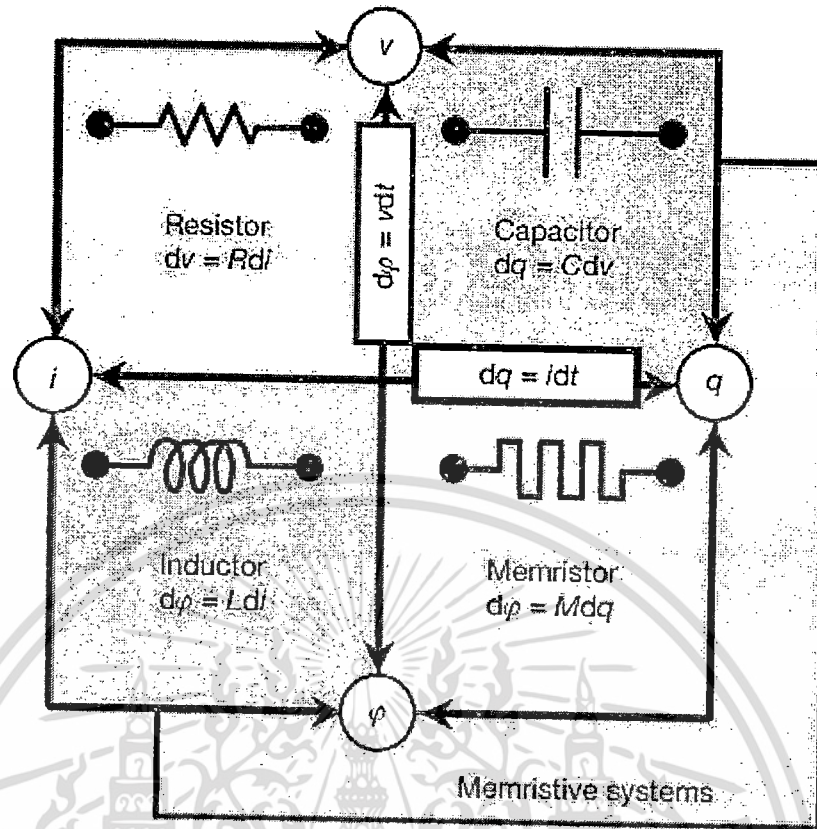
หลังจากกลุ่มนักวิจัยจาก HP ได้ประกาศการค้นพบ Memristor ในระดับนาโนเทคโนโลยีแล้ว ในงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้านั้น ได้มีผู้แสดงแบบจำลองทางไฟฟ้าของ Memristor ของบริษัท HP โดย [13-16] โดยในบทความ [16] นอกจากแบบจำลองทางไฟฟ้าแล้วยังแสดงตัวอย่างการจำลองวงจร Chua ที่ใช้ memristor อีกด้วย สำหรับการสร้างตัวเลียนแบบ Memristor นั้น ในงานวิจัยแรกของ Chua เอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[1] ได้แสดงการสร้าง Memristor โดยใช้การแปลงความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นผ่านวงจร Memristor ซึ่งแบบจำลองวงจรทางไฟฟ้าได้แสดงในบทความวิจัย[17] ซึ่งวงจรของ Chua ที่นำเสนอสร้างค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากประกอบด้วยทั้ง Op-Amp และ Transistor โดยหลังจาก Memristor ได้รับความสนใจอย่างจริงจัง . ในบทความของ[18] ซึ่งเป็นนักศึกษาปริญญาเอกของ Chua ได้ปรับปรุงวงจรเลียนแบบ Memristor พร้อมได้ต่อรวมกับความต้านทานและความจุเพื่อให้เห็นว่า Memristor สามารถใช้แทน Chua Diode ได้แต่การใช้งานยังอยู่ในขนาดความถี่ต่ำ สำหรับเทคนิควงจรทางดิจิทัลนั้นแสดงในงานวิจัย [11] จากนำความต้านทานปรับค่าได้ทางดิจิทัลต่อร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการควบคุมสถานะความต้านทาน เมื่อรับอินพุตเข้ามาประมวลผลโดยนักวิจัยขณะนี้ได้สร้างตัวเลียนแบบ ได้ทำการเลียนแบบ Memcapacitor และ Meminductor[19] ด้วย แต่การสร้างด้วยวิธีการดิจิทัลมีข้อจำกัดที่ขนาดของความถี่ที่ใช้งาน ต่ำมาก จึงเหมาะกับการจำลองการทำงานในระบบชีวภาพเท่านั้น[20]

## 2.2 ทฤษฎีแมมริสเตอร์

จากแนวความคิดของ Chua ที่ได้ทำนายว่ามีอุปกรณ์แมมริสเตอร์ในปี คศ 1970 โดยคิดจากความสัมพันธ์จากตัวแปรทางไฟฟ้าคือกระแส แรงดันไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าและ ฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งจะทำให้เกิดความสัมพันธ์ได้ 6 รูปแบบและน่าจะมีอุปกรณ์สองพอร์ตรองรับความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ 4 ชนิด แต่ในทางพื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้ามีอุปกรณ์ดังกล่าวอยู่เพียง 3 ชนิดคือ ความต้านทานซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันและกระแส  $R = \frac{dv}{di}$  ตัวเก็บประจุซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างประจุไฟฟ้าและแรงดัน  $C = \frac{dQ}{dv}$  และค่าความเหนี่ยวนำซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลง ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแส  $L = \frac{d\Phi}{di}$  ดังนั้น Chua จึงทำนายว่าจะมีอุปกรณ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กต่อประจุไฟฟ้าโดยเรียกว่า แมมริสเตอร์(memeristor)



ภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าและอุปกรณ์สองพอร์ต

### นิยาม

จากที่อุปกรณ์สองพอร์ตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กต่อประจุไฟฟ้าแสดงสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่ 2 โดย Chua นิยามว่าอุปกรณ์เป็นค่าความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับประจุที่ผ่าน โดยค่าของ แมมริสเตอร์ (memristance) อธิบายได้

$$M(q) = \frac{d\phi}{dq} \quad (2.1)$$

โดยกฎของ Faraday แสดงได้

$$M(q) = \frac{d\phi / dt}{dq / dt} = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

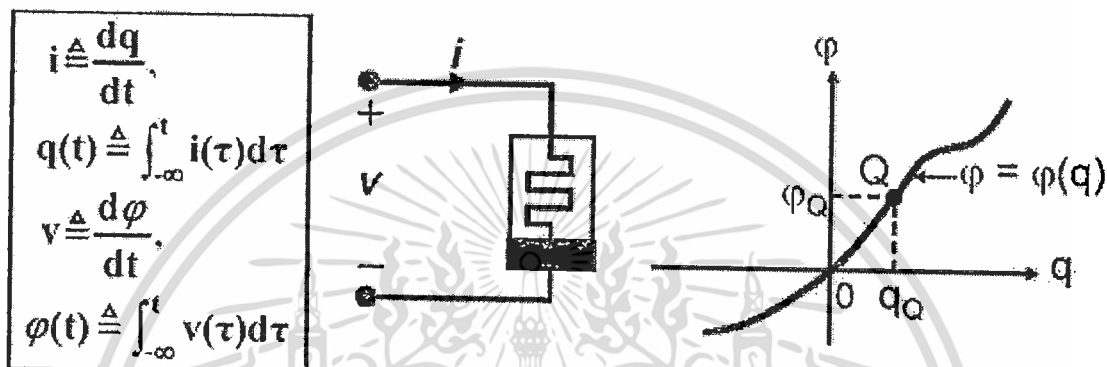
หรือเขียนได้ว่า

$$V = M(q)i = R(x)i \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

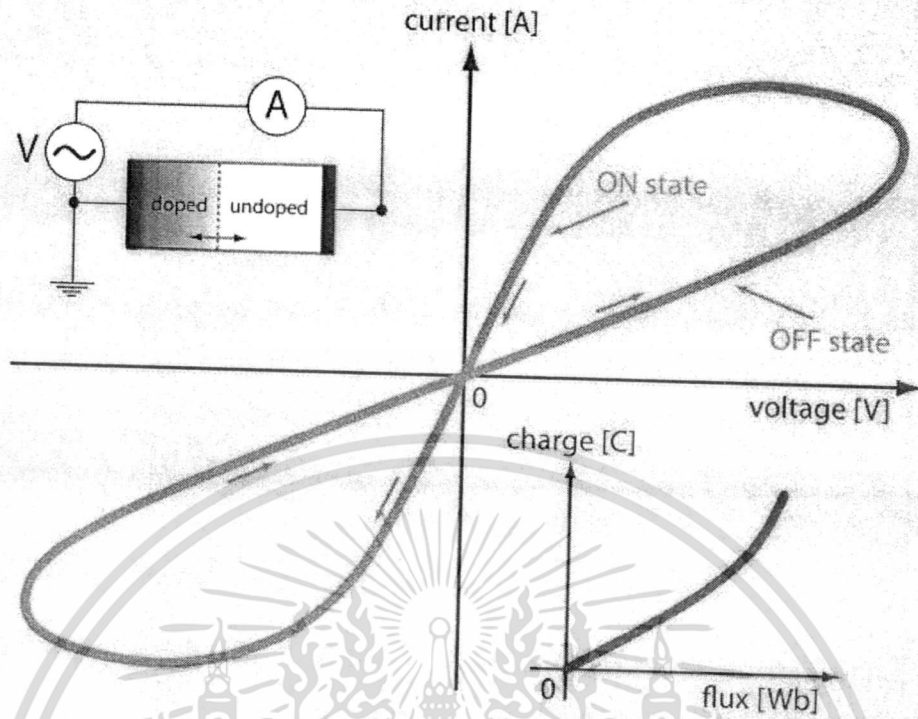
จาก (2.1) ค่าของแมมริสเตอร์(memristance) จะขึ้นอยู่กับอัตราการประจุ ดังนั้น

$$\frac{d\Phi}{dt} = M(q) \frac{dq}{dt} \Rightarrow V = M \left( \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \right) i(t) \quad (2.4)$$



ภาพที่ 2.2 สัญลักษณ์ของแมมริสเตอร์

จาก  $q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$  หมายถึงการประจุในแมมริสเตอร์เป็นการไหลผ่านอุปกรณ์มีใจเป็นการเก็บแบบตัวเก็บประจุ ซึ่งหมายความว่าแมมริสเตอร์ไม่ใช่เป็นอุปกรณ์เก็บค่าพลังงานและไม่ใช้ตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น แต่ตัวต้านทานที่สามารถมีประจุเป็นตัวแปร ซึ่งทำให้ค่า memristance จะขึ้นอยู่กับค่าก่อนหน้าหรือแสดงได้ว่าอุปกรณ์มีลักษณะเป็นหน่วยความจำ โดยพฤติกรรมการเป็นหน่วยความจำสามารถแสดงได้โดยรูปของ pinched hysteresis เมื่อตัวแมมริสเตอร์ถูกป้อนด้วยสัญญาณไซน์โดยจากรูปที่ 2.3 ลูกศรแสดงการเพิ่มขึ้นและลดลงของกระแส โดยขนาดของรูป pinched hysteresis จะแคบลงเมื่อขนาดของความถี่สัญญาณไซน์เพิ่มขึ้น โดยถ้าหากขนาดของความถี่มีขนาดเท่ากับอนันต์แล้วแมมริสเตอร์จะแสดงตัวเป็นตัวต้านทานธรรมดาและจาก pinched hysteresis ที่แสดงสามารถประมาณค่าความต้านทานออกเป็นสองช่วงระหว่างทิศที่แสดงด้วยลูกศรข้างขึ้นคือ ปิด(OFF)และทิศที่แสดงด้วยลูกศรขาลงคือเปิด(ON)หรือกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงจาก ปิดเป็นเปิดได้เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันและจะคงค่านี้ไว้เสมอ



ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะของลูปของ pinched hysteresis

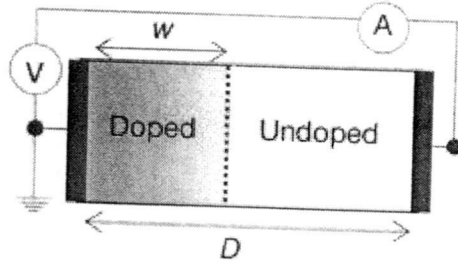
### แมมริสเตอร์ที่ค้นพบโดยนักวิจัย HP

จากคุณสมบัติของแมมริสเตอร์ R.Stanley William หัวหน้านักวิจัยของบริษัท HEWLETT PACKARD:HP ได้ค้นพบการสร้างแมมริสเตอร์ขึ้น โดยจากคุณสมบัติของ pinched hysteresis โดยการสร้างแมมริสเตอร์ด้วยการ fabricated สาร  $TiO_2$  ลงบนฟิล์มบางขนาดนาโนโดย สาร  $TiO_2$  แบ่งออกเป็นสองชั้นประกบด้วยตัวนำ platinum ที่จุดสัมผัสหนึ่งทำการโคบ  $TiO_2$  ด้วยสารที่เป็นค่าความนำสูง (oxygen vacancies) โดยโครงสร้างแสดงได้ในรูปที่ 2.4 จากโครงสร้างแสดงสมการของค่าแมมริสเตอร์ได้

$$M(q) = R_{off} \left( 1 - \frac{\mu_D R_{on} q(t)}{D^2} \right) \quad (2.5)$$

โดยโดย  $\mu_D$  เป็นค่าเฉลี่ยของ drift mobility  $\left( \frac{cm^2}{sV} \right)$  และ  $D^2$  เป็นความหนาของ titanium oxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Undoped:



Doped:



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเมมริสเตอร์ที่สร้างโดย บริษัท HP

เราสามารถเขียน(2.5) อยู่ในรูปง่ายคือ

$$M(q) = \frac{V}{i(t)} = \left( 1 - \frac{R_{ON}}{\beta} q(t) \right) \quad (2.6)$$

โดย  $\beta = \frac{D^2}{\mu}$  ( $sV : Wb$ ) ทิศทางของฟิล์มแม่เหล็ก ถ้าให้  $x$  เป็นระยะของการโคบแล้วค่าเมมริสเตอร์สามารถจำลองได้ดังรูป 2.4 จะมีค่าคือ

$$M(x) = R_{ON} \frac{x}{D} + R_{OFF} \left( 1 - \frac{x}{D} \right) \quad (2.7)$$

โดยค่าเมมริสเตอร์จะแสดงความค่าตัวทานทานที่แปรค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การจำลองเมมริสเตอร์

ในงานวิจัยนี้เราจะเริ่มจำลองพฤติกรรมของเมมริสเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองที่สามารถสร้างโดยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์

##### 3.1 การจำลองโดยคณิตศาสตร์

เพื่อให้การสร้างตัวเลียนแบบเมมริสเตอร์เพื่อการเรียนรู้ ในหัวข้อนี้แสดงแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเมมริสเตอร์โดย จากค่าความกว้างของการ โดบค่า oxygen สามารถแสดงค่าความเร็วของการ drift ที่แปรผันตรงกับค่าสนามไฟฟ้าได้คือ

$$\frac{1}{D} \frac{dw(t)}{dt} = \frac{R_{ON}}{\beta} i(t) \quad (3.1)$$

โดย  $w$  เป็นสถานะควาต้านทาน ON และ OFF ทำการอินทิเกรตสมการ (3.1) จะได้

$$\frac{w(t)}{D} = \frac{w(t_0)}{D} + \frac{R_{ON}}{\beta} q(t) \quad (3.2)$$

โดย  $w(t)$  เป็นระยะเริ่มต้นของ  $w$  ค่าความเร็วของการ drift เขียนได้

$$v_D = \frac{dw(t)}{dt} \quad (3.3)$$

จากสนามไฟฟ้า  $D = v_D(t)$  ในกรณีนี้  $Q_D = i * t$  เป็นข้อกำหนดที่การใช้เคลื่อนที่ประจุจากระยะ  $w(t_0)$  ไป  $w(t_D)$  ทำให้  $Q_D = \frac{\beta}{R_{ON}}$  ดังนั้น

$$\frac{w(t)}{D} = \frac{w(t_0)}{D} + \frac{q(t)}{Q_D} \quad (3.4)$$

ถ้า  $x(t) = \frac{w(t)}{D}$  ดังนั้นเราเขียนสมการ (3.4) ใหม่ได้

$$x(t) = x(t_0) + \frac{q(t)}{Q_D} \quad (3.5)$$

ถ้า  $\frac{q(t)}{Q_D}$  เป็นการแสดงประจุไหลผ่านเพื่อให้เกิดสภาพการนำแล้วจากแมมริสเตอร์ที่ค้นพบโดยนักวิจัย HP[4] เราจะได้ว่า

$$v(t) = (R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} (1 - \frac{w(t)}{D})) i(t) \quad (3.6)$$

แทนค่า  $x(t) = \frac{w(t)}{D}$  ใน(3.5) จะได้

$$v(t) = (R_{ON} x(t) + R_{OFF} (1 - x(t))) i(t) \quad (3.7)$$

ถ้าสมมติฐานของค่าประจุเริ่มต้น  $q(t) = 0$  และ  $w(t) = w(t_0) \neq 0$  แล้วค่าแมมริสเตอร์ที่เวลาเริ่มต้นคือ

$$M_0 = (R_{ON} x(t_0) + r(1 - x(t))) \quad (3.8)$$

โดย  $r = \frac{R_{OFF}}{R_{ON}}$  ดังนั้นสามารถอนุมานค่าแมมริสเตอร์ในเวลาใดๆ ได้คือ

$$M_q = M_0 x(t_0) + \Delta R \left( \frac{q(t)}{Q_D} \right) \quad (3.9)$$

โดย  $\Delta R = R_{OFF} - R_{ON}$  และเมื่อ  $R_{OFF} \gg R_{ON}$  แล้วจะได้  $M_0 = R_{OFF}$  แทนค่าสมการ (3.9) ลง

ใน  $v(t) = M(q) i(t)$  เมื่อ  $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$  จะได้ว่า

$$v(t) = \left( M_0 - \Delta \left( \frac{q(t)}{Q_D} \right) \right) \frac{dq(t)}{dt} \quad (3.10)$$

จาก  $M(q) = \frac{d\Phi(q)}{dt}$  ดังนั้นผลเฉลยของการประจุคือ

$$q(t) = \frac{Q_D M_0}{\Delta R} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{2\Delta R}{Q_D M_0^2} \varphi(t)} \right) \quad (3.11)$$

ถ้า  $\Delta R = M_0 \approx R_{OFF}$  แล้วคำตอบที่เป็นไปได้คือ

$$q(t) = Q_D \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{2}{Q_D R_{OFF}} \varphi(t)} \right) \quad (3.12)$$

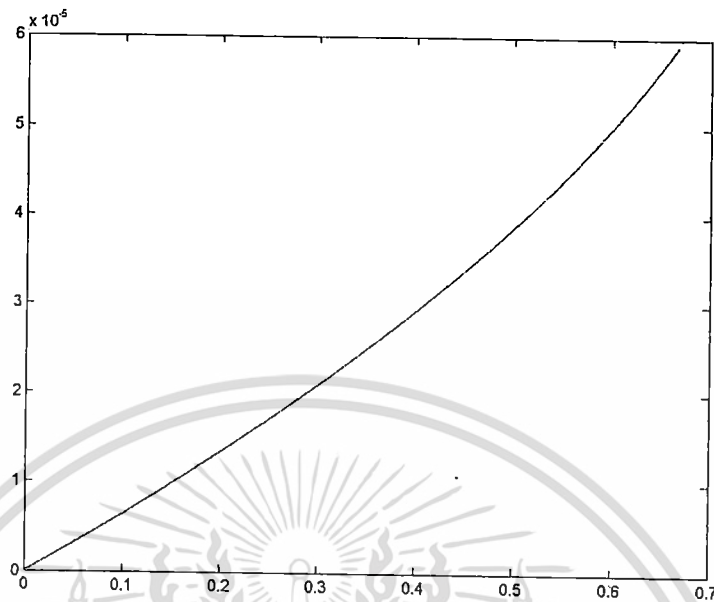
จากสมการ (3.5) ถ้า  $Q_D = \frac{D^2}{\mu_D R_{ON}}$  ค่าสเททของการเป็นแมมริสเตอร์คือ

$$x(t) = 1 - \left( \sqrt{1 - \frac{2\mu_D}{rD^2} \varphi(t)} \right) \quad (3.13)$$

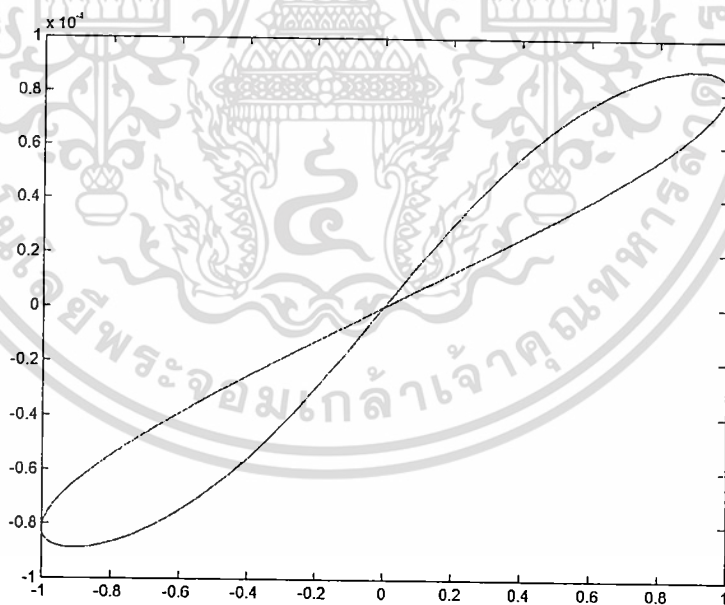
ดังนั้นสมการแสดงความสัมพันธ์กระแสและแรงดันคือ

$$i(t) = \frac{v(t)}{R_{OFF} \left( \sqrt{1 - \frac{2\mu_D}{rD^2} \varphi(t)} \right)} \quad (3.14)$$

จากสมการ (3.14) แสดงค่าแมมริสเตอร์จะแปรผกผันในเทอมของรากกับค่าความหนาของ  $\text{TiO}_2$  ความสัมพันธ์

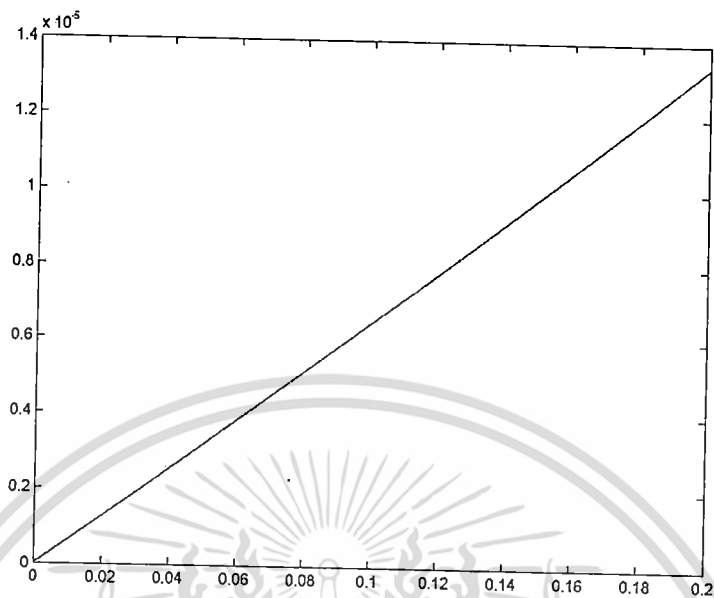


ภาพที่ 3.1 ผลการจำลองของค่าประจุและฟลักซ์แม่เหล็กโดยมีค่า  $R_{ON} = 100\Omega$ ,  $R_{OFF} = 1600\Omega$ ,  $\mu_D$  drift mobility  $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right)$ ,  $D = 10nm$  ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 3 rad/s

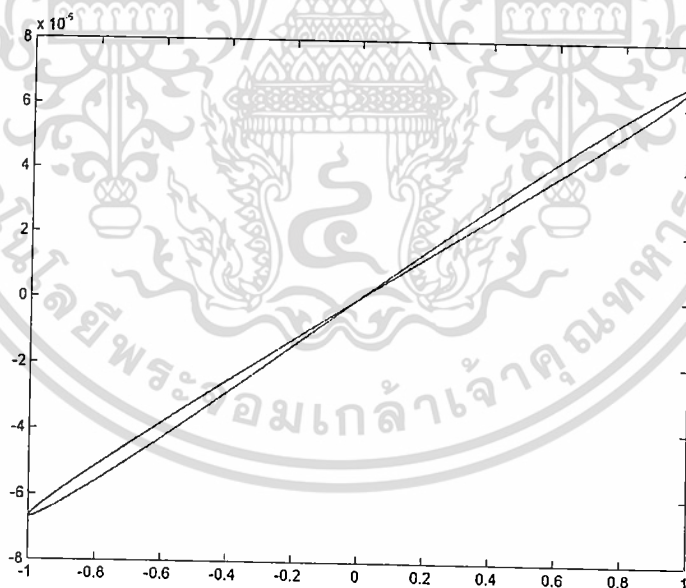


ภาพที่ 3.2 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดย มีค่า  $R_{ON} = 100\Omega$ ,  $R_{OFF} = 1600\Omega$ ,  $\mu_D$  drift mobility  $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right)$ ,  $D = 10nm$  ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 3 rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

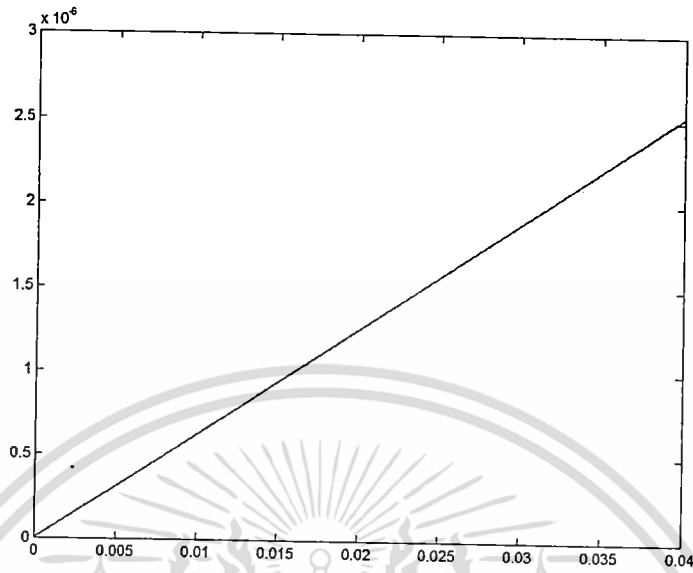


ภาพที่ 3.3 ผลการจำลองของค่าประจุและฟลักซ์แม่เหล็กโดยมีค่า  $R_{ON} = 100\Omega, R_{OFF} = 1600\Omega, \mu_D$  drift mobility  $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right), D = 10nm$  ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณ ไซน์เท่ากับ 10 rad/s

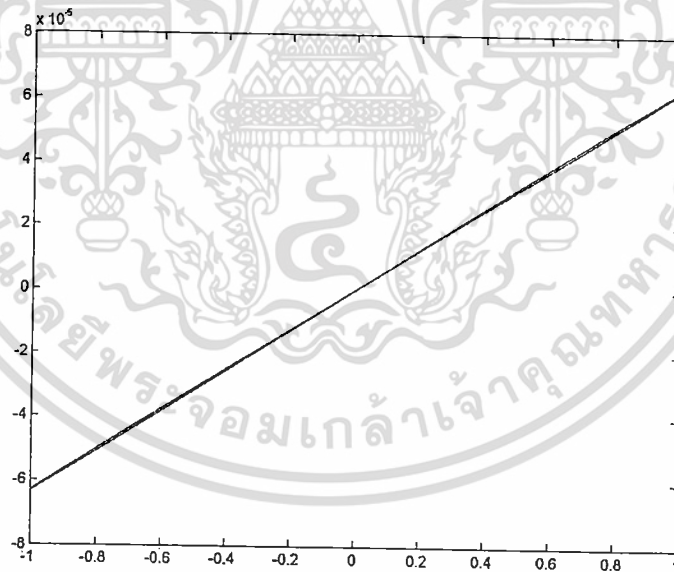


ภาพที่ 3.4 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดย มีค่า  $R_{ON} = 100\Omega, R_{OFF} = 1600\Omega, \mu_D$  drift mobility  $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right), D = 10nm$  ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณ ไซน์เท่ากับ 10 rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 แสดงผลการจำลองของค่าประจุและฟลักซ์แม่เหล็กโดยมีค่า  $R_{ON} = 100\Omega$ ,  $R_{OFF} = 1600\Omega$ ,  $\mu_D$  drift mobility  $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right)$ ,  $D = 10nm$  ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 50 rad/s



ภาพที่ 3.6 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดยมีค่า  $R_{ON} = 100\Omega$ ,  $R_{OFF} = 1600\Omega$ ,  $\mu_D$  drift mobility  $\left(1e^{-14} \frac{cm^2}{sV}\right)$ ,  $D = 10nm$  ค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 50 rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การเลียนแบบแอมพลิฟายเออร์โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในหัวข้อนี้เป็นการการสร้างตัวเลียนแบบแอมพลิฟายเออร์ โดยจากสมการ(3.6) แสดงความสัมพันธ์ของค่าแอมพลิฟายเออร์ ที่เกิดจากแรงดัน กระแสและประจุของแอมพลิฟายเออร์จาก

$$w(t) = \mu_D \frac{R_{ON}}{D} q(t) \quad (3.15)$$

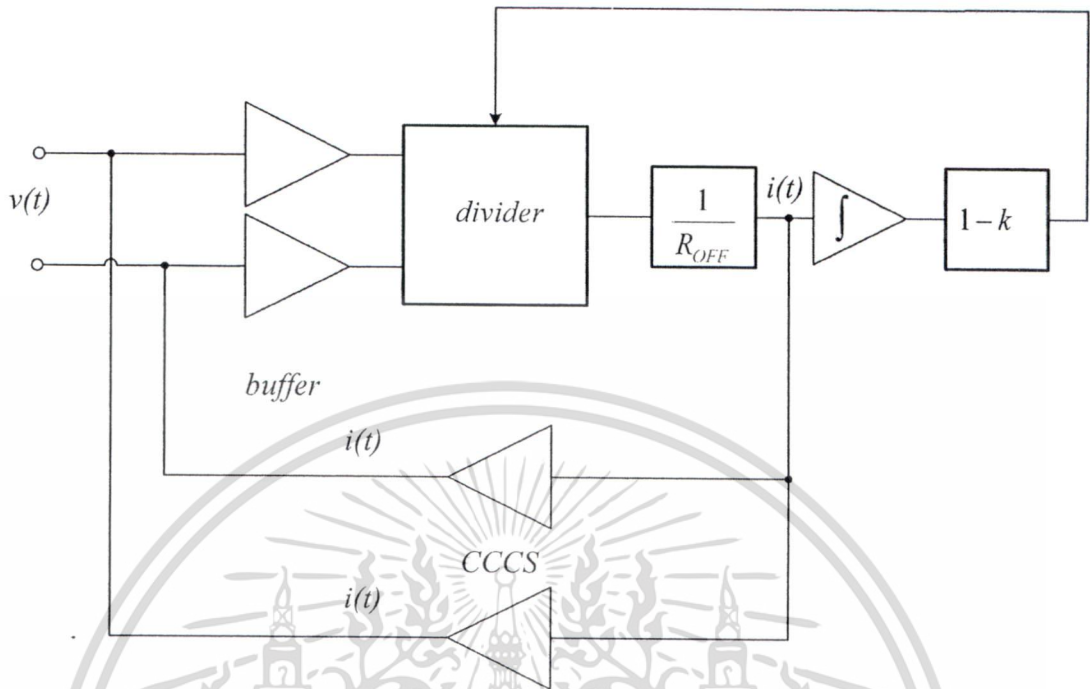
ดังนั้นค่าแอมพลิฟายเออร์ในฟังก์ชันของการประจุสามารถแสดงได้คือ

$$M(q) = R_{OFF} \left( 1 - \frac{\mu_D R_{ON}}{D^2} q(t) \right) \quad (3.16)$$

ดังนั้นเราสามารถแสดงค่ากระแสที่ไหลผ่านแอมพลิฟายเออร์ได้

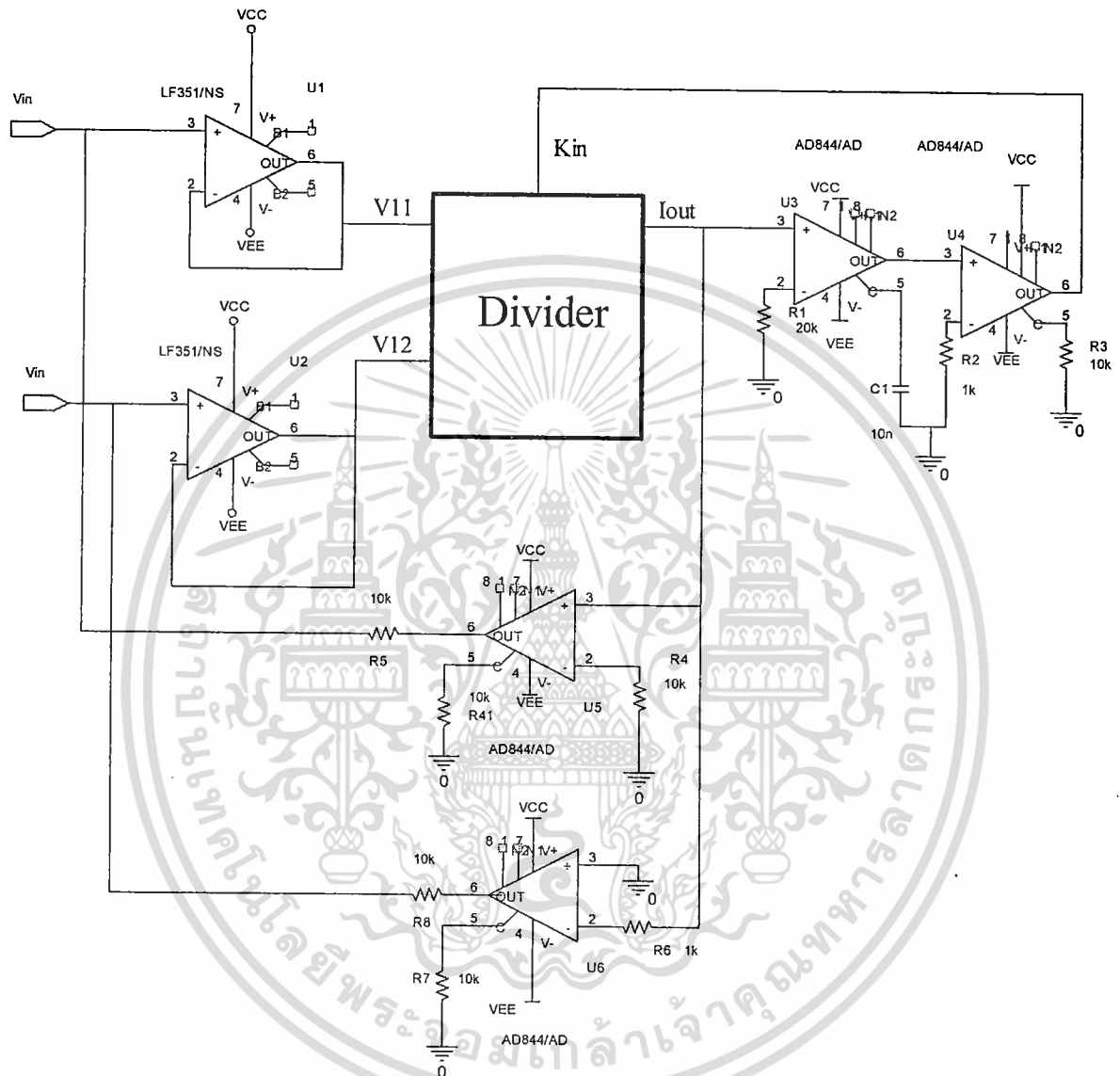
$$i(t) = \frac{v(t)}{R_{OFF} \left( 1 - \frac{\mu_D R_{ON}}{D^2} q(t) \right)} \quad (3.17)$$

จากสมการสามารถแสดงโครงสร้างของตัวเลียนแบบได้ดังรูปที่ 3.7 โดยจากบล็อกไดอะแกรมกระแสที่ไหลผ่านตัวเลียนแบบเกิดจากค่า  $v(t)$  แรงดันตกคร่อมตัวเลียนแบบด้วย ค่าแอมพลิฟายเออร์โดยค่าประจุเกิดจากการอินทิเกรต กระแสเอาพุตของวงจรหาร ค่า  $\mu_D \frac{R_{ON}}{D^2}$  จะกำหนดให้เท่ากับ  $k$



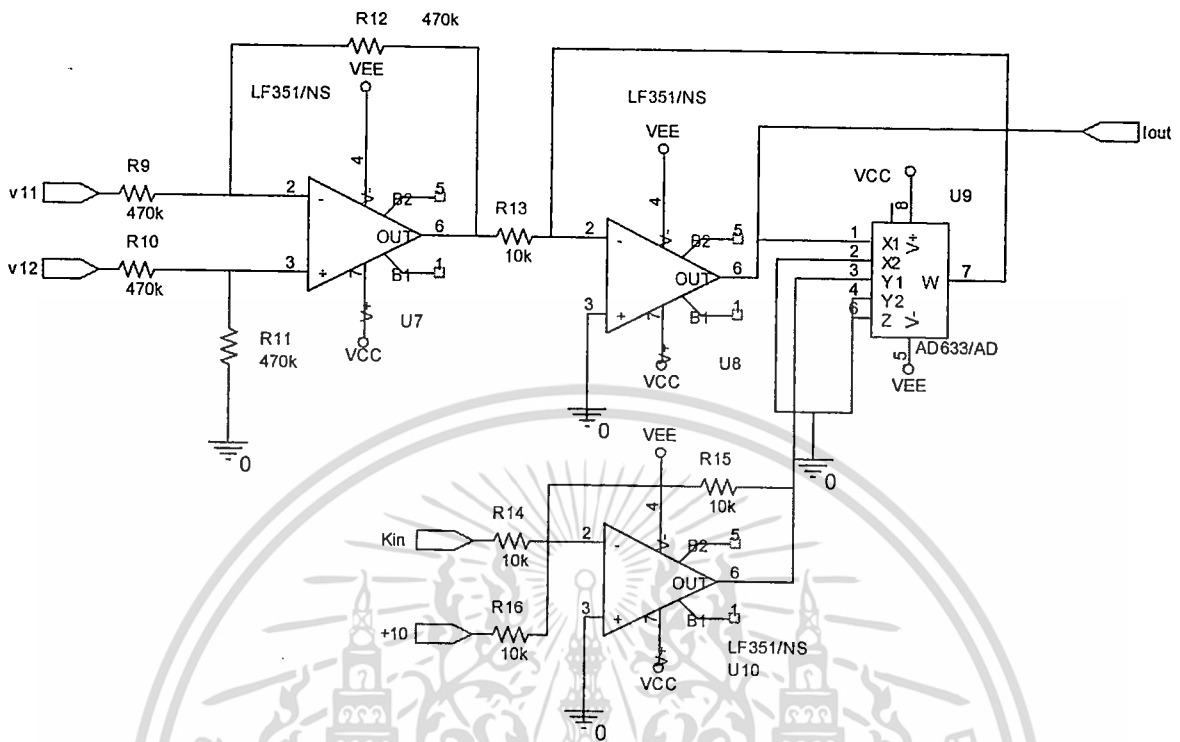
ภาพที่ 3.7 โครงสร้างวงจรเลียนแบบเมมริสเตอร์

สำหรับการสร้างวงจรแสดงได้ในรูป 3.8 และโดยในรูป 3.9 เป็นรายละเอียดของวงจรหาร โดยจากรูปที่ แสดงวงจรเลียนแบบตัวเมมริสเตอร์ที่ประกอบด้วยวงจรรวม U1,U2 (LF 351) ทำหน้าที่บัฟเฟอร์ วงจรรวม U3 AD844 ทำหน้าที่อินทรีเกรทกระแสให้เป็นค่าประจุ วงจรรวม U4 AD844 สร้างค่าคงที่K และ วงจรรวมU5,6 AD844 เป็นวงจรความถี่กระแสด้วยกระแส (current control current source) เพื่อให้กระแสที่เทอร์มินัลเปลี่ยนแปลงตามค่าเมมริสเตอร์ สำหรับวงจรรวม U9 AD633 โดยมีวงจรรวม U1,U2 (LF 351) ทำหน้าที่สร้างแรงดันแตกต่างและบวกค่าคงที่ตามลำดับ

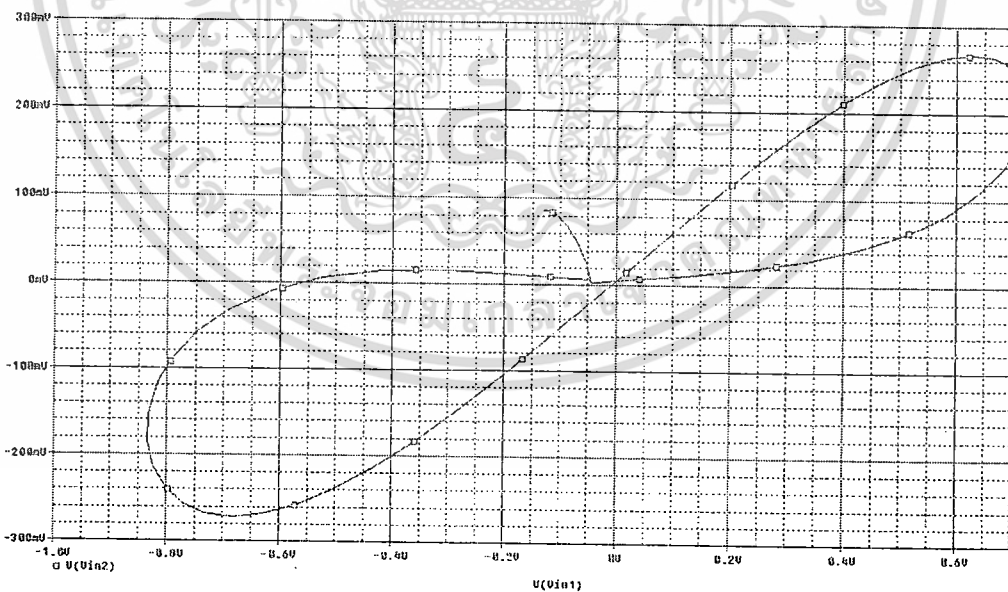


ภาพที่ 3.8 วงจรเลียนแบบแมมริสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

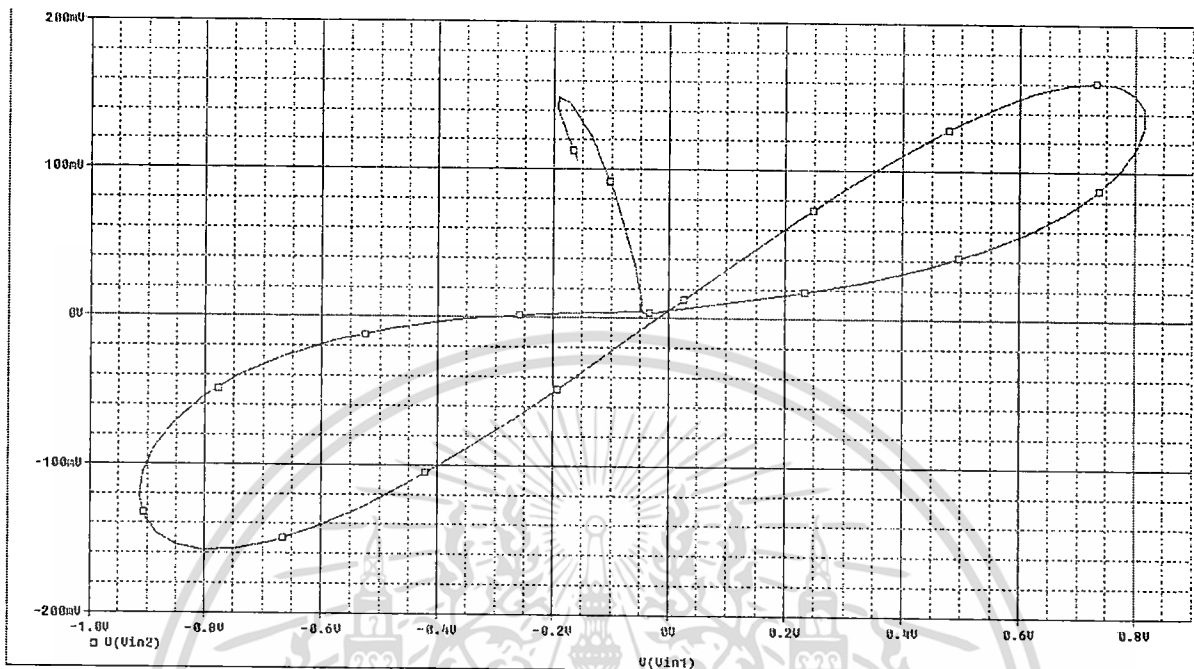


ภาพที่ 3.9 วงจรที่ใช้ในวงจรในรูป 3.8

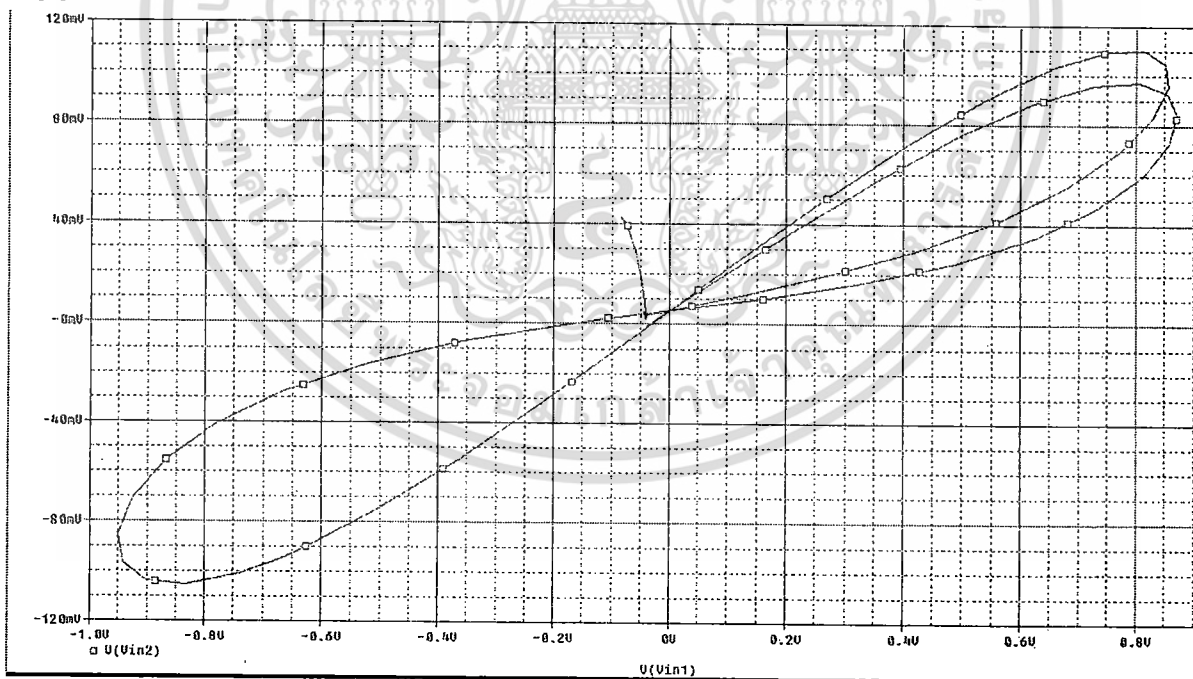


ภาพที่ 3.10 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดยวงจรที่สร้างขึ้น โดยมีค่าความถี่อินพุทของสัญญาณไซน์เท่ากับ 20 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.11 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดยวงจรที่สร้างขึ้น โดยมีค่าความถี่อินพุตของ สัญญาณไซน์เท่ากับ 50 Hz



ภาพที่ 3.12 ผลการจำลองปรากฏการณ์ pinched hysteresis โดยวงจรที่สร้างขึ้น โดยมีค่าความถี่อินพุตของ สัญญาณไซน์เท่ากับ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

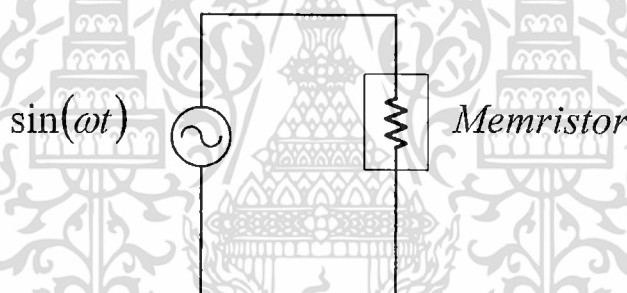
## บทที่ 4

### ผลการทดลองตัวเลียนแบบแมมริสเตอร์

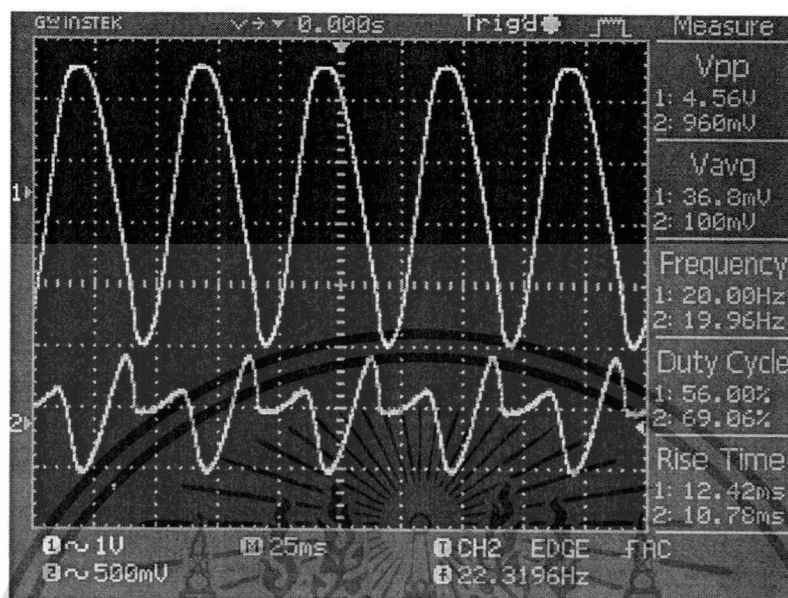
ในบทนี้แสดงผลการทดลองของตัวแมมริสเตอร์ที่สร้างขึ้น โดยแสดงผลของ *pinched hysteresis* ต่อความถี่ต่างๆ แสดงผลของการใช้แมมริสเตอร์เป็นวงจรกรองความถี่ แสดงผลของการเป็นสภาวะอลวนเมื่อใช้แมมริสเตอร์ต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

#### 4.1 การทดลองแสดงผลของ *pinched hysteresis*

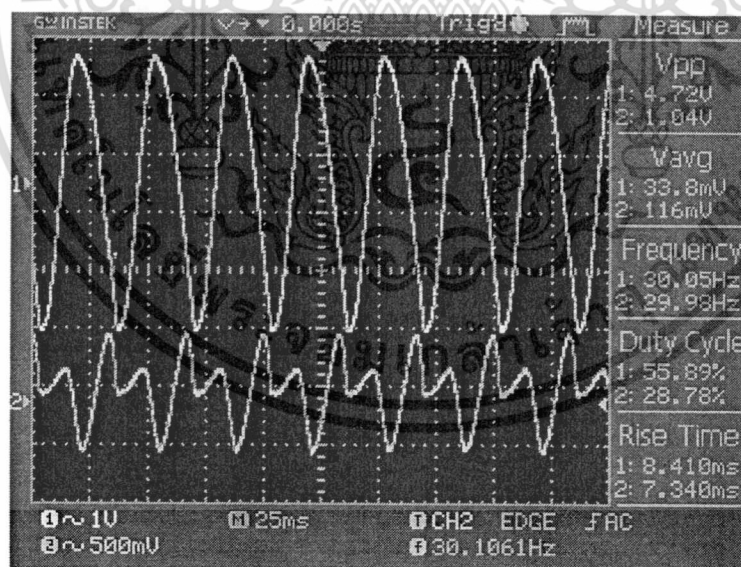
การทดลองหาปรากฏการณ์ *pinched hysteresis* แสดงการต่อวงจรได้ดังรูป 4.1 โดยจากรูปทำการทดลองโดยป้อนสัญญาณไซน์แล้วใช้ออสซิลอสโคปวัดที่ขั้วของแมมริสเตอร์



ภาพที่ 4.1 การทดลองหาปรากฏการณ์ *pinched hysteresis*

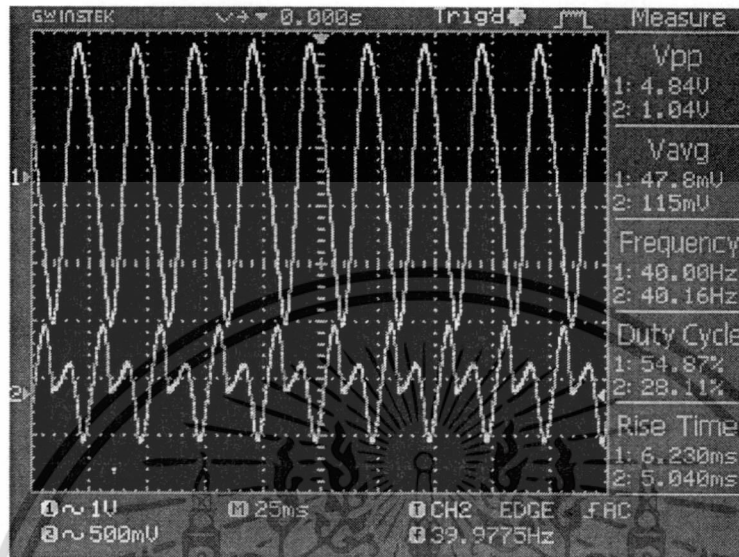


ภาพที่ 4.4 ผลสัญญาณตกค่อมที่ขาของแมมริสเตอร์เมื่อป้อนด้วยสัญญาณไซน์ขนาด 20Hz



ภาพที่ 4.5 ผลสัญญาณตกค่อมที่ขาของแมมริสเตอร์เมื่อป้อนด้วยสัญญาณไซน์ขนาด 30Hz

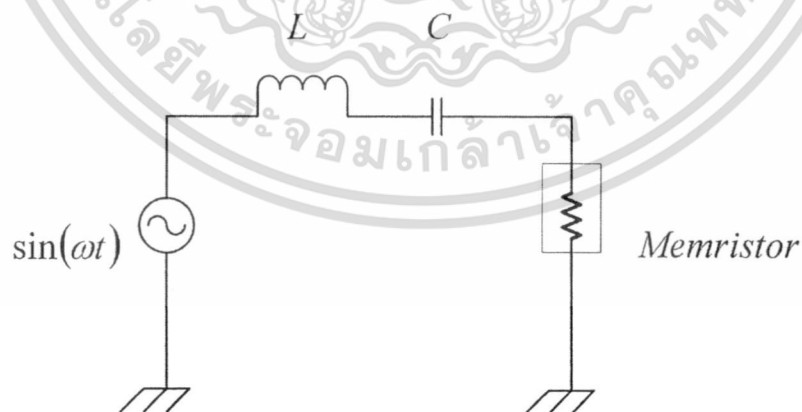
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 ผลสัญญาณตกคร่อมที่ขั้วของแมมริสเตอร์เมื่อป้อนด้วยสัญญาณไซน์ขนาด 40Hz

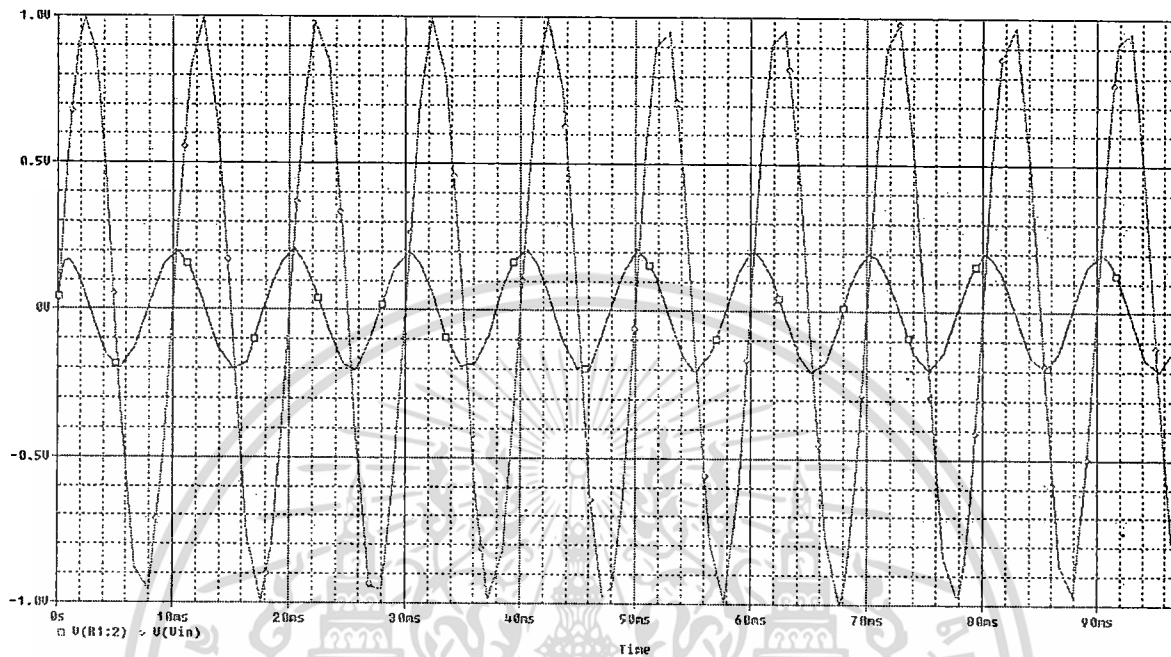
#### 4.2 การทดลองใช้แมมริสเตอร์เป็นตัวกรองความถี่

สำหรับการใช้แมมริสเตอร์เป็นวงจรกรองความถี่ต่อวงจรแสดงได้ดังรูป 4.7 การทดลองป้อนความถี่ขนาด 100Hz โดยค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บมีขนาด 18 mH และ 10 nF ตามลำดับ



ภาพที่ 4.7 การทดลองใช้แมมริสเตอร์เป็นตัวกรองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

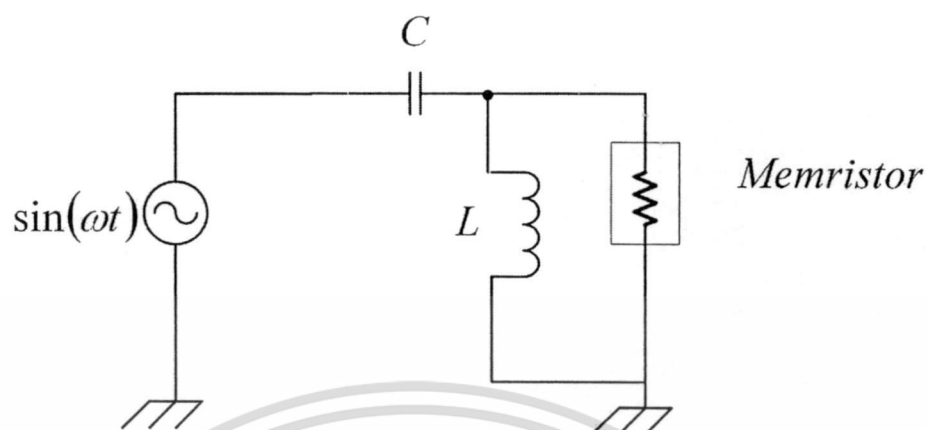


ภาพที่ 4.8 ผลสัญญาณตกคร่อมที่ขั้วของแมมริสเตอร์เมื่อด้วยสัญญาณ ไซน์ขนาด 100Hz โดยการจำลองโดยโปรแกรม Pspice

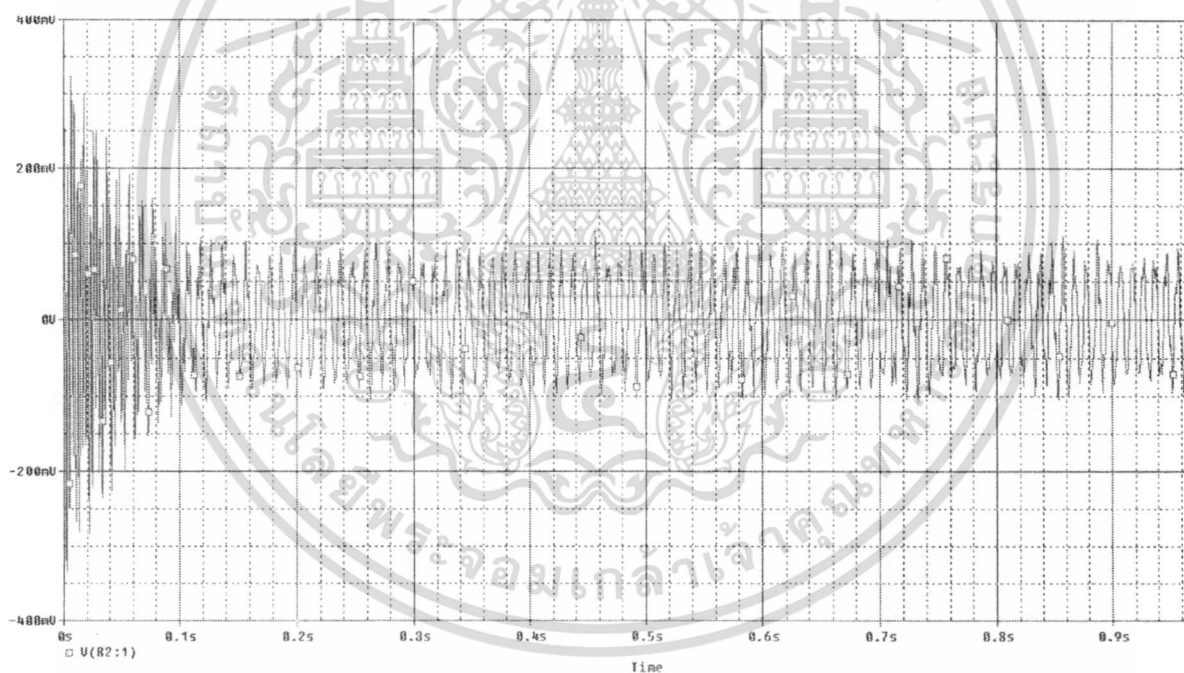
#### 4.3 การทดลองใช้แมมริสเตอร์เป็นวงจรสร้างสัญญาณอลวน

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการใช้แมมริสเตอร์ต่อร่วมกับอุปกรณ์พื้นฐานคือตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ และขับด้วยสัญญาณ ไซน์เป็นวงจรอลวนแบบ Nonautonomous

วงจรแสดงได้ดังรูป 4.9 การทดลองป้อนความถี่ขนาด 100Hz และ 200Hz โดยค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บมีขนาด 18 mH และ 10 uF ตามลำดับ

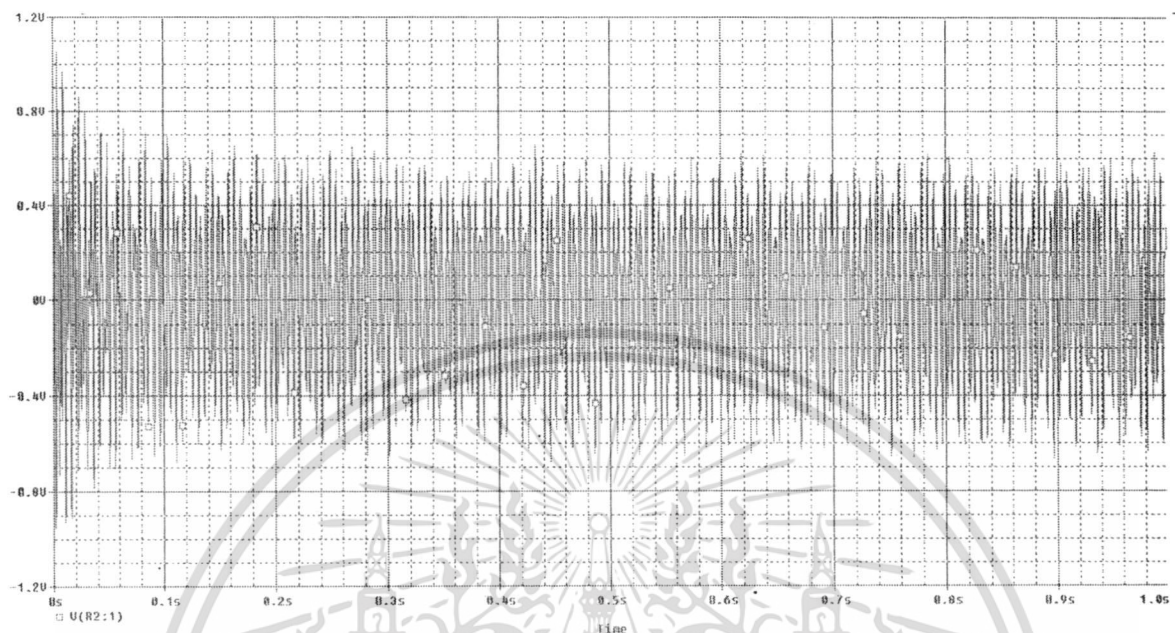


ภาพที่ 4.9 การทดลองใช้เมมริสเตอร์เป็นวงจรออสซิลเลชันแบบ Non-autonomous



ภาพที่ 4.10 ผลสัญญาณออสซิลเลชันที่ขั้วของเมมริสเตอร์เมื่อด้วยสัญญาณไซน์ขนาด 100Hz โดยการจำลองโดยโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 ผลสัญญาณออสซิลเลชันที่หัวของแมมริสเตอร์เมื่อด้วยสัญญาณไซน์ขนาด 200Hz โดยการจำลองโดยโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงการสร้างวงจรเลียนแบบเมมริสเตอร์ที่ค้นพบ โดย Hewlet packcard โดยการสร้างจากอุปกรณ์ที่ทำได้ตามท้องตลาด ผลของการจำลองมีลักษณะที่ได้ตามทฤษฎีวงจรที่สร้างขึ้น สามารถเป็นต้นแบบสำหรับการทดลองให้กับวิชาปฏิบัติการณ์สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการสร้างตัวเลียนแบบเมมริสเตอร์ที่พัฒนาต่อไปสามารถกระทำได้โดยให้มีขนาดเล็กลงหรือกินกำลังไฟน้อยลงโดยใช้อุปกรณ์พวก CMOS และรวมการสร้างการทดลองอื่นๆเพื่อความคู่กับตัวเลียนแบบเมมริสเตอร์ด้วย



## เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Chua "Memristor, "The missing circuit element," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. 18, pp.507-519, 1971.
- [2] L. Chua and S. Kang, "Memristive devices and systems," *Proc. IEEE*, vol. 64, pp.209-223,1976.
- [3] L. Chua, "Nonlinear circuit foundations for nanodevices, I The four element torus," *Proc IEEE*, vol. 91, no. 11, pp. 1830-1859, 2003.
- [4] D. B. Strukov , G. S. Snider , D. R. Stewart and S. R. Williams, "The missing memristor found," *Nature*, vol. 453, pp.80-8, 2008.
- [5] R. S. Williams, "How we found the missing memristor," *IEEE Spectrum*, vol. 45, no.12, pp. 28-35, December 2008.
- [6] "Missing link' memristor created" Rewrite the textbooks?", *EETimes*, 2008. [online] Available: <http://www.eetimes.com/news/latest/showArticle.jhtml?articleID=207403521>
- [7] US. Patent Application 20080090337, "Electrically actuated switch," 2008.
- [8] M. Versace and B. Chandler, "The brain of a new machine." *IEEE Spectrum* 47 Vol.12, pp.30-37, 2010.
- [9] J.Borghetti, G. S. Snider, P.J. Kuekes, J. J. Yang, D.R. Stewart and R. S. Williams. " 'Memristive' switches enable 'stateful' logic operations via material implication." *Nature* 464, pp.873-876. 2010.
- [10] Q. Xia, W. Robinett, M. W. Cumbie, N. Banerjee, T. J. Cardinali, J. J. Yang, W. Wu, X. Li, W. M. Tong, D. B. Strukov, G. S. Snider, G. Medeiros-Ribeiro and R. S. Williams, "Memristor-CMOS hybrid integrated circuits for reconfigurable logic", *Nano Lett.*, vol. 9, no. 10, pp.3640 - 3645, 2009.
- [11] Y. Pershin and M. Di Ventra, "Practical approach to programmable analog circuit with memristors," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 57, no. 8, pp.1857 - 1864, 2009.
- [12] US patent application 20080307151, "Operational amplifier with resistance switch crossbar feedback," 2008.
- [13] Z. Biolk , D. Biolk and V. Biolkov, "SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift," *Radioengineering*, vol. 18, pp.210, 2009.
- [14] A. Rak and G. Cserey, "Macromodeling of the Memristor in SPICE," *IEEE Transactions on*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol.29, no.4, pp.632-636, 2010.

[15] D. Batas and H. Fiedler, "A Memristor SPICE Implementation and a New Approach for Magnetic Flux-Controlled Memristor Modeling," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol.10, no.2, pp.250-255, 2011.

[16] X. Zhang, Z. Huang and J. YU, "Memristor Model for SPICE," *IEICE Transactions on Electronics* Vol.E93-C No.3 pp.355-360, 2010.

[17] O. Kavehei, A. Iqbal, YS Kim, K. Eshraghian, SF Al-Sarawi, and D. Abbott, "The fourth element: characteristics, modelling and electromagnetic theory of the memristor," *Proc. R. Soc A*, vol. 466, no. 2120, pp. 2175-2202, 2010.

[18] B. Muthuswamy, "Implementation memristor based chaotic circuit", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 20, pp. 1335-1350, 2010.

[19] Y.V. Pershin and M. Di Ventra, "Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors," *Electronics Letters*, vol.46, no.7, pp.517-518, April 1, 2010.

[20] P. Kuksa and V. Pavlovic, "Experimental demonstration of associative memory with memristive neural networks," *Neural Networks*, Vol.23, pp.881-886, 2010.

[21] O. Kavehei, A. Iqbal, YS Kim, K. Eshraghian, SF Al-Sarawi, D. Abbott, "The fourth element: characteristics, modelling and electromagnetic theory of the memristor," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering*, doi:10.1098/rsa.2009.0553.

### ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

#### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายก ฤคากร กล่อมการ .....

เพศ  ชาย  หญิง วันเดือนปีเกิด 19 กค 2506 .....อายุ 49 ปี

สถานภาพ  โสด  สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน

#### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
อศ.บ	คอมพิวเตอร์	สจล	2530
วศ.ม	ไฟฟ้า	สจล	2536
วศ.ด	ไฟฟ้า	สจล	2554

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ Nonlinear electronics, Chaos application, Cryptography Algorithm.....

.....  
 .....  
 .....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2551	1.งานวิจัยเด่นของ สกว. ปี 51 "การสร้างตัว ดึงดูดอลวนและการประยุกต์"สำนักงานกองทุน สนับสนุนการวิจัย	
2553	2. นวัตกรรมโทรคมนาคมยอดเยี่ยมประเภท ต้นแบบโทรคมนาคม (Telecom Prototype) สถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2547	โครงการปริญญาเอกกวางญนาภิกษก	สกว

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

-การใช้ “สัญญาณอลวน” ป้องกันดักฟังโทรศัพท์

-อุปกรณ์การเข้ารหัสลับด้วยสัญญาณอลวน (A Chaotic Encryption Device)

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. P. Sooraksa and K. Klomkarn, "No-CPU" chaotic robots: from classroom to commerce, *IEEE Circuits and Systems Magazine*, Vol.10 no.1, p.46-53, 2010.
2. K. Klomkarn, P. Sooraksa and G. Chen, "New Construction of Mixed-Mode Chaotic Circuits," *Inter Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol.20 May, pp.1485-1497, 2010.
3. K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Simple Self Instructional Modules Based on Chaotic Oscillator: A Few blocks generate many patterns" *Inter Journal of Bifurcation and Chaos*, May, 2011 DOI No:

### ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

P. Sooraksa, K. Klomkarn , AN AUTHENTICATION DEVICE patent application The World Intellectual Property Organization 2006.