

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

โดยใช้มอสเฟต

INDUCTANCE SIMULATION USING MOSFET



นาย กิตติพงศ์ มะโน

MR. KITIPONG MANO

เลขหมู่ 674.676.057  
เลขทะเบียน 19312  
วัน, เดือน, ปี 9 ส.ค. 2536

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

ISBN 974 - 8158 - 63 - 2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# INDUCTANCE SIMULATION USING MOSFET



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
KING MONGKUT ' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1993

ISBN 974 - 8158 - 63 - 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต ซึ่งการออกแบบโดยใช้อุปกรณ์มอสเฟตนั้น มีข้อได้เปรียบกว่า อุปกรณ์ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์หลายประการและสามารถที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้คุณสมบัติเด่นของวงจรที่นำเสนอคือ สามารถใช้งานได้ทั้งกรณีที่ต้องแบบลอยตัวและต่ออยู่กับกราวด์ และยังสามารถเปลี่ยนแปลงค่าของอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทาน และค่าของตัวเก็บประจุ และยังได้ออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ ให้สามารถเปลี่ยนค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ได้ โดยใช้วิธีอิเล็กทรอนิกส์ คือ โดยการเปลี่ยนกระแส (หรือศักดา) มีช่วงปฏิบัติงานได้กว้าง และมีย่านความถี่ใช้งานกว้างมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงของการเปลี่ยนแปลงกระแส (และศักดา) และเนื่องจากอุปกรณ์ส่วนใหญ่เป็นมอสเฟตดังนั้นจึงเหมาะที่จะทำเป็นวงจรรวมได้สะดวก และเพื่อยืนยันหลักการที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการทดลองและเปรียบเทียบผลทางทฤษฎีกับปฏิบัติ โดยการต่อวงจรและทดลองรวมทั้งใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบการทำงานของวงจร ปรากฏผลใกล้เคียงกับที่คาดการณ์ไว้มากและเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ พร้อมทั้งได้แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานด้วย

## ABSTRACT

This thesis proposes the methods for the inductance simulation by using MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) circuits. The MOSFETs - circuits gain more advantage than bipolar transistor-based circuits, and more suitable for implementing in monolithic integrated circuit form. The realization method implements both grounded and floating inductance, where the inductive reactance of the proposed circuit is a linear function of resistor and capacitor. The inductive reactance can be changed linearly with the bias current (or bias voltage). The characteristics of the inductance circuits are demonstrated by experimental and simulation results. The results show that they have wide dynamic range, wide bandwidth and good linearity. For the simulation results, we used the software program PSpice to simulate the function and characteristics of the circuits. Finally, some application examples are also given.

## กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วัลลภ สุระกำพลธร อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้และแนวความคิดริเริ่ม ตลอดจนทรรศนะในด้านวิชาการเพื่อการทำวิจัยในครั้งนี้ ทั้งได้ชี้แนะแนวทางและให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด ระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ อาจารย์ เกียรติศักดิ์ คมวัชระ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์ ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล. ที่กรุณาให้ใช้ ไมโครคอมพิวเตอร์ และขอขอบคุณอาจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรมทุกท่านที่คอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณ โชติ มะโน คุณลักษณะ อนันตพันธ์ และคุณนิคม ศรีสวัสดิ์ ที่เป็นธุระในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ จนสำเร็จจุลฉงเป็นรูปเล่มอย่างสมบูรณ์

กิติพงศ์ มะโน

## สารบัญ

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์	1
1.3 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์	1
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต	4
2.1 บทนำ	4
2.2 โครงสร้างของมอสเฟต	4
2.3 สัญลักษณ์ของมอสเฟต	7
2.4 การทำงานและคุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต	7
2.5 แบบจำลองของมอสเฟต	13
บทที่ 3 การเลียนแบบขดลวดเหนียวนำ โดยใช้วิธีศึกษาควคุม	15
3.1 บทนำ	15
3.2 หลักการเบื้องต้นของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำ	16
3.3 หลักการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำ	18
3.3.1 การออกแบบวงจรโดยใช้วิธีศึกษาควคุม	18
3.3.2 วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสโดยใช้มอสเฟต	21
3.3.3 วงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำโดยใช้วิธีศึกษาควคุม	24
3.3.4 การทำงานของวงจร	24
3.4 การวิเคราะห์หาคูสมบัติของ วงจรทางทฤษฎี	26
3.4.1 การวิเคราะห์อินพุทอิมพีแดนซ์	26
3.4.2 การวิเคราะห์หาค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์	

และค่าความเหนียวนำเสมือน

32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3	การวิเคราะห์หาความถี่ปฏิบัติงาน	34
3.4.4	การวิเคราะห์หาค่าคิวแพกเตอร์	38
3.4.5	การวิเคราะห์หาค่ากระแสและคักดาปฏิบัติงาน	40
3.5	การทดลองและผลการทดลอง	43
3.5.1	การทดลองเพื่อทดสอบอินพุทอิมพีแดนซ์ ของวงจรขณะแทน $Z_1$ ด้วยความต้านทาน	44
3.5.2	การทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ	48
3.5.2.1	การทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ	48
3.5.2.2	การทดลองหาความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำ กับค่าตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน	51
3.5.3	การทดลองหาความถี่ปฏิบัติงาน	53
3.5.3.1	การทดลองหาค่าความถี่ปฏิบัติงาน	53
3.5.3.2	การทดลองวัดค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ( $Z_{Leq}$ ) ที่แปรตามความถี่ต่างๆ	53
3.5.4	การทดลองหากระแสและคักดาปฏิบัติงาน	55
บทที่ 4	การเขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์	72
4.1	บทนำ	72
4.2	หลักการเบื้องต้นของวงจรเขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์	72
4.3	วงจรเขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์	75
4.3.1	วงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็ก	76
4.3.2	การทำงานของวงจรเขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์	79
4.4	การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎี	81
4.4.1	การวิเคราะห์หาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจร	81
4.4.2	การวิเคราะห์หาค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์และค่าความเหนี่ยวนำ	84
4.4.3	การวิเคราะห์หาความถี่ปฏิบัติงาน	85

4.4.4	การวิเคราะห์หาค่าคิวนพแกเตอร์	93
4.4.5	การวิเคราะห์หาค่ากระแสและศักดาปฏิบัติงาน	95
4.5	การทดลองและผลการทดลอง	97
4.5.1	การทดลองเพื่อทดสอบอินพุทอิมพีแดนซ์ ของวงจรขณะแทน $Z_1$ ด้วยความต้านทาน	99
4.5.2	การทดลองวัดค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์และค่าความเหนี่ยวนำ	102
4.5.2.1	การทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ	102
4.5.2.2	การทดลองหาความสัมพันธ์ของขดลวดเหนี่ยวนำกับ ตัวเก็บประจุ $C_1$ และกระแส $I_A$	105
4.5.3	การทดลองหาค่าความถี่ปฏิบัติงานของวงจร	106
4.5.3.1	การทดลองหาค่าความถี่ปฏิบัติงาน	106
4.5.3.2	การทดลองวัดค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ( $Z_{Leq}$ ) ที่แปรตามความถี่ต่างๆ	108
4.5.4	การทดลองค่ากระแสและศักดาปฏิบัติงาน	106
บทที่ 5	การประยุกต์ใช้งานวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ	129
5.1	บทนำ	129
5.2	วงจรกรองความถี่	129
5.2.1	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง	129
5.2.2	วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง	131
5.2.3	วงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง	132
5.2.4	วงจรกรองจำกัดแถบความถี่อันดับสอง	131
5.3	วงจรกรองแบบปรับค่าได้โดยวิธีอิล็กทรอนิกส์	135
5.3.1	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง	135
5.3.2	วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง	137
5.3.3	วงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง	138
5.3.4	วงจรกรองจำกัดแถบความถี่อันดับสอง	140
5.4	วงจรรอสซิลเลเตอร์	141
5.5	วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบปรับความถี่ได้โดยวิธีอิล็กทรอนิกส์	143

บทที่ 6 บทสรุป	165
เอกสารอ้างอิง	168
ภาคผนวก	171



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

## บทนำ

## 1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรวม (Integrated Circuit) ได้มีการวิจัย และพัฒนามาโดยตลอดและปัจจุบันเนื่องจากเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำได้พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้มีการนำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทมอสเฟต (MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) นำมาใช้ในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสร้างเป็นวงจรรวมเชิงอนุภาค (Analog Integrated Circuit) มากขึ้นสืบเนื่องมาจากการออกแบบโดยใช้มอสเฟตนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor) หลายประการ [1-2] จึงทำให้ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบวงจรเพื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรวมชนิดเชิงเส้น โดยวงจรที่ได้ให้ความสนใจคือวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่อง "การเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต" (Inductance Simulation Using MOSFET) ซึ่งได้กำหนดจุดประสงค์เอาไว้ 5 ประการ คือ

1. เพื่อศึกษาค้นคว้าวิจัยการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต
2. เพื่อที่จะสามารถทำให้วงจรที่ออกแบบขึ้นดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้  
ง่าย มีความแม่นยำสูง และเกิดความผิดพลาดขึ้นน้อยที่สุด
3. พยายามออกแบบวงจรให้มีอนุภาคพาสซีฟน้อยที่สุด
4. ใช้อุปกรณ์ให้มีจำนวนน้อยที่สุด และให้วงจรมีขนาดเล็ก
5. สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้

## 1.3 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
จากการค้นคว้า ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่อง "การเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้ -  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสเฟต" วิทยานิพนธ์นี้ ได้เสนอการออกแบบ ที่ต่างจากการออกแบบของผู้ออกแบบเดิมที่เคยเสนอไว้ 2 ประการ

1. วงจรที่ออกแบบใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทมอสเฟต แทนสิ่งประดิษฐ์ประเภทไบโพลาร์ ซึ่งจากการค้นคว้าและติดตามผลงานวิจัย[3-6] ยังไม่ปรากฏว่ามีผู้ได้ออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทมอสเฟตนี้

2. วงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟต ที่ออกแบบขึ้นสามารถนำไปใช้งาน ได้ทั้งแบบลอยตัวและแบบต่อกับกราวด์ได้ โดยเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำ โดยการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุหรือตัวต้านทาน และเปลี่ยนค่าของความเหนี่ยวนำ โดยการเปลี่ยนค่าของกระแสซึ่งจะมีความสะดวกในการประยุกต์ใช้งาน และจะมีประโยชน์มากในการนำไปทำเป็นวงจรรวม

#### 1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในบทที่หนึ่งจะเป็นการกล่าวนำวัตถุประสงค์และหลักการใหม่ในการทำวิทยานิพนธ์ ส่วนในบทอื่น ๆ จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 2 จะกล่าวถึง โครงสร้างและทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต

บทที่ 3 จะกล่าวถึงหลักการออกแบบ วงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้วิธีตัดทอนความคุม และกล่าวถึงการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟต วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของวงจรทางทฤษฎี และยืนยันผลในทางทฤษฎีโดยการทดลองและโดยทำการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

บทที่ 4 จะกล่าวถึงหลักการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็ก และวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของวงจรทางทฤษฎี และยืนยันผลในทางทฤษฎีโดยการทดลองและโดยทำการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

บทที่ 5 จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานวงจรขดลวดเหนี่ยวนำ โดยได้ทดลองประยุกต์เป็นวงจรรองความถี่ อันดับหนึ่ง อันดับสอง โดยใช้เป็นทั้งวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรองความถี่สูงผ่าน วงจรกรองผ่านแถบความถี่ วงจรกรองจำกัดแถบความถี่ นอกจากนั้นยัง ได้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับผู้ประกอบการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ ลอนนำขดลวดเหนี่ยวนำที่เลียนแบบขึ้นมาใช้งานเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ และยืนยันผลในทางทฤษฎี ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการทดลอง และโดยทำการเขียนแบบวงจรและวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice บน  
เครื่อง ไมโครคอมพิวเตอร์

บทที่ 6 ซึ่งเป็นบทสุดท้าย จะเป็นการกล่าวสรุปถึงรายละเอียดต่าง ๆ ของวงจร  
เขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต ที่ได้ออกแบบขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

## ทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต

## 2.1 บทนำ

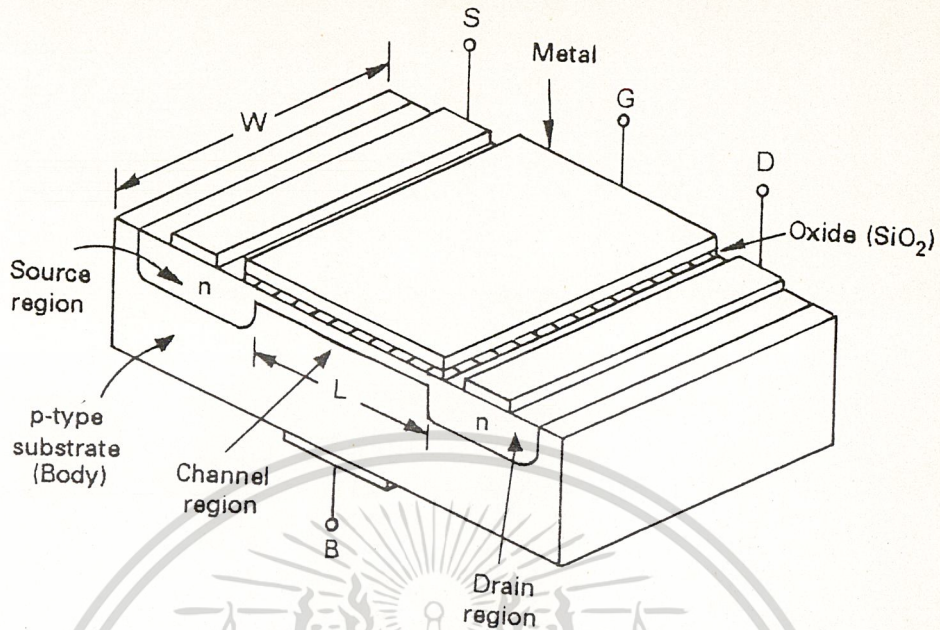
มอสเฟต ( MOSFET ) มาจากคำเต็มว่า Metal Oxide Semiconductor-Field Effect Transistor มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าอินซูลาเททเกตเฟต (Insulated Gate Field Effect Transistor) เขียนย่อว่า IGFET เป็นทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุมพื้นที่ภาคตัดขวางของสารกึ่งตัวนำที่นำกระแส [2] ถูกสร้างและเริ่มใช้งานครั้งแรกโดย D. Kahang และ M.M. Atalla [7] และผลิตเป็นไอซีในปี ค.ศ. 1964 และได้รับความนิยมมากขึ้นเป็นลำดับ และได้มีการพัฒนาจนกระทั่งถึงปัจจุบันสามารถผลิตโดยใช้เทคโนโลยี VLSI (Very Large Scale Integrated circuits) ได้ และในปัจจุบันนักวิจัยได้ให้ความสนใจออกแบบวงจรโดยใช้มอสเฟตกันมาก เนื่องจากมีโครงสร้างง่ายขั้นตอนการผลิตน้อย มีขนาดเล็กมาก ความต้านทานอินพุตสูง สัญญาณรบกวนต่ำ สามารถสร้างเป็นความต้านทานได้สะดวก [1-2] อย่างไรก็ตามมอสเฟตก็ยังมีข้อด้อยอยู่บ้าง เช่นมีกำลังต่ำ เป็นต้น

## 2.2 โครงสร้างของมอสเฟต

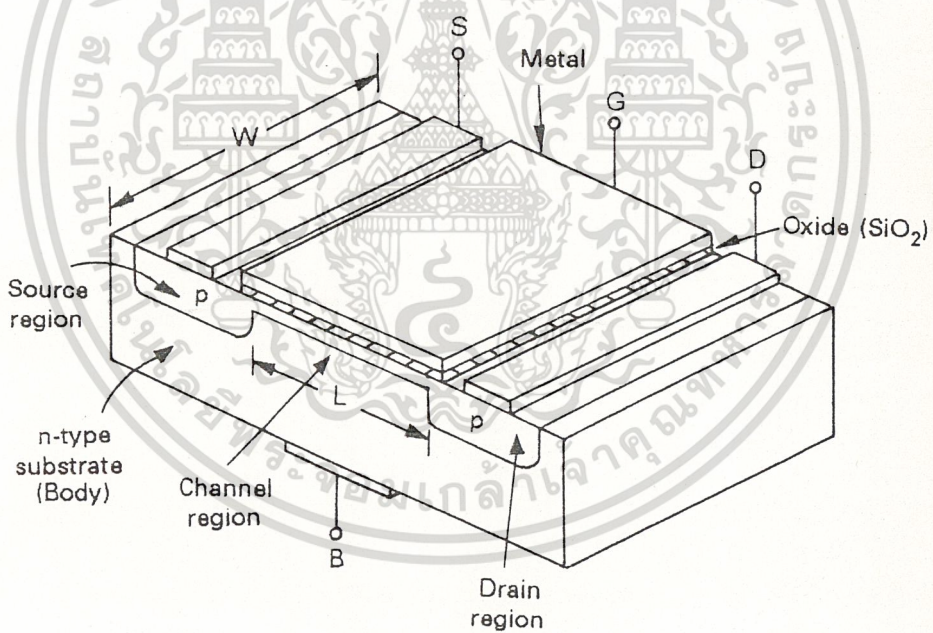
มอสเฟตสามารถแบ่งออกตามการทำงานได้ 2 แบบคือ มอสเฟตแบบเอ็นฮานเมนท์ (Enhancement MOSFET) และมอสเฟตแบบดีเพลชัน (Depletion MOSFET) ซึ่งแต่ละแบบสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ชนิดคือ P-Channel หรือเรียกว่า PMOS และ N-Channel หรือเรียกว่า NMOS โดยโครงสร้างของมอสเฟตแบบดีเพลชันดังแสดงในรูป 2.1 และโครงสร้างมอสเฟตแบบเอ็นฮานเมนท์ดังแสดงในรูป 2.2

จากรูปที่ 2.1(ก) เป็นโครงสร้างของมอสเฟตแบบดีเพลชันชนิด N-Channel นี้ประกอบด้วยปลายของอิลคโตรดเดรน และซอสที่มีปลายทั้งสองข้างต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันซึ่งเป็นชนิดเอ็นบาง ๆ ที่ต่อถึงกันเป็นชั้นเนลโดยแพร่ลงบนฐานรอง (Substrate) ชนิดพี จากนั้นจะมีฉนวนบาง ๆ ที่ทำจากซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) วางบนชั้นเนลโดยวางมาทับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่แพร่บนฐานรอง เล็กน้อยจากนั้นจะวางอิลคโตรดเกตซึ่งเป็นโลหะบนซิลิกอนไดออกไซด์ เช่นเดียวกันถ้าเปลี่ยนฐานรองเป็นชนิดเอ็น และมีชั้นเนลที่แพร่ลงบนฐานรองเป็นชนิดพีเราก็จะเรียกมอสเฟตชนิดนี้ว่าเป็นมอสเฟตแบบดีเพลชันชนิด P-Channel ดังแสดงในรูป 2.1(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโท ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



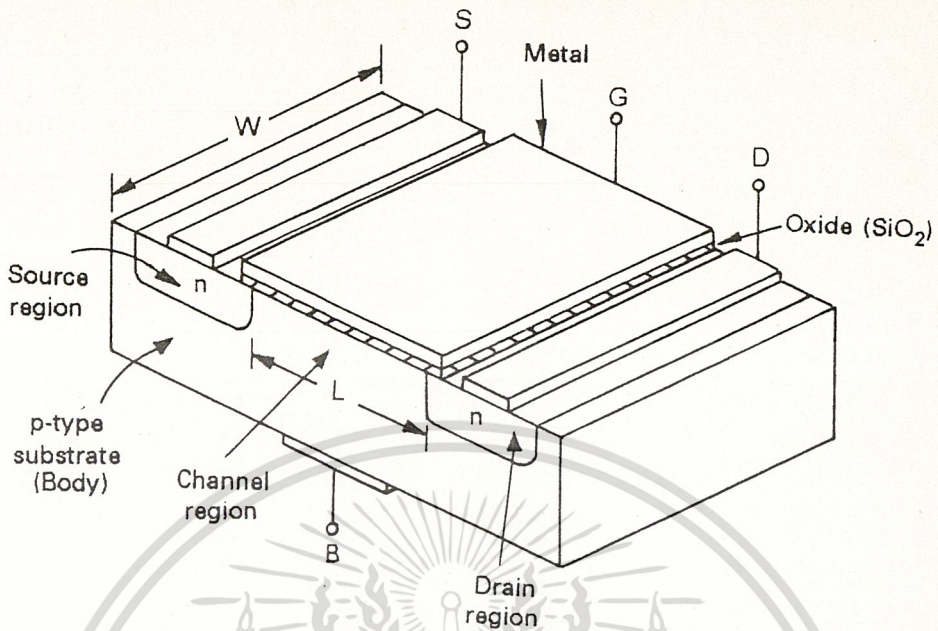
ก. ชนิด N-Channel



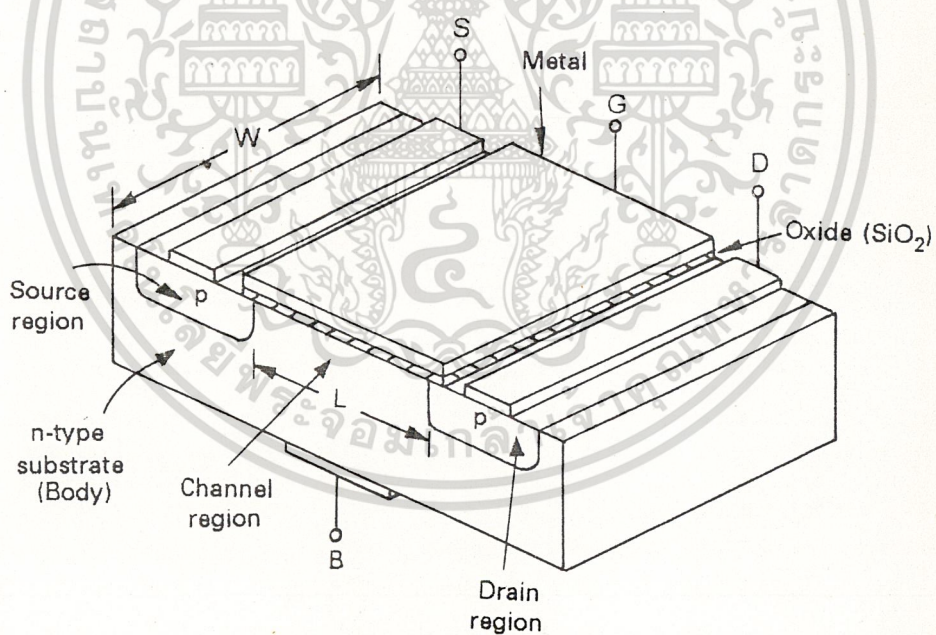
ข. ชนิด P-Channel

รูปที่ 2.1 โครงสร้างมอสเฟตแบบตีเพลทชั้น

จากรูปที่ 2.2 (ก) เป็นโครงสร้างของมอสเฟตแบบเอ็นแชนเนลชนิด N-Channel ประกอบด้วยปลายอิเล็กโทรดเดรนและซอสที่ต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกแพร่บนฐานรองซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยการแพร่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นดังกล่าวจะไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งมีระยะห่างเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความยาวของแชนเนล (Channel Length) เป็น  $L$  และมีความกว้างของแชนเนล (Channel Width) เป็น  $W$  ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ชนิด N-Channel



ข. ชนิด P-Channel

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของมอสเฟตเอ็นแชนแนล

width) เป็น  $W$  ส่วนมอสเฟตแบบเอ็นแชนแนลชนิด P-Channel มีการแพร่ที่ตรงข้ามกันกับชนิด

N-Channel ดังแสดงในรูป 2.2(ข) ดังนั้นการทำงานก็จะทำในลักษณะตรงข้ามกันด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 สัญลักษณ์ของมอสเฟต

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนมอสเฟตแต่ละแบบ และแต่ละชนิดนั้นจะมีลักษณะที่อ้างอิงกับ โครงสร้าง เพื่อจะสามารถพิจารณาได้สะดวกว่าเป็นมอสเฟตแบบใด และชนิดใด และเป็นขาอะไร โดยแสดง ได้ดังรูปที่ 2.3 และ โครงสร้างของแบบดีเฟลทชันชนิดต่าง ๆ ก็ สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ ดังสรุปไว้ในรูปที่ 2.3 เช่นเดียวกัน

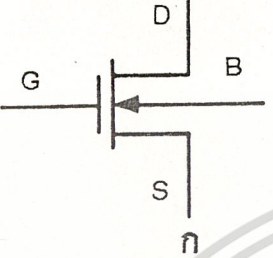
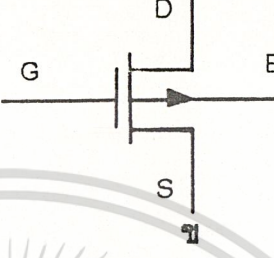
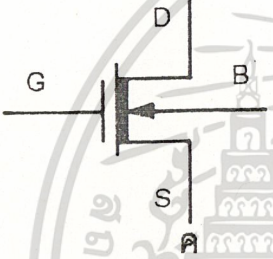
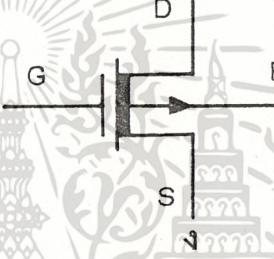
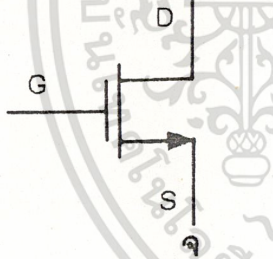
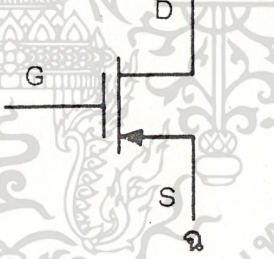
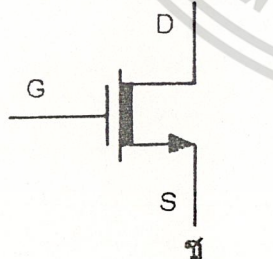
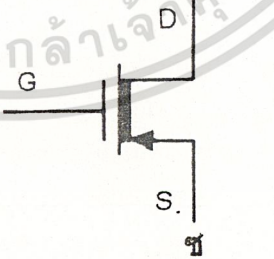
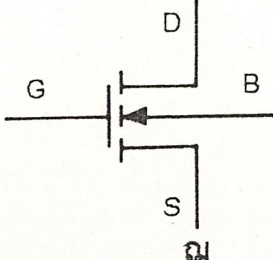
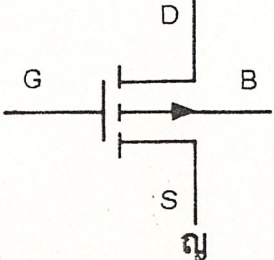
จากรูปที่ 2.3 ได้แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดต่าง ๆ โดยรูปที่ 2.3 ก. และ ข. เป็นมอสเฟตแบบดีเฟลทชันชนิด NMOS และ PMOS เมื่อแรงดันระหว่างบอดี้ (Body) และ ซอร์ส ( $V_{BS}$ ) ไม่เป็นศูนย์  $V_{BS} \neq 0$  ส่วนรูป ค. และ ง. เป็นสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบดีเฟลทชันชนิด NMOS และ PMOS เมื่อแรงดันระหว่างบอดี้ (Body) และซอร์ส ( $V_{BS}$ ) ไม่เป็นศูนย์ ส่วนสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.3 จ. และ ฉ. เป็นมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิด NMOS และ PMOS เมื่อ  $V_{BS} = 0$  รูปที่ 2.3 ช. และ ซ. เป็นสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบดีเฟลทชันชนิด NMOS และ PMOS เมื่อ  $V_{BS} = 0$  ส่วนรูป ฉ. และ ญ. เป็นสัญลักษณ์มอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ เช่นเดียวกัน

### 2.4 การทำงานและคุณสมบัติของมอสเฟต

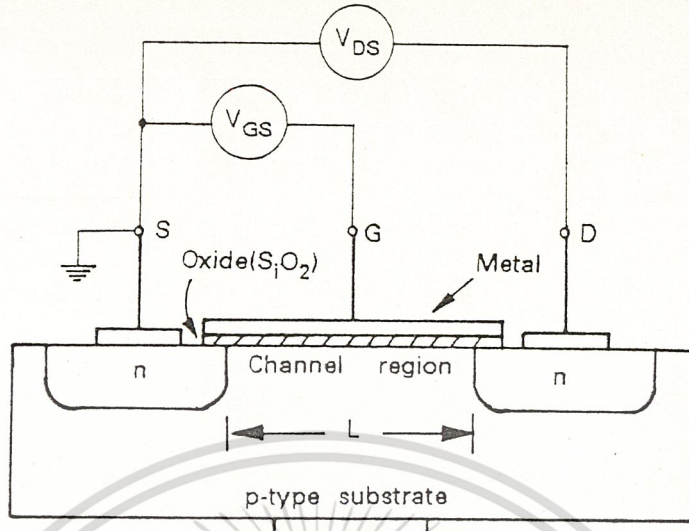
เราทราบแล้วว่ามอสเฟตแบ่งการทำงานได้ 2 ประเภทคือ เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดมอสเฟตหรือเรียกสั้น ๆ ว่า E-MOSFET และ D-MOSFET โดยทั้งสองประเภทมีโครงสร้างที่คล้ายกัน จะแตกต่างกันตรงที่การแพร่สารกึ่งตัวนำลงบนฐานรองจะไม่ต่อถึงกัน แต่ถ้าเป็นแบบ D-MOSFET แล้วจะต่อถึงกัน ดังรูปที่ 2.2 การทำงานของมอสเฟตจะยกตัวอย่างเฉพาะชนิด NMOS ทั้งสองแบบการทำงานโดยการต่อแรงดันให้กับขาต่าง ๆ ของมอสเฟตดังแสดงในรูป 2.4

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าที่ขาเดรนจะต้องได้ค้ำคิกดาบวกเมื่อเทียบกับซอร์สโดยในตอนแรกจะให้ค้ำคิกดาค่าน้อย ๆ ขาเกตจะ ได้ค้ำคิกดาบวกเมื่อเทียบกับซอร์สและต้องมากกว่า  $V_T$  หรือ  $V_{GS(th)}$  จะทำให้เกิดการอินดิวิชันเนล (Induced Channel) โดยอิเล็กตรอนเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างซอร์สกับเดรน ทำให้สารพีกลับกลายเป็นสารเอ็นด้วยการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า และเกิดกระแสไหลผ่านจากเดรนไปยังซอร์สถ้าหากเราเพิ่ม  $V_{DS}$  มากขึ้นกระแสก็จะไหลเพิ่มขึ้น และถ้าเพิ่ม  $V_{DS} = V_{GS} - V_T$  กระแสเดรนจะไหลสูงสุด และจะคงที่ตลอดแม้จะมีการเพิ่ม  $V_{DS}$  ขึ้นอีกก็ตาม ดังนั้นความนำแซนเนลจะแปรผันตรงกับ  $(V_{GS} - V_T)$  และเป็นผลให้กระแส  $I_D$  แปรผันตรงกับ  $(V_{GS} - V_T)^2$  ด้วย ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ  $I_D$  กับ  $V_{DS}$  เมื่อเปลี่ยนค่าของ  $V_{GS}$  ไม่มีการเคลื่อนที่ของ  $V_{GS}$  ได้ทั้งหมดมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

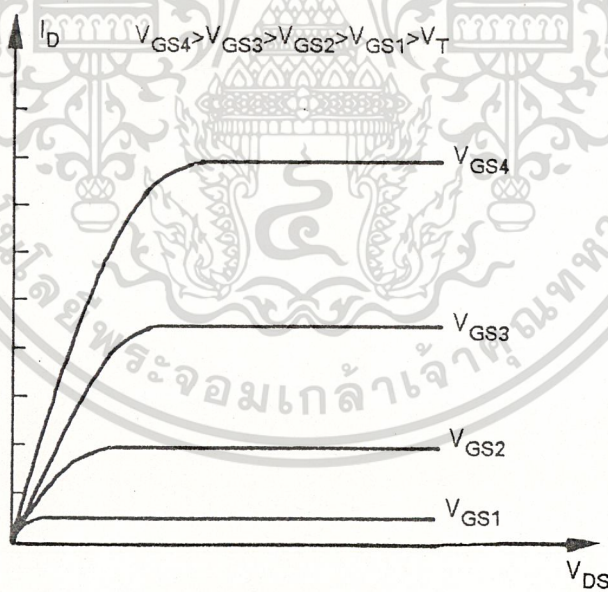
$V_{GS}$  เป็นค่าต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.5

NMOS	PMOS	MODE
		DEPLETION
		DEPLETION
		ENHANCEMENT
		DEPLETION
		ENHANCEMENT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดต่าง ๆ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงการไบอัสมอสเฟตแบบเอ็นแชนเนลที่ชนิดเอ็นแชนเนล

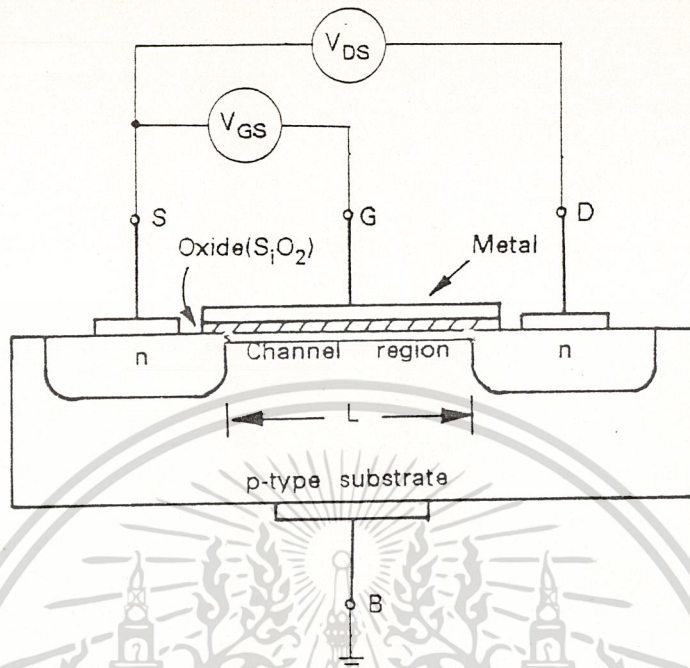


รูปที่ 2.5 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอสเฟตแบบเอ็นแชนเนลที่ชนิดเอ็นแชนเนล

ส่วนการทำงานของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนเนล โดยการต่อแรงดันให้กับขา

ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.6

จากรูปที่ 2.6 เมื่อป้อนแรงดันขาเกตเป็นลบเทียบกับซอสจะมีประจุลบเกิดขึ้นที่ขาเกต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ และจบบวกเกิดขึ้นที่ด้านในแชนเนลที่ติดกับบริเวณ เนื่องจากว่าพาหะนำประจุในแชนเนลชนิดเอ็นแชนเนล ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



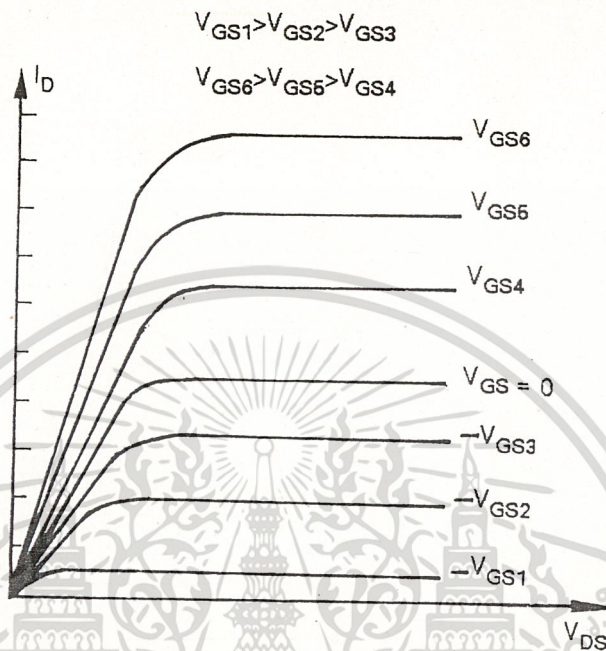
รูปที่ 2.6 แสดงการไบอัสมอสเฟตแบบดีเพลทชันโหมด

คืออิเล็กตรอน การมีประจุบวกอยู่กับที่จะทำให้เกิดบริเวณเปลือยพาหะขึ้นทำให้พื้นที่ตัดขวางที่จะนำกระแสและค่าการนำไฟฟ้าลดลง และถ้าขาคามีค่าเป็นลบมากทำให้บริเวณเปลือยพาหะขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มเข้าไปในแชนแนลกระแส จะทำให้ความนำลดลงอีก เป็นผลให้กระแสไหลน้อยลง และถ้า  $V_{GS}$  เป็นลบมาก ๆ จะทำให้กระแสเดรนเป็นศูนย์ได้ เรียกการทำงานแบบนี้ว่าการทำงานแบบดีเพลทชันโหมด (Depletion Mode)

และขณะแรงดัน  $V_{GS}$  เป็นศูนย์เนื่องจากโครงสร้างแบบดีเพลทชันมีแชนแนลนำสัญญาณอยู่แล้วกระแสจึงสามารถไหลได้ค่าหนึ่ง และเมื่อไบอัสให้ที่ขาคือเป็นบวกทำให้มีประจุบวกบนผิวของเกตและประจุลบเกิดขึ้นภายในแชนแนลต้านที่ติดกับจำนวน โดยประจุลบนี้ สามารถเคลื่อนที่ได้จึงทำให้มีพาหะนำกระแสเพิ่มขึ้นทำให้ความนำของแชนแนลเพิ่มขึ้นและกระแส  $I_D$  ก็จะสามารถไหลได้มากขึ้น การทำงานแบบนี้เรียกว่าการทำงานแบบเอ็นฮานซ์โหมด (Enhancement mode) และจากการทำงานของมอสเฟตแบบดีเพลทชันสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ของกระแส  $I_D$  กับ  $V_{DS}$  เมื่อมีการเปลี่ยนค่า  $V_{GS}$  ได้ดังรูปที่ 2.7

จากการทำงานของมอสเฟตจะเห็นว่าเป็นการทำงานแบบใช้ศักดาควบคุมปริมาณกระแส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ และสมการมอสเฟตถูกคิดค้นโดย Sah [10] และ Shichman and D. Hodgees [11] เมื่อปี 1960 ไม่ว่ากรรมใดๆ หงสน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1964 ดังแสดงในสมการที่ (2.1) โดยได้แสดงคุณสมบัติการทำงานของมอสเฟตได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอสเฟตแบบดีเฟลทชันชนิดเอ็นแชนแนล

$$I_D = \frac{K'W}{L} \left\{ (V_{GS} - V_T) - \frac{V_{DS}}{2} \right\} V_{DS} \quad ; \quad V_{GS} \geq V_T \quad (2.1)$$

โดยที่  $K'$  คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance) มีค่าเท่ากับ  $U_0 C_{ox}$

$U_0$  คือค่าความคล่องของ โยล์หรืออิเล็กตรอน

(Surface Mobility of Carrier)

$C_{ox}$  คือค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์

(Capacitance Per Unit Area of the Gate Oxide)

$W$  คือ ความกว้างของช่องนำ (Channel Width)

$L$  คือ ความยาวของช่องนำ (Channel Length)

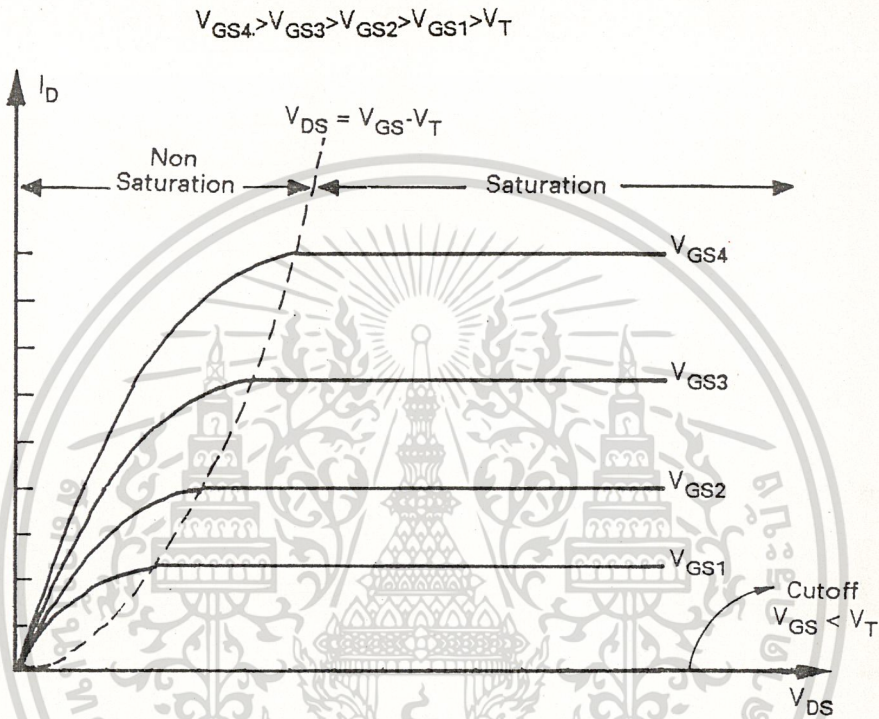
$V_{GS}$  คือ ความต่างศักย์ระหว่างเกตกับซอส

$V_T$  คือ แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{DS}$  คือ ความต่างศักย์ระหว่างเดรนกับซอร์ส

$I_D$  คือ กระแสเดรน



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอสเฟต

การจัดไบอัสการทำงานให้กับมอสเฟต สามารถแบ่งการพิจารณาการทำงานได้เป็น 3 ช่วง โดยขึ้นอยู่กับค่าของ  $(V_{GS} - V_T)$  และ  $V_{DS}$  ซึ่งพิจารณาแต่ละช่วงได้ดังนี้

1. ช่วงที่มอสเฟตไม่นำกระแส (Cutoff Region) คือ ช่วงที่  $V_{GS}$  มีค่าน้อยกว่า  $V_T$  ทำให้มอสเฟตไม่นำกระแสซึ่งเรียกช่วงนี้ว่าช่วงไม่นำกระแส (Cutoff Region)

$$I_D = 0 \quad ; \quad V_{GS} - V_T < 0 \quad (2.2)$$

ซึ่งในช่วงไม่นำกระแสนี้จะทำตัวเสมือนวงจรเปิด (Open Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
 2. ช่วงมอสเฟตมีการทำงานแบบไม่อิ่มตัว (Non-Saturation) หรือช่วงเชิงเส้น  
 ไม่อิ่มตัว (Linear Region) คือ ช่วงที่ไบอัสให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เดรนกับซอร์ส ( $V_{DS}$ ) ก็ยังมีค่าน้อยกว่าใช้

ค่าของ  $(V_{GS} - V_T)$  มากดังนั้น

$$I_D = \frac{K'W}{L} \left\{ (V_{GS} - V_T) - \frac{V_{DS}}{2} \right\} V_{GS} \quad ; \quad 0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T \quad (2.3)$$

3. ช่วงมอสเฟตมีการทำงานแบบอิ่มตัว (Saturation Region) คือ ช่วงที่ไบอัสให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เดรนกับซอส ( $V_{DS}$ ) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $(V_{GS} - V_T)$  ดังนั้นจะได้ค่ากระแสเดรนดังนี้

$$I_D = \frac{K'W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad ; \quad V_{DS} > V_{GS} - V_T \quad (2.4)$$

และ  $V_{GS} - V_T > 0$

## 2.5 แบบจำลองของมอสเฟต [12]

ในปัจจุบันนี้ ได้มีการใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป วิเคราะห์และเลียนแบบการทำงานของวงจรต่าง ๆ กันอย่างกว้างขวาง โปรแกรม Spice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [13-14] เป็นโปรแกรมหนึ่งซึ่งถูกใช้มากและเป็นที่ยอมรับถูกคิดค้นและพัฒนาจากมหาวิทยาลัย Berkeley ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย (California) ประเทศสหรัฐอเมริกา ในโปรแกรม Spice ได้แบ่งรูปแบบจำลอง (Model) การทำงานของมอสเฟตออกเป็น 3 รูปแบบคือ LEVEL 1, LEVEL 2, LEVEL 3

LEVEL 1 เป็นแบบจำลองการทำงานของมอสเฟต แบบพื้นฐานที่มีความยาวของแชนแนลมากกว่า 10 ไมครอน โดยใช้โมเดลของ H. Shichman and D. Hodges ซึ่งครอบคลุมการทำงานไปถึงโมเดลของ C.T. Sah ด้วย

LEVEL 2 เป็นแบบจำลองการทำงานของมอสเฟตที่มีความยาวของแชนแนล น้อยกว่า 10 ไมครอน ซึ่งเรียกว่า Short Channel effect LEVEL 2 แตกต่างจาก LEVEL 1 อยู่ 2 ประการ ประการแรกคือ วิธีการคำนวณผลกระทบของความยาวแชนแนล (Effective Channel Length) และประการที่สองคือ วิธีการคำนวณการเปลี่ยนแปลงระหว่างรอยต่อของช่วงการนำกระแสอิ่มตัว (Saturation Region) และช่วงการนำกระแสไม่อิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (Non-Saturation Region)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LEVEL 3 เป็นแบบจำลองการทำงานของมอสเฟต ซึ่งออกแบบขึ้นโดยอาศัยผลจากการทดลอง, การสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้น และประสบการณ์ความชำนาญ (Semi-Empirical) เพื่อปรับปรุ่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมใน LEVEL 3 ได้มีการลดเวลาการคำนวณความเปลี่ยนแปลงระหว่างรอยต่อของช่วงการนำกระแสอิ่มตัว และช่วงการนำกระแสไม่อิ่มตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

## การเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีศึกษาคความคุม

## 3.1 บทนำ

ในการประดิษฐ์วงจรรวมกัน ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นอนุกรมเพียงอย่างเดียวที่ไม่สามารถทำงานขึ้นสารกึ่งตัวนำได้ ฉะนั้นการเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้วงจรที่มีเฉพาะอนุกรมแอคทีฟ (Active Device) ร่วมกับความต้านทาน R และ ตัวเก็บประจุ C เท่านั้นจึงจะมีประโยชน์และโดยทั่วไปการเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำดังกล่าวจะใช้ทฤษฎีของ โครงข่ายสองพอร์ต เรียกว่าไจเรเตอร์ (Gyrator) [15-17]

จากการรายงานของวารสารต่าง ๆ พบว่าการพัฒนาวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำนั้นสามารถสร้างขึ้นจากอนุกรมแอคทีฟได้หลายชนิด โดยต่อรวมกับอุปกรณ์พาสซีฟ (Passive-Element) เช่น วงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้โอปแอมป์ (OpAmp : Operational-Amplifier) [3] โดยใช้ OTA (Operational Transconductance Amplifier) [18] [19] โดยใช้วงจรสายพานกระแส หรือ CCII (Second Generation Current - Converyer) [20] และโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Transistor)[5] อย่างไรก็ตามจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นเป็นวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ มีขนาดใหญ่และหากนำไปผลิตเป็นวงจรรวมต้องใช้พื้นที่มาก ดังนั้นทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง จากการติดตามรายงานจากวารสารต่าง ๆ พบว่าใน 10 ปีที่ผ่านมาจนกระทั่งถึงปัจจุบันนักวิจัยได้ให้ความสนใจหันมานิยมการออกแบบและพัฒนางจรโดยใช้มอสเฟต (MOSFET) มากขึ้นเป็นลำดับ โดยเฉพาะวงจรรวมเชิงอุปมาณ (Analog Integrated Circuit) เนื่องจากมอสเฟตมีขั้นตอนการสร้างที่ง่ายและเหมาะสมสำหรับวงจรที่มีความซับซ้อนมาก ๆ อีกทั้งวงจรเมื่อทำเป็นวงจรรวมแล้วจะทำให้ชิพ (Chip) มีขนาดเล็กลงด้วยรวมทั้งข้อได้เปรียบต่าง ๆ ของมอสเฟตเมื่อเทียบกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต ซึ่งวงจรที่ออกแบบขึ้นมานี้ใช้อุปกรณ์จำนวนน้อย และค่าขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้มีพิสัยกว้างและวงจรที่ออกแบบสามารถเปลี่ยนค่าขดลวดเหนี่ยวนำได้โดยการเปลี่ยนค่าของ อุปกรณ์พาสซีฟ R และ C ส่วนการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้นโดยมากจะนำไปประยุกต์เป็น วงจรกรองความถี่ [17]

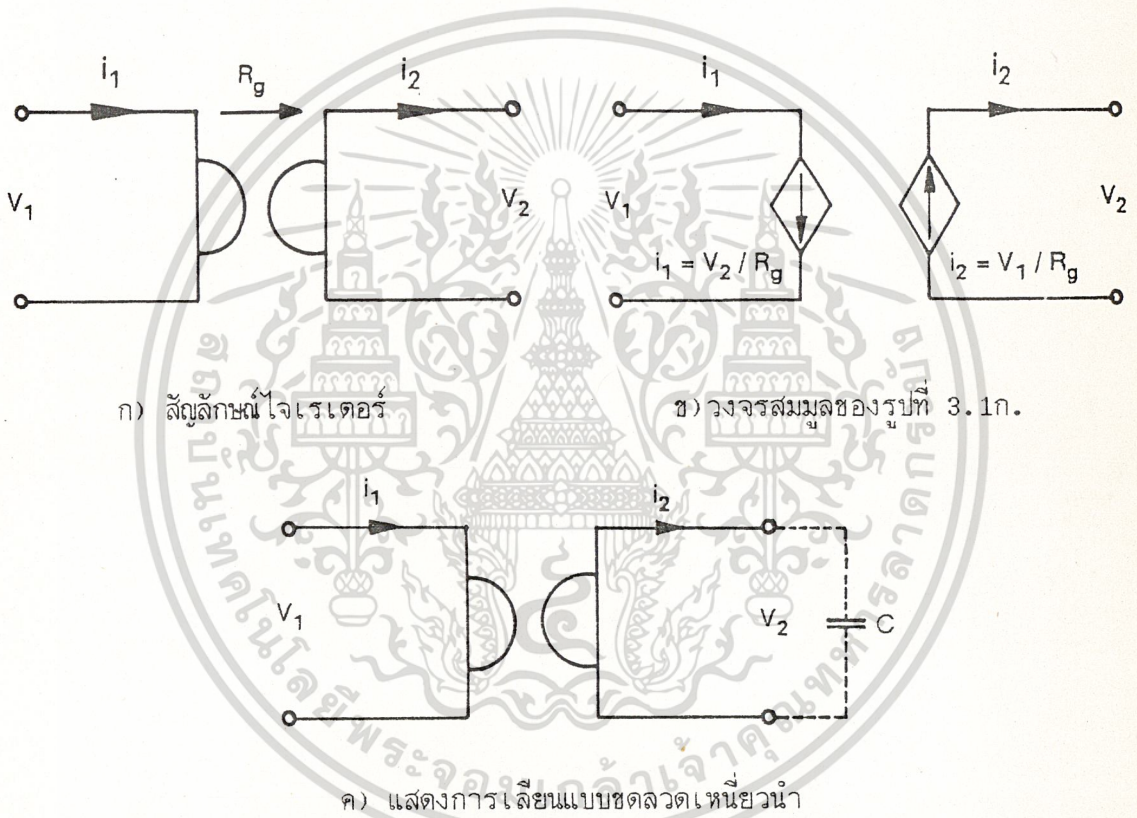
วงจรรวมซิลิโคน [21] ซึ่งถือว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สมารถใช้สำหรับการใ้ความเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าต่าง ๆ เช่น อีเล็กทรอนิกส์ และ ไฟฟ้าสื่อสาร เป็นต้น ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์มาก และถ้าหากไม่มีการแก้ไข ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการนำไปประดิษฐ์เป็นวงจร รวมแล้วจะทำให้สามารถใช้งานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

3.2 หลักการเบื้องต้นของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

การออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมากใช้ทฤษฎีโครงข่ายสองพอร์ตที่มีคุณสมบัติเป็นไจเรเตอร์ (Gyrators) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Tellegen ในปี ค.ศ.1948[22] โดยมีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 3.1 ก. หรือเขียนในรูปของวงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal-equivalent Circuit) ได้ดังรูป 3.1 ข.



ก) สัญลักษณ์ไจเรเตอร์. ข) วงจรสมมูลของรูปที่ 3.1ก.

ค) แสดงการเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

รูปที่ 3.1 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของไจเรเตอร์

ไจเรเตอร์เป็นโครงข่ายสองพอร์ตที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ

$$Z_{in}(S) = \frac{R_g^2}{Z_L(S)} = R_g^2 Y_L(S) \tag{3.1}$$

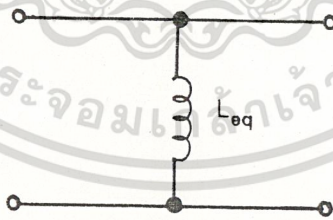
โดยที่  $R_g$  เป็นความต้านทานไจเรชัน (Gyration resistance) ดังนั้นถ้านำตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เก็บประจุ C ต่อขั้วพอร์ตเอาต์พุตตามเส้นประในรูปที่ 3.1 ค. แล้วจะได้  $Y_L = SC$  และจะทำให้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

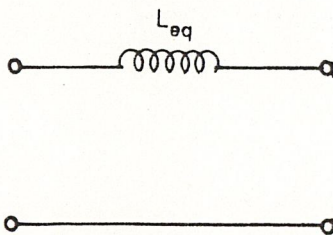
อินพุทอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเป็นค่าของความเหนี่ยวนำซึ่งวิธีการสร้างขดลวดเหนี่ยวนำดังกล่าวนี้เรียกว่าการเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor Simulation) และจากรูป 3.1 ข. จะเห็นว่ากระแสที่พอร์ทหนึ่งจะแปรผันตรงกับ โวลต์เตจที่พอร์ทที่สอง โดยโครงสร้างประกอบด้วยแหล่งจ่ายศักดาควบคุมแหล่งจ่ายกระแสสองวงจร และจากรูปที่ 3.1 ข. พบว่าค่าอินพุทอิมพีแดนซ์และเอาต์พุทอิมพีแดนซ์จะมีค่ามากและขดลวดเหนี่ยวนำ จากการเลียนแบบจะมีข้อแตกต่างจากขดลวดเหนี่ยวนำทั่ว ๆ ไปคือ

1. ขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการเลียนแบบจะไม่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยรอบ
2. ค่าความเหนี่ยวนำและค่าคิวแฟกเตอร์ (Quality Factor) ของขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการเลียนแบบสามารถทำให้มีค่าสูง ๆ ได้
3. ขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการเลียนแบบจะสามารถทำให้เป็นค่าขดลวดเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้อย่างสะดวก

และขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการเลียนแบบ สามารถแบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งานได้เป็นสองแบบคือ แบบเทียบศักดา (Grounded Inductor) ซึ่งเป็นแบบที่เมื่อนำไปใช้งานจะมีปลายข้างหนึ่งของขดลวดเหนี่ยวนำที่ติดเทียมที่ได้ต่ออยู่กับระดับศักดาดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก. และขดลวดเหนี่ยวนำแบบลอยตัว (Floating Inductor) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานแบบลอยตัวได้ดังอนุกรม (Device) ทั่ว ๆ ไปได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ข.



ก. ขดลวดเหนี่ยวนำแบบเทียบศักดา



ข. ขดลวดเหนี่ยวนำแบบลอยตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.2 การนำขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการเลียนแบบไปใช้งาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

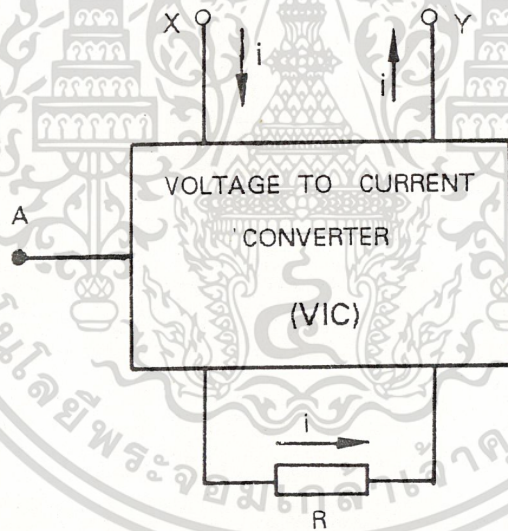
19342

### 3.3 หลักการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำตามที่ได้คิดค้น และพัฒนาขึ้นมาขึ้นนิยมออกแบบโดยใช้วิธีตัดคาควบคุมโดยอาศัยวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส (Voltage to Current Converter : VIC) [23-24] เป็นวงจรที่เหมาะสมในการนำมาประดิษฐ์เป็นวงจรรวม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึง ได้ออกแบบวงจรโดยใช้วิธีตัดคาควบคุมเช่นเดียวกัน

#### 3.3.1 การออกแบบวงจรโดยใช้วิธีตัดคาควบคุม

การออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีตัดคาควบคุมจะใช้วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสสองวงจร และเพื่อความสะดวกในการอธิบายหลักการเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ จึงใช้ไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.3 มาแทนวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าถ้าหากเราป้อนศักดาเข้าที่จุด A และ B จะเป็นผลให้เกิดกระแส  $i$  ไหลผ่าน  $R$  และเกิดกระแส  $i$  ไหลเข้าที่จุด X และไหลออกที่จุด Y โดยมีค่าทรานคอนดัคแตนซ์เท่ากับ  $1/R$  ดังนั้น การออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบตัดคาควบคุมนั้น จะใช้วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส สองวงจร โดยออกแบบให้กระแสอินพุทของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำแปรผันตรงกับศักดาตกคร่อมตัวเปลี่ยนอิมพีแดนซ์และให้กระแสไหลผ่านตัวเปลี่ยนอิมพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 แตนซ์แปรผันตรงกับศักดาที่อินพุทของวงจร สามารถแสดงหลักการได้ดัง ไดอะแกรมของรูปที่ 3.4  
 ไม่ว่าจะผิดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.4 ประกอบด้วยวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสสองวงจร ต่อร่วมกับ  $Z_1$  โดยมีการทำงานดังนี้คือ เมื่อมีการป้อนศักดาเข้าที่จุด A และ B ของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส วงจรที่ 1 จะเป็นผลให้เกิดกระแส  $i_1$  ไหลผ่าน  $R_1$  และเป็นผลให้เกิดกระแส  $i_2$  ไหลผ่าน  $Z_1$  โดยมีทิศทางไหลออกจากจุด Y และไหลเข้าจุด X เป็นผลให้เกิดศักดาตกคร่อม  $Z_1$  ซึ่งเป็นอินพุทให้กับวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสวงจรถัดไป ทำให้เกิดกระแส  $i$  ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_2$  เป็นผลให้เกิดกระแสไหลออกจากจุด B และไหลเข้า A ดังรูปที่ 3.4 และสามารถวิเคราะห์เพื่อหาค่า ขดลวดเหนี่ยวนำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของกระแส  $i$  และศักดาที่จุด A และ B จากรูปที่ 3.4 สามารถพิจารณาได้ดังนี้คือ

$$V_{AB} = i_1 R_1 \quad (3.2)$$

$$V_{XY} = i_1 Z_1 \quad (3.3)$$

$$V_{XY} = i_2 R_2 \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.3) จะได้

$$i_1 = \frac{V_{AB}}{R_1}, \quad i_1 = \frac{V_{XY}}{Z_1} \quad (3.5)$$

เพราะฉะนั้น

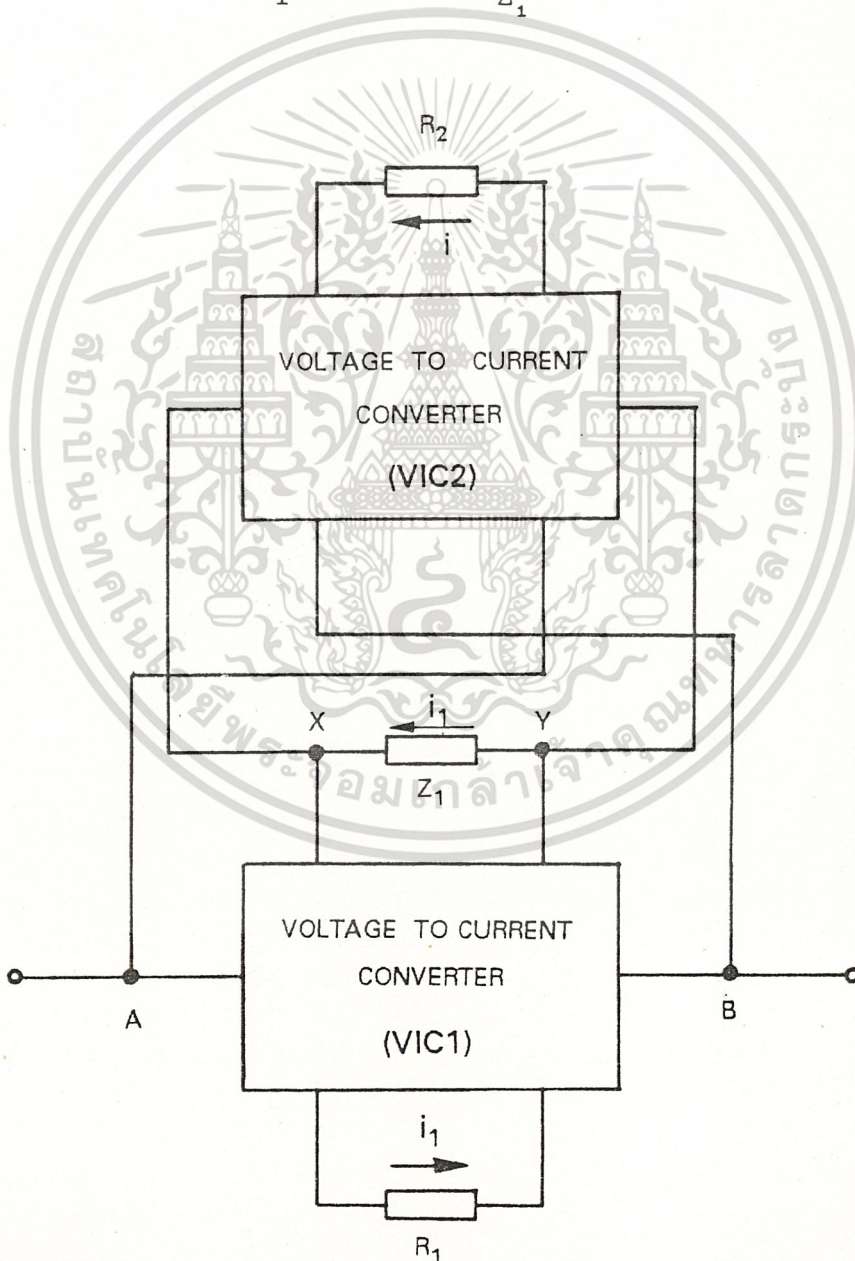
$$V_{XY} = \frac{V_{AB} Z_1}{R_1} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.4) เท้ากับสมการที่ (3.6) จะได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_1 R_2 = \frac{V_{AB} Z_1}{R_1} \quad (3.7)$$

เพราะฉะนั้น

$$Z_{AB} = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{R_2 R_1}{Z_1} \quad (3.8)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.4 เตอะแถมหลักการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนยวนา โดยวิธีศึกษาควบคุม  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.8) ถ้าแทน  $Z_1$  ด้วย  $1/SC_1$  เมื่อ  $S = j\omega$  แล้วจะได้

$$Z_{AB} = SC_1 R_1 R_2 \quad (3.9)$$

และเราทราบว่าค่ารีแอคแตนซ์เหนี่ยวนำ (Inductive Reactance) หรือค่าความต้านทานของขดลวดที่แปรผันตามความถี่คือ  $Z_L = SL$  ดังนั้นจากสมการที่ (3.9) ทำให้เราทราบว่าที่จุด A และ B จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเสมือน (Equivalent Inductance) โดยใช้ตัวย่อว่า  $L_{eq}$  ดังนี้

$$L_{eq} = C_1 R_1 R_2 \quad (3.10)$$

ผลจากสมการที่ (3.10) ค่าความเหนี่ยวนำที่เลียนแบบขึ้นมามีค่าขึ้นอยู่กับ  $C_1$  และความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  อย่างไรก็ตามหลักการตามไดอะแกรมในรูปที่ 3.4 ซึ่งได้ผลตามสมการที่ (3.10) ดังกล่าวแล้วนั้นเป็นหลักการทางอุดมคติ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการออกแบบวงจรจริง ๆ และก่อนจะออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำตามหลักการดังกล่าวจริง ๆ เราจะออกแบบวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสก่อนเป็นอันดับแรก จากนั้นจึงนำมาออกแบบเป็นวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ ตามหลักการที่เสนอไว้ข้างต้น ซึ่งรายละเอียดการออกแบบวงจรในส่วนต่าง ๆ จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

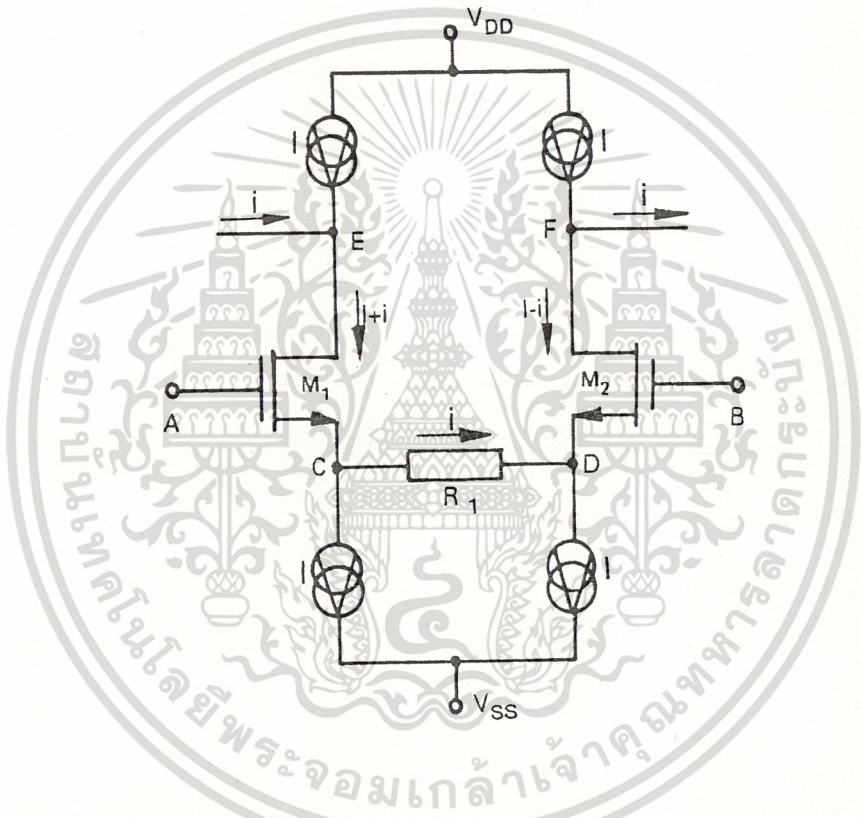
### 3.3.2 วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสโดยใช้มอสเฟต

วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสโดยใช้มอสเฟตนี้ จะใช้วงจรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) ซึ่งประกอบด้วยมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  กับความต้านทาน  $R_1$  ดังรูปที่ 3.5

การทำงานของวงจรกล่าวคือ มอสเฟตทุกตัวที่ใช้ออกแบบเป็นชนิดเอ็นแชนเม้นท์ (Enhancement Mode) และมีค่าของ  $V_{SB} =$  ศูนย์ (หรือ  $V_T = V_{TO}$ ) และหัวใจสำคัญของวงจรคือ มอสเฟต  $M_1$ ,  $M_2$  และ  $R_1$  ที่ต่อกันอยู่ในรูปแบบของวงจรขยายความแตกต่างซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนศักดาหรือแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแส และที่จุด C และจุด D จะต่อกับแหล่งจ่ายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การคัดลอก แล้ดงที่ I และต่อกับ  $V_{SS}$  เช่นเดียวกับที่จุด E และจุด F จะต่อกับแหล่งจ่ายกระแสที่ I โดยไม่ว่าการันใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราให้ศักดาที่จุด A และจุด B โดยศักดาที่จุด A จะมากกว่าที่จุด B จะทำให้เกิดผลต่างศักดาที่จุด C และจุด D เป็นผลให้เกิดกระแส  $i$  ไหลผ่าน  $R_1$  มีทิศทางดังรูปที่ 3.5 เป็นผลให้กระแสเดรนของมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  เปลี่ยนแปลงจาก  $I$  เป็น  $I+i$  และ  $I-i$  ตามลำดับและจะเห็นว่าที่จุด E และจุด F นั้นเมื่อต่อสาขาไปใช้งานจะเกิดกระแส  $i$  ไหลเข้าและไหลออกที่จุด E และ จุด F ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสโดยใช้มอสเฟต

ดังนั้นเราสามารถวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) และค่าทรานคอนดักแตนซ์ (Transconductance) ที่จุด A และ B โดยพิจารณากระแส  $i$  รวมกับศักดาที่จุด A และ B ตามรูปที่ 3.5 ได้ดังนี้คือ

$$V_{AB} = V_{GS1} - V_{GS2} + iR_1 \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และเราทราบว่าค่า  $V_{GS}$  ของมอสเฟตทั้งสองขณะทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation Region) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีผลเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{GS} = \sqrt{\frac{2i_D}{B}} + V_T \quad (3.12)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.12) และ (3.11) จะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{2i_{D1}}{B_1}} + V_{T1} - \sqrt{\frac{2i_{D2}}{B_2}} - V_{T2} + iR_1 \quad (3.13)$$

จากวงจรกระแสเดรนของมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  คือ

$$\begin{aligned} i_{D1} &= I+i \\ i_{D2} &= I-i \end{aligned} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.13) และ (3.14) จะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{2(I+i)}{B_1}} + V_{T1} - \sqrt{\frac{2(I-i)}{B_2}} - V_{T2} + iR_1 \quad (3.15)$$

และสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ที่จุด A และ B ได้จาก

$$R_{AB} = \frac{\partial V_{AB}}{\partial i} \quad (3.16)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.15) และ (3.16) จะได้

$$R_{AB} = \sqrt{\frac{L}{2K'W}} \left[ \frac{1}{\sqrt{I+i}} + \frac{1}{\sqrt{I-i}} \right] + R_1 \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าทรานคอนดักแตนซ์สามารถหาได้จาก  $G_{AB} = \frac{1}{R_{AB}}$  นั่นคือ

$$G_{AB} = \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{2K'W}} \left[ \frac{1}{\sqrt{I+i}} + \frac{1}{\sqrt{I-i}} \right] + R_1} \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.18) เราพบว่าค่าของ  $G_{AB}$  ขึ้นอยู่กับ  $i$  และ  $R_1$  และจะสังเกตเห็นว่าเทอมของค่ากระแส  $i$  ที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์อยู่กับกระแส  $I$  และถ้ามีค่าเป็น  $i < I$  หรือ  $i > I$  จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ตัดที่ขั้วที่จุด A และ B มีค่าเป็นอนันต์ หรือค่าทรานสคอนดักแตนซ์ที่จุด A และ B มีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้ากระแส  $i$  เกิดอยู่ในช่วง  $-I < i < I$  ซึ่งเป็นช่วงปฏิบัติงาน (Dynamic Range) โดยช่วงปฏิบัติงานจะกว้างมากหรือน้อยก็จะขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งกระแสคงที่  $I$  ซึ่งข้อดีของวงจรนี้คือใช้อุปกรณ์น้อยและให้ช่วงกระแสปฏิบัติงานกว้าง

### 3.3.3 วงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีคัทตาควบคุม

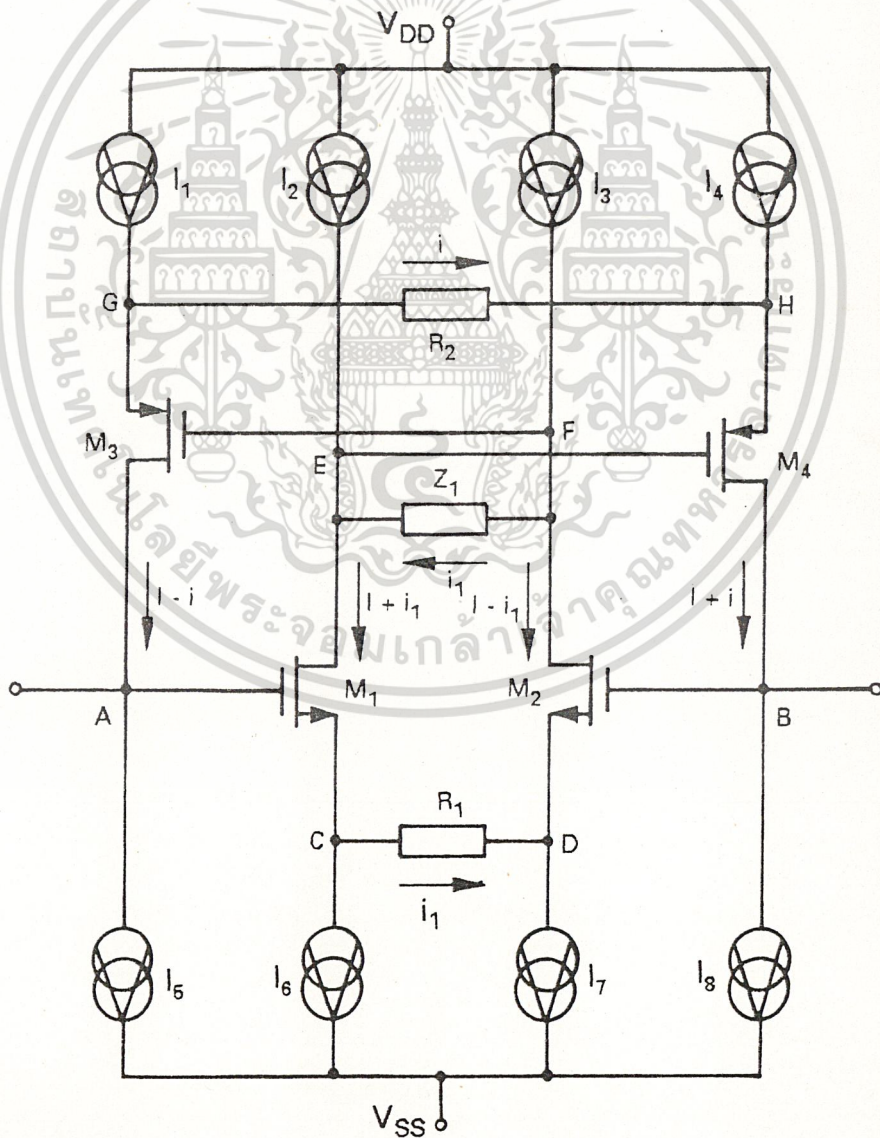
จากรูปที่ 3.4 แสดงถึงหลักการของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีคัทตาควบคุม และในการออกแบบวงจรในหัวข้อนี้ เมื่อแทนส่วนของวงจรเปลี่ยนคัทตาเป็นกระแสตามหลักการในหัวข้อ 3.3 จะได้วงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยวิธีคัทตาควบคุม ดังรูปที่ 3.6 โดยมอสเฟตทุกตัวที่ใช้ในการออกแบบวงจรเป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ (Enhancement Mode) และมีค่าของ  $V_{BS} =$  ศูนย์ (หรือ  $V_T = V_{TO}$ ) ทุกตัว

จากวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำดังรูปที่ 3.6 ประกอบด้วยมอสเฟตทั้งหมด 4 ตัว คือ  $M_1$  ถึง  $M_4$  และยังประกอบด้วยตัวเก็บประจุ  $C_1$  จำนวน 1 ตัว ตัวต้านทาน 2 ตัว คือ  $R_1$  และ  $R_2$  และแหล่งจ่ายกระแสคงที่ 8 ตัว คือ  $I_1$  ถึง  $I_8$  โดยที่  $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = I_7 = I_8 = I$  โดยที่มอสเฟตทุกตัวจะถูกไบอัสให้ทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation Region)

### 3.3.4 การทำงานของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดผลต่างศักย์ที่จุด A และ B ดังนั้นไม่มีกระแสไหลผ่าน ความต้านทาน  $R_1$  เป็นผลให้กระแสเดรนของ  $M_1$  และ  $M_2$  ซึ่งถูกไบอัสโดยแหล่งจ่ายกระแสคงที่มีค่าเท่ากับ  $I$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหล  $i_1$  ผ่าน  $Z_1$  และไม่มีกระแส  $i$  ไหลผ่าน  $R_2$  เช่นกัน แต่เมื่อป้อนศักย์ที่จุด A และ B โดยให้ศักย์ที่จุด A มากกว่าจุด B ทำให้เกิดผลต่างศักย์ที่จุด C และ D เป็นผลให้กระแส  $i_1$  ไหลผ่าน  $R_1$  เป็นผลให้เกิดกระแสเดรนของมอสเฟต  $M_1$  เปลี่ยนแปลงจาก  $I$  เป็น  $I+i_1$  และกระแสเดรนของมอสเฟต  $M_2$  เปลี่ยนแปลงจาก  $I$  เป็น  $I-i_1$  และเนื่องจาก  $Z_1$  ต่ออยู่ระหว่างขาเดรนทั้งสองของมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  จึงเกิดกระแส  $i_1$  ไหลผ่าน  $Z_1$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.6 วงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำใช้วิธีศักย์ควบคุม  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีซิงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(โดยกระแสไม่ไหลเข้าขาเกตของ  $M_3$  และ  $M_4$  เนื่องจากคุณสมบัติของมอสเฟตที่อินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก) จึงทำให้มีศักดาผลต่างชั้นที่  $Z_1$  ซึ่งศักดา ณ จุดนี้คือศักดาที่ขาเกตทั้งสองของมอสเฟต  $M_3$  และ  $M_4$  ซึ่งเป็นชนิด P ก็จะทำให้การเปลี่ยนศักดาตกร่วม  $Z_1$  เป็นกระแส  $i$  ไหลผ่าน  $R_2$  โดยไหลออกจากขาซอร์ส ของ  $M_3$  ยังผลให้กระแสเดรนของ  $M_3$  เปลี่ยนแปลงจาก  $I$  เป็น  $I-i$  และกระแสเดรน  $M_4$  เปลี่ยนแปลงจาก  $I$  เป็น  $I+i$  และเนื่องจากแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I$  ต่ออยู่ที่จุด A และ B เป็นผลให้เกิดกระแส  $i$  ไหลเข้าที่จุด A และไหลออกที่จุด B ดังนั้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของศักดาที่จุด A และ B กับกระแส  $i$  สามารถวิเคราะห์ค่าชดลวดเหนี่ยวนำเสมือนที่เกิดขึ้นได้ตามหลักการที่นำเสนอไว้ ส่วนการวิเคราะห์ จะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 3.4.1

### 3.4 การวิเคราะห์หาคคุณสมบัติของวงจรทางทฤษฎี

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติ ของวงจรเลียนแบบชดลวดเหนี่ยวนำเพื่อพิจารณาอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) ค่าความเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance) ความถี่ปฏิบัติการ (Frequency Response) และค่าคิวแฟกเตอร์ (Quality Factor or Q-Factor) ช่วงศักดาและกระแสปฏิบัติการ (Dynamic Range) ของชดลวดเหนี่ยวนำเสมือน

#### 3.4.1 การวิเคราะห์อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

การวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาอินพุทอิมพีแดนซ์และเพื่อยืนยันหลักการที่นำเสนอจะทำการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี วิธีหนึ่ง คือวิเคราะห์โดยพิจารณาคุณสมบัติของกระแส และศักดาจากวงจรรูปที่ 3.6 และวิธีที่สองวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal - Analysis) [25] โดยวิเคราะห์จากวงจรที่ดัดเทียม (Equivalent Circuit) ของวงจรรูปที่ 3.6

วิเคราะห์โดยใช้วิธีที่หนึ่ง การวิเคราะห์อินพุทอิมพีแดนซ์โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของศักดาที่จุด A และ B และ กระแส  $i$  ซึ่งจะทำให้วิเคราะห์ค่าชดลวดเหนี่ยวนำเสมือนที่เกิดขึ้นได้จากวงจรรูปที่ 3.6 สามารถวิเคราะห์ได้โดยพิจารณาจุด A และ B จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{AB} = V_{GS1} - V_{GS2} + iR_1 \quad (3.19)$$

พิจารณาที่จุด E จะได้

$$V_{FE} = V_{GS4} - V_{GS3} + iR_2 \quad (3.20)$$

โดยที่

$$V_{FE} = i_1 Z_1 \quad (3.21)$$

นำสมการที่ (3.21) แทนในสมการที่ (3.20) จะได้

$$i_1 Z_1 = V_{GS4} - V_{GS3} + iR_2 \quad (3.22)$$

นำสมการที่ (3.22) แทนในสมการที่ (3.19) จะได้

$$V_{AB} = \frac{V_{GS1} - V_{GS2} + \frac{R_1 V_{GS4}}{Z_1} - \frac{V_{GS3} R_1}{Z_1} + \frac{iR_2 R_1}{Z_1}}{Z_1} \quad (3.23)$$

จากสมการของมอสเฟตที่ทำการงานในช่วงอิ่มตัวตั้งสมการที่ (2.16) จะมีค่าของกระแสเดรนเป็น

$$i_D = \frac{K' W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$= \frac{B(V_{GS} - V_T)^2}{2} \quad ; 0 < V_{GS} - V_T < V_{DS} \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ดังนั้นเราสามารถกำหนด  $V_{GS}$  ในกรณีทั่วไปได้โดย  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{GS1} = \sqrt{\frac{2i_{D1}}{B_1}} + V_{T1} \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2 \quad (3.25)$$

เช่นเดียวกัน

$$V_{SGJ} = \sqrt{\frac{2i_{DJ}}{B_j}} + |V_{Tj}| \quad \text{โดยที่ } j = 3, 4 \quad (3.26)$$

นำสมการที่ (3.25) และ (3.26) แทนในสมการที่ (3.23) จะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{2i_{D1}}{B_1}} + V_{T1} - \sqrt{\frac{2i_{D2}}{B_2}} - V_{T2} + \frac{R_1}{Z_1} \sqrt{\frac{2i_{D4}}{B_4}} + |V_{T4}| - \frac{R_1}{Z_1} \sqrt{\frac{2i_{D3}}{B_3}} - |V_{T3}| + \frac{iR_2R_1}{Z_1} \quad (3.27)$$

และจากวงจรเราทราบว่า

$$i_{D1} = I + i_1 \quad (3.28)$$

$$i_{D2} = I - i_1 \quad (3.29)$$

$$i_{D3} = I - i \quad (3.30)$$

$$i_{D4} = I + i \quad (3.31)$$

และสมมติให้  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  และ  $M_4$  มีความสัมพันธ์กันมากดังนี้

$$B_1 = B_2 = B_3 = B_4 = B \quad (3.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $V_{T1} = V_{T2}$ ,  $|V_{T4}| = |V_{T3}|$  (3.33)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (3.28) ถึงสมการที่ (3.31) และสมการที่ (3.32) สมการที่ (3.33) ในสมการที่ (3.27) จะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{2(I+i_1)}{B}} - \sqrt{\frac{2(I-i_1)}{B}} + \frac{R_1}{Z_1} \sqrt{\frac{2(I+i)}{B}} - \frac{R_1}{Z_1} \sqrt{\frac{2(I-i) + iR_2R_1}{B Z_1}} \quad (3.34)$$

จากสมการที่ (3.34) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะประมาณค่า โดยอาศัยคุณสมบัติของฟังก์ชันการกระจาย [26] ดังนี้คือ

$$\sqrt{1+X} = 1 + X/2 \quad \text{สำหรับที่} \quad X \ll 1 \quad (3.35)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (3.34) และ (3.35) จะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{2I}{B}} \left[ \left(1 + \frac{i_1}{2I}\right) - \left(1 - \frac{i_1}{2I}\right) \right] + \frac{R_1}{Z_1} \sqrt{\frac{2I}{B}} \left[ \left(\frac{1+i}{2I}\right) - \left(\frac{1-i}{2I}\right) \right] + \frac{iR_1R_2}{Z_1} \quad (3.36)$$

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{2I}{B}} \left(\frac{i_1}{I}\right) + \frac{R_1}{Z_1} \sqrt{\frac{2I}{B}} \left(\frac{i}{I}\right) + \frac{iR_1R_2}{Z_1} \quad (3.37)$$

$$V_{AB} = \frac{2i}{IBZ_1} + \sqrt{\frac{2}{IB} \left( \frac{R_1+R_2}{Z_1} \right)} i + \frac{R_1R_2i}{Z_1} \quad (3.38)$$

ดังนั้นอินพุตแอมป์เตนซ์ที่สังเกตที่จุด A และ B คือ

$$Z_{in} = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{1}{Z_1} \left[ \frac{2}{IB} + \sqrt{\frac{2}{IB} \left( \frac{R_1+R_2}{Z_1} \right)} + \frac{R_1R_2}{Z_1} \right] \quad (3.39)$$

จากสมการที่ (3.39) เป็นอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรรูปที่ 3.6 จะเห็นว่า ถ้าเรากำหนดให้  $Z_1 = R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  และ  $K = 1 \times 10^{-4} \text{ A/V}^2$  และ  $I = 1 \text{ mA}$  จะได้ค่าของอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $13.03 \text{ k}\Omega$

วิเคราะห์ที่วิธีที่สอง โดยใช้การวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal - Analysis) โดยการเขียนวงจรทดเทียบ (Equivalent Circuit) ของวงจรรูปที่ 3.6 ซึ่งวงจรทดเทียบเขียนได้ดังรูปที่ 3.7

จากวงจรดังรูปที่ 3.7 พิจารณาที่จุด (Node) ต่าง ๆ โดยใช้กฎของ KCL สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ที่จุด A จะได้

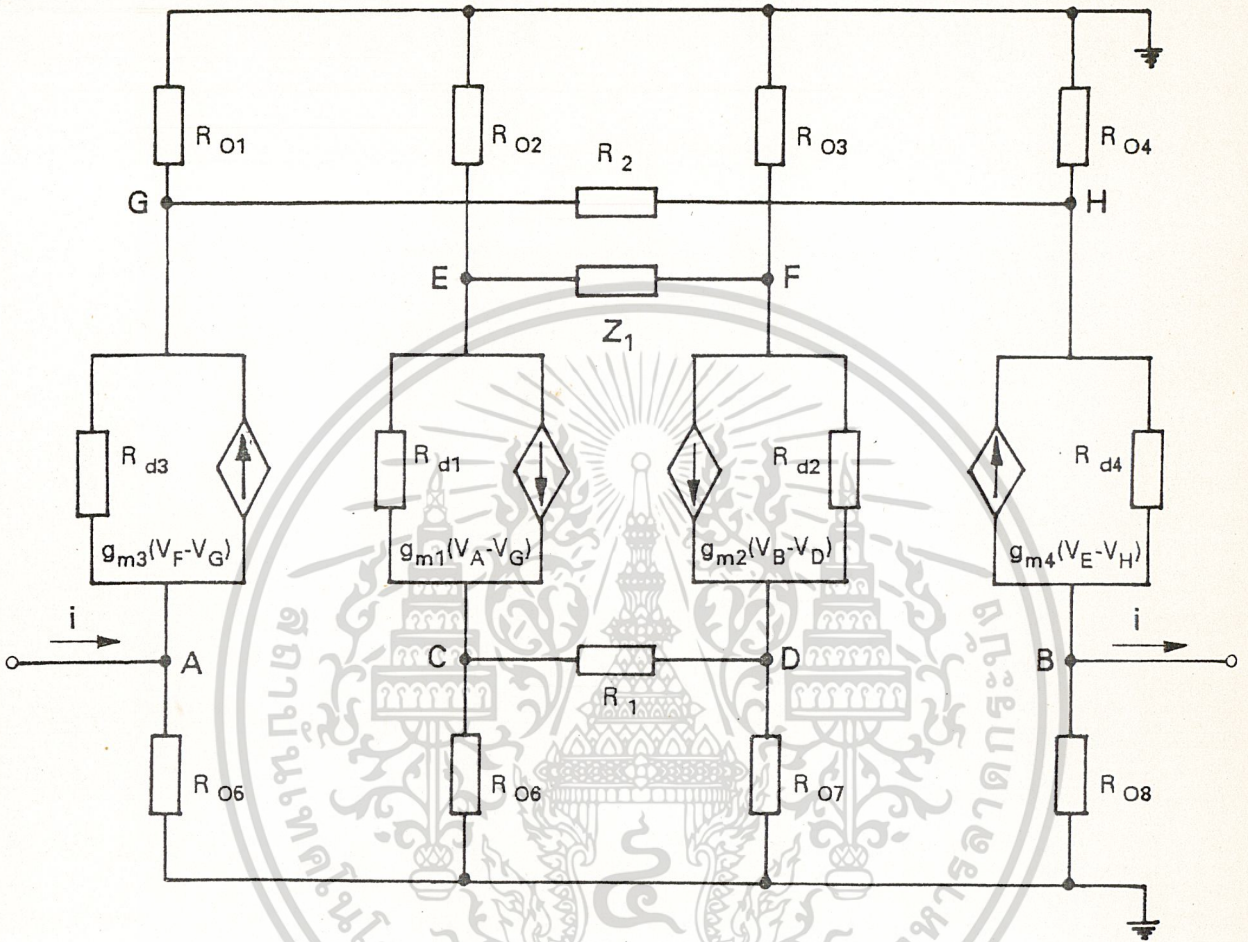
$$\left( \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_O} \right) V_A - \frac{1}{R_{d3}} V_G + g_{m3} (V_F - V_G) = 0 \quad (3.40)$$

ที่จุด C จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_O} + \frac{1}{R_1} \right) V_C - \frac{1}{R_1} V_D - \frac{1}{R_{d3}} V_E - g_{m1} (V_A - V_C) = 0 \quad (3.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ที่จุด D จะได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left( \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{o1}} + \frac{1}{R_1} \right) V_D - \frac{1}{R_1} V_C - \frac{1}{R_{d2}} V_F - g_{m2}(V_B - V_D) - i = 0 \quad (3.42)$$



รูปที่ 3.7 วงจรตัดเทียบวงจรเขียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำรูปที่ 3.6

ที่จุด B จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{o8}} + \frac{1}{R_{d4}} \right) V_B - \frac{1}{R_{d4}} V_H + g_{m4}(V_E - V_H) + i = 0 \quad (3.43)$$

ที่จุด G จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{o1}} \right) V_G - \frac{1}{R_{d3}} V_A - \frac{1}{R_2} V_H - g_{m3}(V_F - V_G) = 0 \quad (3.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุด E จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{O2}} + \frac{1}{Z_1} \right) V_E - \frac{1}{Z_1} V_F - \frac{1}{R_{d4}} V_C + g_{m1} (V_A - V_C) = 0 \quad (3.45)$$

ที่จุด F จะได้

$$\left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{O3}} \right) V_F - \frac{1}{Z_1} V_E - \frac{1}{R_{d2}} V_D + g_{m2} (V_B - V_D) = 0 \quad (3.46)$$

ที่จุด H จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{O4}} + \frac{1}{R_2} \right) V_H - \frac{1}{R_2} V_G - \frac{1}{R_{d4}} V_B - g_{m4} (V_E - V_H) = 0 \quad (3.47)$$

จากสมการที่ (3.40) ถึง (3.47) เมื่อกำหนดให้  $1/R_O \ll 1/R_2$  และ  $1/R_d \ll 1/R_2$  ดังนั้นให้  $1/R_O = 1/R_d = 0$  และได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่จุด A และ B ได้คือ

$$Z_{in} = \frac{(R_2 g_{m3} + 2)(R_1 g_{m1} + 2)}{Z_1 g_{m2} g_{m4}} \quad (3.48)$$

จากการวิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่จุด A และ B จะได้ผลดังสมการที่ (3.48) และทดลองแทนค่าโดยเลือกใช้  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_1 = R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $g_m = 1.28 \times 10^{-3} \text{ A/V}$  และ  $R_{d4} = 100 \text{ k}\Omega$  แทนในสมการที่ (3.48) ได้ค่า  $Z_{in} = 13.37 \text{ k}\Omega$  จะเห็นว่าที่คำนวณได้ในสมการที่ (3.39) และสมการที่ (3.48) จะมีค่าใกล้เคียงกัน

### 3.4.2 การวิเคราะห์หาค่าอินตักทีฟรีแอกแตนซ์และค่าความเหนี่ยวนำเสมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากอิมพีแดนซ์ในสมการที่ (3.39) ใช้

และสมการที่ (3.48) ถ้าเราพิจารณาสมการทั้งสองจะเห็นว่าถูกหารด้วย  $Z_1$  และจากวงจรถ้าเราต่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  แทน  $Z_1$  ดังนั้น ค่าของ  $Z_1$  ในสมการที่ (3.39) และสมการที่ (3.48) ก็จะเป็นค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (Capacitive Reactance) หรือ  $1/SC_1$  และเขียนสมการทั้งสองใหม่ดังสมการที่ (3.49) และสมการที่ (3.50)

$$Z_{Leq} = SC_1 \left[ \frac{2}{IB} + \sqrt{\frac{2}{IB} (R_1 + R_2)} + R_1 R_2 \right] \quad (3.49)$$

และ

$$Z_{Leq} = \frac{SC_1 (R_2 g_{m3} + 2) (R_1 g_{m1} + 2)}{g_{m2} g_{m4}} \quad (3.50)$$

จากเราทราบว่าค่าที่ได้นั้น เหมือนเป็นค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) คือ  $X_L = SL$  ดังนั้นจากสมการที่ (3.49) และ สมการที่ (3.50) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเสมือน (Equivalent Inductance) เขียนย่อว่า  $L_{eq}$  ดังนี้คือ

$$L_{eq} = C_1 \left[ \frac{2}{IB} + \sqrt{\frac{2}{IB} (R_1 + R_2)} + R_1 R_2 \right] \quad (3.51)$$

และ

$$L_{eq} = \frac{C_1 (R_2 g_{m3} + 2) (R_1 g_{m1} + 2)}{g_{m2} g_{m4}} \quad (3.52)$$

ตัวอย่างเช่นถ้าเรากำหนด  $K' = 1 \times 10^{-4} \text{ A/V}^2$  ,  $W/L = 100/10$   
 $C_1 = 1 \text{ nF}$  ,  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  แหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I = 1 \text{ mA}$  ดังนั้น เราสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำเสมือน  $L_{eq} = 130.3 \text{ mH}$  เช่นเดียวกัน จากสมการที่ (3.52) ถ้ากำหนดให้

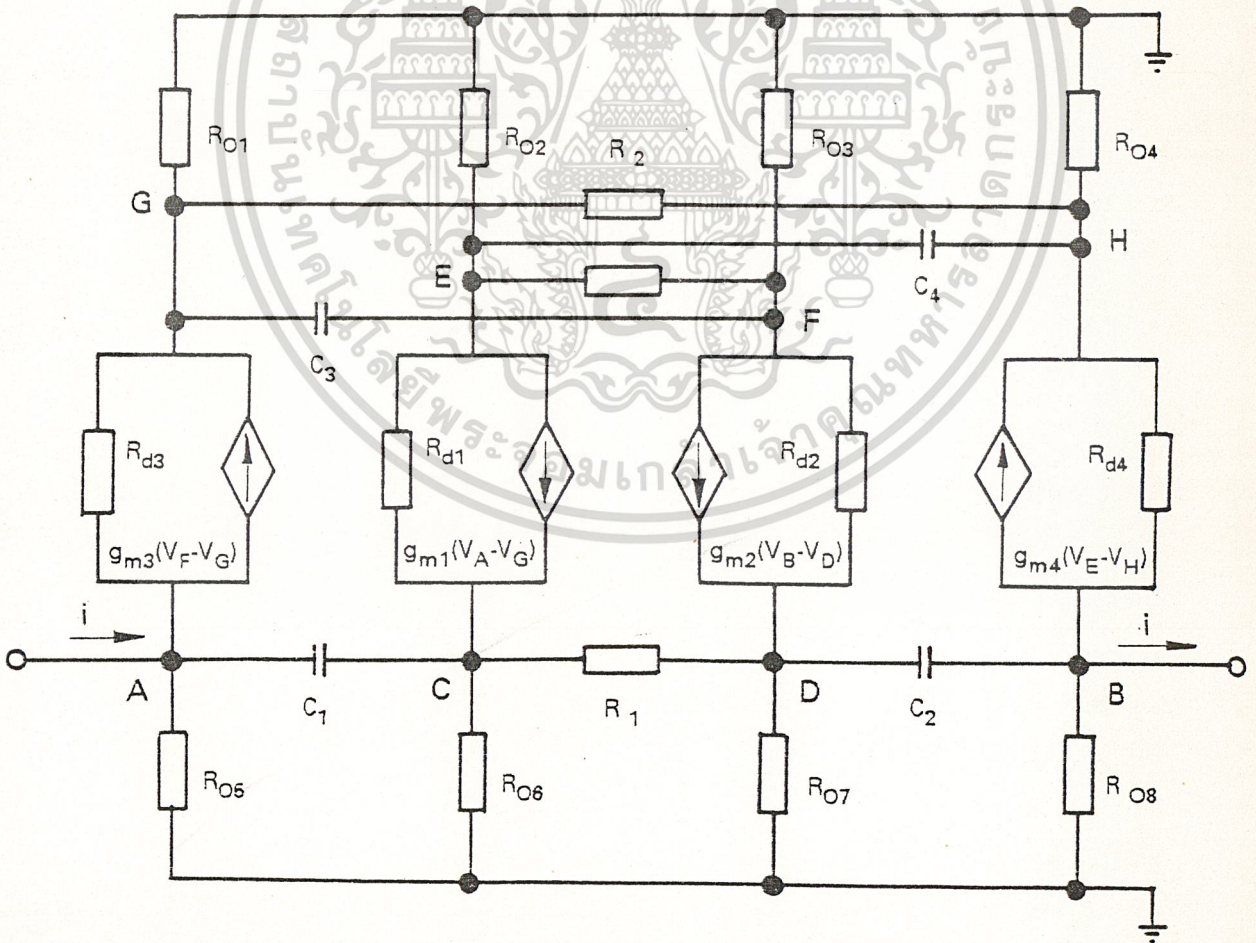
$g_m = 1.28 \times 10^{-3} \text{ A/V}$  แล้วจะได้  $L_{eq} = 133 \text{ mH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การวิเคราะห์หาความถี่ปฏิบัติการ (Frequency Response)

ในการใช้งานของขดลวดเหนี่ยวนำเสมือนที่ได้นั้นจะมีผลตอบสนองต่อความถี่ที่ถูกจำกัด เนื่องจากค่าของความจุไฟฟ้าสเตรย์ (Stray Capacitances) ที่เกิดขึ้นระหว่างขาทะและขอร์สของมอสเฟต ( $C_{GS}$ ) ตัวใด ๆ แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์หาความถี่ปฏิบัติการของวงจรนั้นเนื่องจากการวิเคราะห์วงจรเพื่อหาความถี่ปฏิบัติการนั้น ไม่สามารถวิเคราะห์ขณะที่แทน  $Z_1$  ด้วยตัวเก็บประจุ  $C_1$  ได้เพราะจะทำให้การพิจารณายุ่งยากมาก ดังนั้นในการพิจารณาอัตราการตอบสนองความถี่ของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ เราสามารถพิจารณาการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรได้โดยพิจารณาในลักษณะของอิมพีแดนซ์โดยกำหนดให้  $Z_1 = R_1 = 10\text{ k}\Omega$  แล้วทำการวิเคราะห์วงจรเพื่อหาช่วงความถี่ปฏิบัติการ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Analysis) โดยในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์หาผลตอบสนองต่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.8 วงจรที่ดัดแปลงของ วงจร เลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำรูปที่ 3.6  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ของอิมพีแดนซ์ที่จุด A และ B ซึ่งสามารถกระทำได้โดยเขียนวงจรที่เทียบของวงจรในรูปที่ 3.6 ได้ดังรูปที่ 3.8

จากวงจรในรูปที่ 3.8 พิจารณาที่จุดต่าง ๆ โดยใช้กฎ KCL สร้างเป็นสมการดังนี้  
ที่จุด A จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_{o5}} + SC_1 \right) V_A - \frac{1}{R_{d3}} V_G - SC_1 V_C + g_{m3} (V_F - V_G) - i = 0 \quad (3.53)$$

ที่จุด C จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{o8}} + \frac{1}{R_1} + SC_1 \right) V_C - SC_1 V_A - \frac{1}{R_1} V_D - \frac{1}{R_{d3}} V_E - g_{m1} (V_A - V_C) = 0 \quad (3.54)$$

ที่จุด D จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{o1}} + \frac{1}{R_1} + SC_2 \right) V_D - SC_2 V_B - \frac{1}{R_1} V_C - \frac{1}{R_{d2}} V_F - g_{m2} (V_B - V_D) = 0 \quad (3.55)$$

ที่จุด B จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{o8}} + \frac{1}{R_{d4}} + SC_2 \right) V_B - \frac{1}{R_{d4}} V_H - SC_2 V_D + g_{m4} (V_E - V_H) + i = 0 \quad (3.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left( \frac{1}{R_{d3}} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{o1}} + SC_3 \right) V_G - SC_3 V_F - \frac{1}{R_{d3}} V_A - \frac{1}{R_2} V_H - g_{m3}(V_F - V_G) = 0 \quad (3.57)$$

ที่จุด G จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{o2}} + \frac{1}{Z_1} + SC_4 \right) V_E - SC_4 V_H - \frac{1}{Z_1} V_F - \frac{1}{R_{d4}} V_C + g_{m1}(V_A - V_C) = 0 \quad (3.58)$$

ที่จุด F จะได้

$$\left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{o3}} + SC_3 \right) V_F - SC_3 V_G - \frac{1}{Z_1} V_E - \frac{1}{R_{d2}} V_D + g_{m2}(V_B - V_D) = 0 \quad (3.59)$$

ที่จุด H จะได้

$$\left( \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{o4}} + SC_4 \right) V_H - SC_4 V_E - \frac{1}{R_2} V_G - \frac{1}{R_{d4}} V_B - g_{m4}(V_E - V_H) = 0 \quad (3.60)$$

จากสมการที่ (3.53) ถึงสมการที่ (3.60) กำหนดให้  $1/R_d \ll 1$  และ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $1/R_o \ll 1$  ดังนั้นโดยการแทนค่า  $1/R_d \cong 1/R_o \cong 0$  เราสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ที่จุด A  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

และ B ได้คือ

$$Z_{in}(S) = Z_M \frac{[a]S^2 + [b]S + 1}{[c]S^2 + [d]S + 1} \quad (3.61)$$

โดยที่

$$Z_M = \frac{(g_{m1}R_1+2)(g_{m3}R_2+2)}{g_{m2}g_{m4}Z_1} \quad (3.62)$$

$$[a] = \frac{C_1C_3R_1R_2}{(g_{m1}R_1+2)(g_{m3}R_2+2)} \quad (3.63)$$

$$[b] = \frac{C_1R_1(g_{m3}R_2+2)+C_3R_2(g_{m1}R_1+2)}{(g_{m1}R_1+2)(g_{m3}R_2+2)} \quad (3.64)$$

$$[c] = \frac{C_4C_2}{g_{m2}g_{m4}} \quad (3.65)$$

$$[d] = \frac{C_2g_{m2}+C_2g_{m4}}{g_{m2}g_{m4}} \quad (3.66)$$

จากสมการที่ (3.61) เราสามารถพิจารณาค่าของโพล (Pole) และซีโร (Zero) เพื่อหาค่าโพล และซีโร ที่ทำให้เกิดความถี่คutoff (Cutoff frequency) ซึ่งจากการพิจารณาสมการที่ (3.62) ถึงสมการที่ (3.66) จะได้ค่าของซีโรและโพลตามสมการที่ (3.67) สมการที่ (3.68) และ สมการที่ (3.69) สมการที่ (3.70) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{z1} = \frac{1}{27} \cdot \frac{(g_{m1}R_1+2)(g_{m3}R_2+2)}{C_1R_1(g_{m3}R_1+2)+C_3R_2(g_{m1}R_1+2)} \quad (3.67)$$

$$f_{z2} = \frac{1}{27} \cdot \frac{C_1R_1(g_{m3}R_2+2)+C_3R_2(g_{m1}R_1+2)}{C_1C_3R_1R_2} \quad (3.68)$$

$$f_{p1} = \frac{1}{27} \cdot \frac{g_{m2}g_{m4}}{C_1g_{m2}+C_2g_{m4}} \quad (3.69)$$

$$f_{p2} = \frac{1}{27} \cdot \frac{C_1g_{m2}+C_2g_{m4}}{C_4C_2} \quad (3.70)$$

จากสมการที่ (3.61) พบว่า  $Z_{in}$  มีค่าประมาณ  $Z_M$  โดยค่าดังกล่าวจะมีผลขึ้นกับค่า โพลที่เด่นที่สุด ตามสมการที่ (3.69) ซึ่งค่าของ โพลที่เด่นที่สุดดังกล่าวจะเป็นตัวแสดงขีดจำกัดในการตอบสนองต่อความถี่ซึ่งมีค่าประมาณ  $f_{p1}$  เช่นถ้าในวงจรมีค่าของ  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 5 \text{ pF}$  และค่า  $g_{m1} = g_{m2} = g_{m3} = g_{m4} = 1.28 \times 10^{-3} \text{ A/V}$  ดังนั้นจะได้ค่า  $f_{p1}$  มีค่าประมาณ 20 MHz ดังนั้นผลการตอบสนองความถี่ของวงจรจะมีค่าประมาณ 20 MHz

#### 3.4.4 การวิเคราะห์หาค่าคิวแฟกเตอร์ (Quality Factor)

ในทางทฤษฎีจะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำที่เสียนแบบขึ้นตามสมการที่ (3.61) และสมการที่ (3.62) นั้นเป็นค่าความเหนี่ยวนำเชิงอุดมคติจะมีค่าคิวแฟกเตอร์เป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดค่าคิวเนื่องมาจากความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุ โดยความต้านทานดังกล่าวจะกำหนดเป็น  $R_C$  ซึ่งชานานอยู่กับตัวเก็บประจุที่เป็นตัวเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ ( $C_1$ ) ดังนั้นจากสมการที่ (3.60) เราสามารถพิจารณาค่า คิวแฟกเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติได้ดังนี้

$$Z_{Leq} = 1 + SC_1R_C \frac{(g_{m3}R_2+2)(g_{m1}R_1+2)}{g_{m2}g_{m4}} \quad (3.71)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยการศึกษาค้นคว้าเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

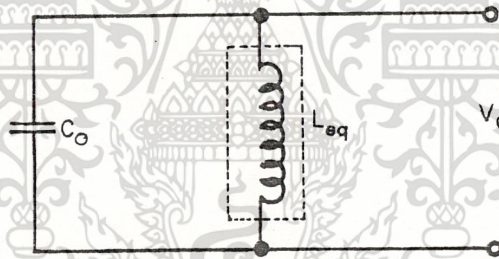
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และสิ่งอื่นข้างอึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเขียนใหม่ได้เป็น

$$Z_{Leq} = \frac{(g_{m3}R_2+2)(g_{m1}R_1+2)}{R_C g_{m2} g_{m4}} + j\omega C_1 \frac{(g_{m3}R_2+2)(g_{m1}R_1+2)}{g_{m2} g_{m4}} \quad (3.72)$$

และการหาค่า Q นั้นเราสามารถพิจารณาจากสมการที่ (3.72) โดยพิจารณาจาก วงจรรีโซแนนซ์ (Resonant Circuit) ได้ [3] ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 โดยเป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานและความถี่รีโซแนนซ์จะได้ตามสมการที่ (3.73)

$$W = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C}} \quad (3.73)$$



รูปที่ 3.9 วงจร LC รีโซแนนซ์

ดังนั้นถ้าพิจารณาขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการเขียนแบบในเชิงอุดมคติแล้วค่า W เท่ากับสมการที่ (3.74)

$$W \cong \frac{1}{\sqrt{\frac{C_1 (g_{m3}R_2+1)(g_{m1}R_1+2)C_o}{g_{m2}g_{m4}}}} \quad (3.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนและค่าค่าแฟ้มเตอร์จะมีค่านันต์กรณีนี้ขอขดลวดเหนี่ยวนำที่เขียนแบบขึ้นในทางค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิบัตินั้นจะเกิดค่าความต้านทานขึ้นเนื่องมาจากตัวต้านทานในตัวเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ดังกล่าวแล้วเราสามารถหาค่าคุณภาพหรือ ค่าคิวแฟกเตอร์ (Quality Factor or Q-Factor) หรือเขียนย่อเป็น Q ได้โดยพิจารณาจากสมการที่ (3.74) และสมการที่ (3.72) จะได้ ค่าคิวแฟกเตอร์คือ

$$Q \approx \frac{C_1 R_C}{\sqrt{\frac{C_1 (g_{m3} R_2 + 2) (g_{m4} R_1 + 2) C_o}{g_{m2} g_{m4}}}}} \quad (3.75)$$

และอาจเขียนใหม่ได้ตั้งสมการที่ (3.76)

$$Q \approx R_C \sqrt{\frac{g_{m2} g_{m4}}{(g_{m3} R_2 + 2) (g_{m1} R_1 + 2)}} \sqrt{\frac{C_1}{C_o}} \quad (3.76)$$

และจากสมการที่ (3.76) จะเห็นว่าค่า Q ในทางปฏิบัติขึ้นอยู่กับการใช้ตัวเก็บประจุโดยถ้าตัวเก็บประจุที่มีคุณภาพสูง (High Quality Capacitor) แล้วจะทำให้ค่า Q มีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

### 3.4.5 การวิเคราะห์หาค่ากระแสและศักดาปฏิบัติงาน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการพิจารณาค่าศักดาและกระแสปฏิบัติงาน โดยจะเริ่มจากการพิจารณาศักดาปฏิบัติงานและเพื่อความสะดวกจะแทน  $Z_1$  ด้วยความต้านทาน R และแทนแหล่งจ่ายกระแสคงที่ด้วยมอสเฟตที่มีการไบอัสให้กระแสไหลผ่านเท่ากับ I ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.10 ซึ่งพบว่าวงจรประกอบด้วยวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสสองวงจร และการทำงานเป็นลักษณะศักดาควบคุมดังนั้นศักดาปฏิบัติงานจะกระทำได้สูงสุดจะขึ้นอยู่กับวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสชุดแรกซึ่งมีมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  และ  $R_1$  แต่เนื่องจาก  $M_1$  และ  $M_2$  ถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่และสมมาตรกันจึงพิจารณาเฉพาะมอสเฟต  $M_1, M_{12}$  และ  $M_{16}$  เพื่อหาค่า  $V_{A(max)}$  และ  $V_{A(min)}$  ซึ่งเป็นค่าศักดาปฏิบัติงานสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นที่เกทของ  $M_1$  ซึ่งยังคงสามารถทำให้  $M_1$  ทำงานอยู่ในช่วงอิมตัวได้ ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าของศักดาปฏิบัติงานได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ศักดาปฏิบัติงาน} = V_{A(\max)} - V_{A(\min)} \quad (3.77)$$

พิจารณา  $V_{A(\max)}$  ได้จากวงจรดังรูปที่ 3.10 จะได้

$$V_{A(\max)} = V_{DD} - V_{DS12} - V_{DS1} - V_{GS1} \quad (3.78)$$

ถ้า  $M_1$  และ  $M_{12}$  ยังคงมีการทำงานในช่วงการทำงานอิ่มตัวแล้ว

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T \quad (3.79)$$

ดังนั้นจากเงื่อนไขในสมการที่ (3.79) จะได้

$$V_{A(\max)} = V_{DD} - \sqrt{\frac{2I}{B}} - 2\sqrt{\frac{2(I+i_1)}{B}} - V_{T1} \quad (3.80)$$

เช่นกันในการคำนวณหาค่า  $V_{A(\min)}$  นั้นค่านี้จะสวิงอยู่ในช่วงของ  $-V_{SS}$  โดยผ่านแหล่งจ่ายกระแส  $I_{16}$  จึงแทนด้วย  $M_{16}$  ดังรูปที่ 3.10 จะสามารถพิจารณา  $V_{A(\min)}$  ได้ดังนี้

$$V_{A(\min)} = V_{SS} + V_{DS16} + V_{GS1} \quad (3.81)$$

ถ้า  $M_1$  และ  $M_{16}$  ยังคงมีการทำงานช่วงการทำงานอิ่มตัวแล้ว จากสมการที่ 3.79 และ 3.81 จะได้

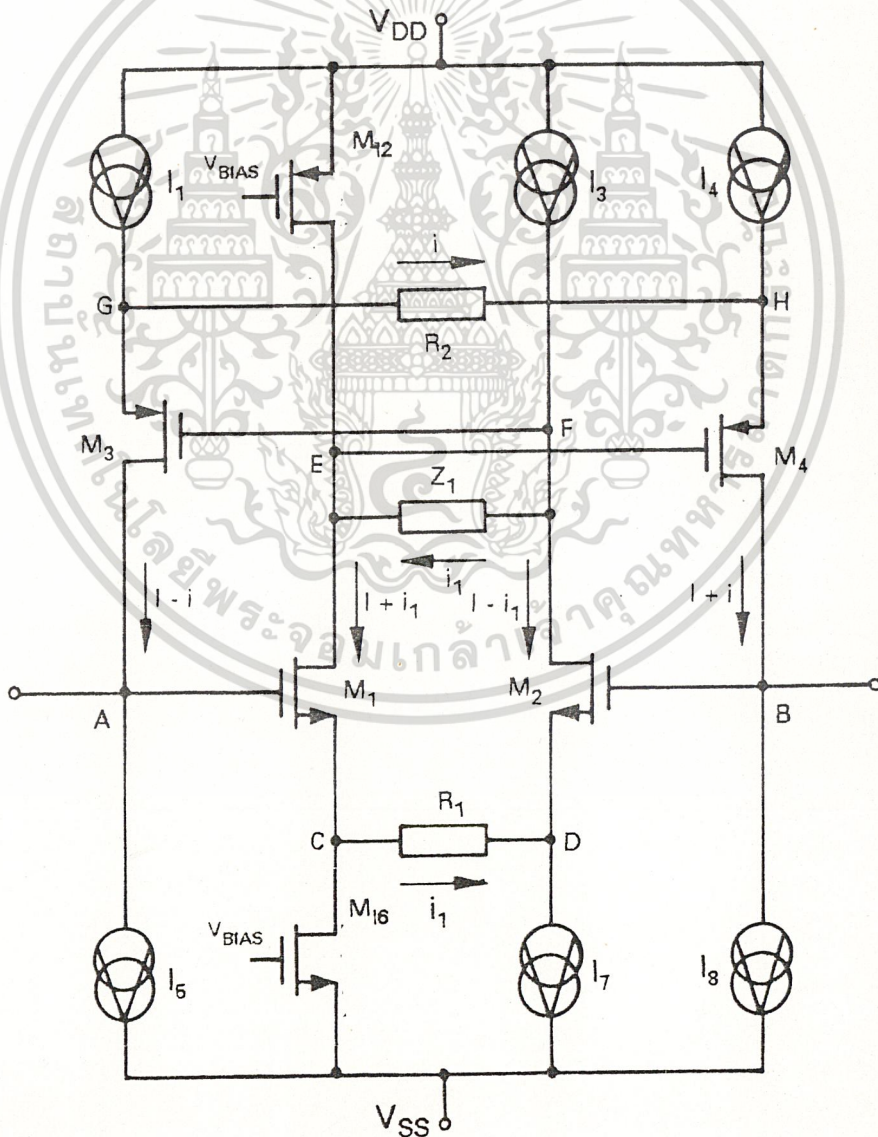
$$V_{A(\min)} = V_{SS} + \sqrt{\frac{2I}{B}} + \sqrt{\frac{2(I+i_1)}{B}} + V_{T1} \quad (3.82)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.77) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ศักดาปฏิบัติงาน} = V_{DD} - V_{SS} - 2 \sqrt{\frac{2I}{B}} - 3 \sqrt{\frac{2(I+i_1)}{B}} - 2V_{T1} \quad (3.83)$$

จากสมการที่ (3.83) พบว่าค่าศักดาปฏิบัติงานจะขึ้นอยู่กับค่าแหล่งจ่ายคองที่และอัตราส่วนของ W/L โดยถ้าเลือกออกแบบแหล่งจ่ายกระแสคองที่ให้ค่าน้อย และได้อัตราส่วนของ W/L ให้มากขึ้นจะทำให้ค่าศักดาปฏิบัติงานกว้างขึ้น เช่นถ้าในการออกแบบวงจรเลือกใช้  $V_{DD} = 10 \text{ V}$  ,  $V_{SS} = -10 \text{ V}$  และใช้กระแส  $I = 1 \text{ mA}$  ,  $V_{T1} = 2 \text{ V}$  ,  $K' = 1 \times 10^{-4} \text{ A/V}^2$  และ  $W/L = 100/10$  ทำให้ช่วงศักดาปฏิบัติงานของวงจรได้อยู่ในช่วงไม่เกิน  $\pm 4 \text{ Vp}$  หรือ  $8 \text{ Vp-p}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.10 แสดงวงจรที่ใช้พิจารณากระแสและศักดาปฏิบัติงาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการพิจารณากระแสปฏิบัติงานเราจะพิจารณาจากกระแส  $i, i_1$  และ  $I$  ของวงจร จากวงจรพิจารณาที่จุด  $C$  และ  $D$  จะพบว่าถ้าหากผลต่างกระแส  $i_1$  ที่ไหลผ่าน  $R_1$  มีค่ามากขึ้น เท่ากับ  $I$  จะทำให้กระแสเดรนของ  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นศูนย์ได้ดังนั้นจะเป็นผลให้วงจรเปลี่ยนศักดา เป็นกระแสวงจรถัดไปสองไม่ทำงานก็จะไม่มีกระแส  $i$  เกิดขึ้นดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่า

$$I_{D1} = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad i_1 = -1 \quad (3.84)$$

$$I_{D2} = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad i_1 = 1 \quad (3.85)$$

จากสมการที่ (3.84) และ (3.85) จึงสามารถสรุปได้ว่า กระแสปฏิบัติงาน ของวงจรคือ

$$-I < i_1 < I \quad (3.86)$$

จากสมการที่ (3.86) จากวงจรจะใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I$  เท่ากับ  $1\text{mA}$  ดังนั้น ช่วงกระแสปฏิบัติงานของวงจรจะอยู่ในช่วง  $-1\text{mA} < i < 1\text{mA}$

### 3.5 การทดลองและผลการทดลอง

ในการออกแบบวงจรตามหลักการที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น เพื่อเป็นการทดสอบและยืนยันว่าวงจรที่ได้ทำการออกแบบขึ้นดังกล่าวนี้ สามารถทำงานได้ตามหลักการที่ได้เสนอขึ้นมาและมีคุณสมบัติของวงจรเป็นไปตามที่คาดหมายไว้ในส่วนการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์และทดลองการทำงานของวงจร และในการวิเคราะห์และทดลองการทำงานของวงจรนี้สามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ วิธีที่หนึ่ง โดยการทดลองต่อวงจรโดยนำอนุภาคต่างๆ ตามวงจรที่ได้ออกแบบมาต่อกันแบบดีสครีทบน โพรโตบอร์ดหรือแผ่น PCB และป้อนแรงดันศักดาไฟจ่ายวงจรและป้อนศักดาสัญญาณหรือกระแสสัญญาณให้กับวงจร และวัดค่าศักดาหรือกระแสสัญญาณที่ ส่วนต่าง ๆ ของวงจร และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างศักดา และกระแสที่ส่วนต่าง ๆ ของวงจร แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อเป็นการ

แสดงให้เห็นว่า วงจรที่ได้ออกแบบสามารถทำงานได้ตามหลักการที่ได้เสนอขึ้นมา และมีคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของวงจรเป็นไปตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ วิธีที่สอง กระทำได้โดยการนำวงจรที่ได้ออกแบบมาทำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

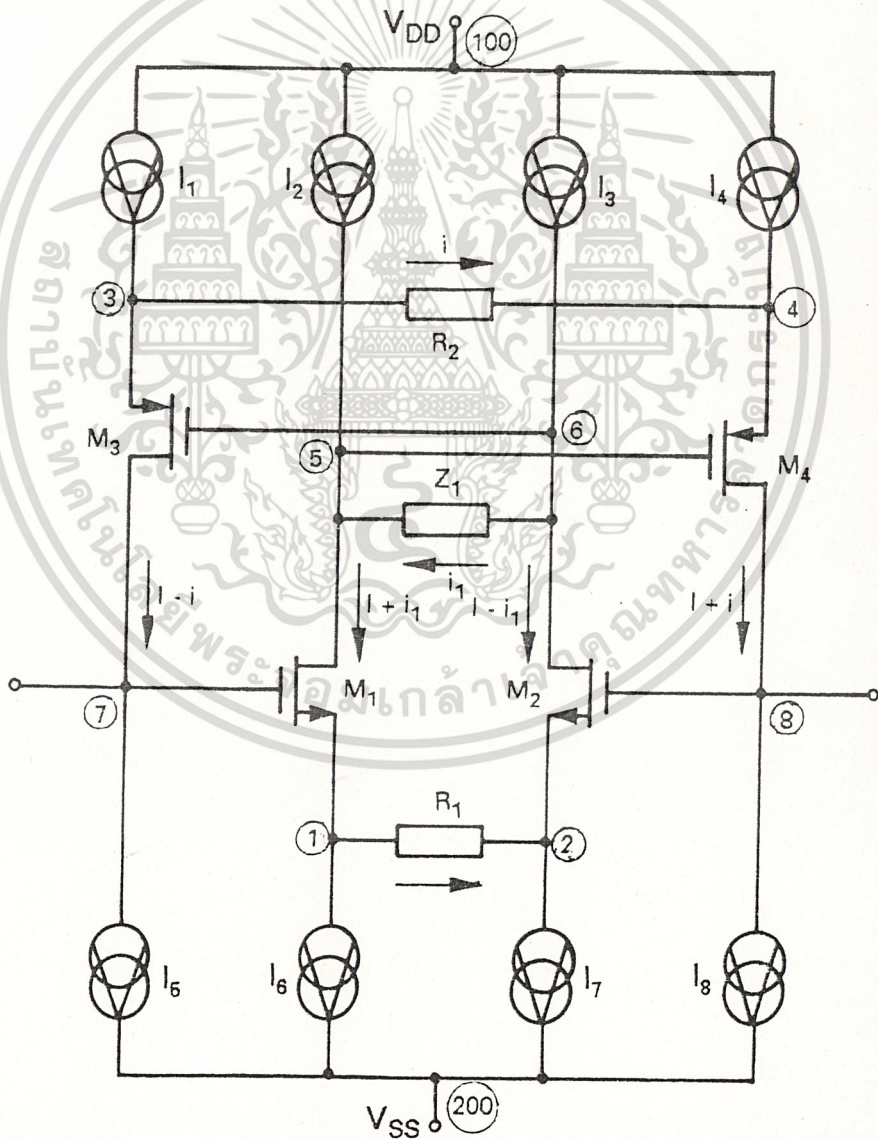
การวิเคราะห์และเลียนแบบการทำงานของวงจร โดยการใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า "P Spice" [13-14] เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีความสะดวกในการวิเคราะห์ และมีความแม่นยำสูงมาก โปรแกรมหนึ่งซึ่งกระทำการวิเคราะห์โดยการกำหนดรายละเอียดลักษณะการต่ออนุกรมในวงจร ตลอดจนสมการการทำงานของวงจรให้กับโปรแกรม P Spice ดังกล่าวจากนั้นทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรและแสดงผลในรูปแบบความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ต้องการตามลำดับและข้อกำหนดของโปรแกรม อย่างไรก็ตามการทดลองการทำงานของวงจร โดยการต่อวงจรแบบดีสครีท และการวิเคราะห์และเลียนแบบการทำงานของวงจร โดยใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์นั้น เพื่อเป็นการทดสอบและยืนยันว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามหลักการที่เสนอขึ้นมาซึ่งจะเห็นว่าวิธีทั้งสองดังกล่าว ต่างก็เป็นการเลียนแบบการทำงานของ วงจรที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม ผลจากการวิเคราะห์และการทดลองจะเป็นคุณสมบัติที่คาดหวังว่า จะนำหลักการที่นำเสนอขึ้นไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ แต่เนื่องจากคุณสมบัติและการทำงานของอนุกรมในวงจรที่ต่อแบบ ดีสครีท กับของอนุกรมที่สร้างได้ในวงจรรวมซึ่งยังมีข้อแตกต่างกันอยู่ทำให้การทดสอบคุณสมบัติของวงจร โดยการต่อวงจรทดลองแบบดีสครีท ไม่สามารถที่จะทดสอบคุณสมบัติของวงจรรวมได้ทุกประการ เช่น ความสัมพันธ์กันของมอสเฟตที่นำมาต่อกันแบบดีสครีท จะไม่สามารถทำให้เที่ยงตรงได้เท่ากับการสร้างเป็นวงจรรวมในเนื้อสารกึ่งตัวนำชิ้นเดียวกัน หรือในวงจรที่สร้างเป็นวงจรมาต่อกันแบบดีสครีท จะมีความจุไฟฟ้าสแตตที่ที่เกิดจากโพโร ไดโอรด์ แผ่นปริน และสายต่อ ทำให้ไม่สามารถหาผลตอบสนองต่อความถี่ที่แท้จริงได้ ดังนั้นคุณสมบัติของวงจรบางประการจึงต้องทำการวิเคราะห์และเลียนแบบการทำงานของวงจร โดยใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์เท่านั้น ในการวิเคราะห์และเลียนแบบการทำงานของวงจร โดยใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ความสามารถและความถูกต้องแม่นยำของการวิเคราะห์ และการเลียนแบบการทำงานของวงจรจะขึ้นอยู่กับความสามารถของ โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์และเลียนแบบการทำงานของวงจร

### 3.5.1 การทดลองเพื่อทดสอบอินพุทอิมพีแดนซ์ ของวงจรขณะแทน $Z_1$ ด้วยความต้านทาน

จากวงจรในรูปที่ 3.6 เป็นวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ เสนอขึ้นมาและเพื่อความสะดวกในการทดสอบ และการอ้างอิงจึงได้กำหนดค่าหมายเลขประจำจุด (Node) ทั้งหมดภายในวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.11 การทดลองเพื่อศึกษาความต้านทานของวงจรขณะแทน  $Z_1$

เอกสารด้วยค่าความต้านทานเพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรตามสมการที่ (3.51) ไปใช้ และ (3.52) ทรค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทำได้โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 3.12 แบบดิสครีทลงบนโพรโตบอร์ดหรือแผ่น PCB โดยที่มอสเฟตที่เป็นเอ็นมอส (N-MOS) หรือ พีมอส (P-MOS) ซึ่งเป็นชนิดเอ็นย้านเมทโดยนำมาจากมอสเฟตภายในไอซีเบอร์ MC14007 ซึ่งภายในจะประกอบด้วยเอ็นมอส และพีมอส อย่างละ 3 ตัว โดยจะต้องเลือกมอสเฟตให้มีคุณสมบัติที่สมพียงกันมากที่สุดนั่นคือ  $M_1, M_2, M_3$  และ  $M_4$  และค่าของแรงดันไฟฟ้าวิกฤติ ( $V_{TO}$ ) ขณะ  $V_{SB}$  เท่ากับศูนย์ NMOS และ PMOS ของไอซีเบอร์ MC 14007 จะมีค่าประมาณ 2.0 โวลต์ ส่วนวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่ทั้งหมดคือ  $I_1$  ถึง  $I_8$  ใช้ค่า

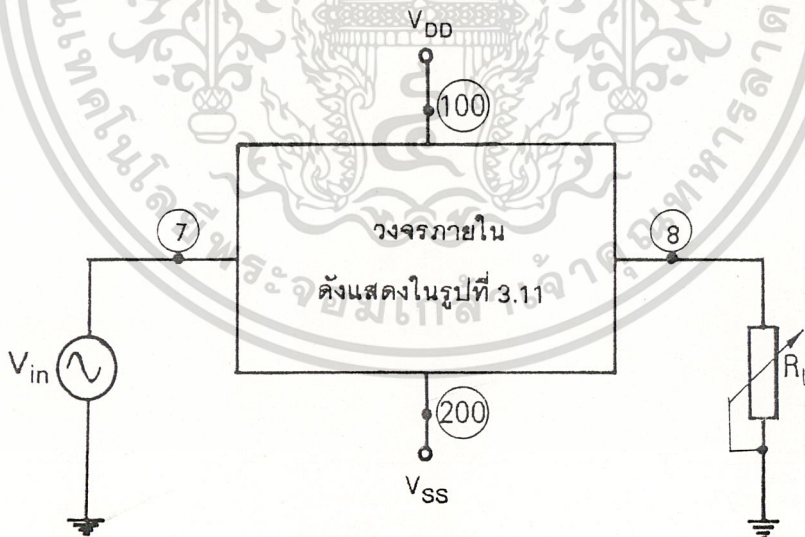


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.11 หรือแสดงหมายเลขประจำจุดทั้งหมดของวงจรรูปที่ 3.6 ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส  $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = I_7 = I_8 = 1\text{mA}$  และใช้  $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$  ส่วน  $Z_1 = 10\text{ k}\Omega$  และใช้แรงดันหักตาดำจ่าย  $V_{DD} = 10\text{ โวลต์}$  และ  $V_{SS} = -10\text{ โวลต์}$

โดยในการทดลองบ่อนสัญญาณไซน์ความถี่  $10\text{ kHz}$  แล้ววัดสัญญาณที่จุด 8 จากนั้นปรับ  $R_L$  จนกระทั่งระดับสัญญาณที่จุด 8 ได้ครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุต และนำความต้านทาน  $R_L$  มาวัดปรากฏได้ค่าความต้านทานประมาณ  $13\text{ k}\Omega$  และผลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรในหัวข้อ 3.4.1 ตั้งสมการที่ (3.39) และ (3.38) และสัญญาณที่วัดได้ตั้งแสดงภาพภายในรูปที่ 3.13

เพื่อยืนยันความถูกต้องว่าวงจรสามารถมีการทำงานได้ ตามหลักการทางทฤษฎีที่ได้นำเสนอ ดังนั้นในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎี กระทำได้โดยการใช้โปรแกรม PSpice มาทำการวิเคราะห์ และเลียนแบบการทำงานของวงจรตามรูปที่ 3.11 และเปลี่ยน  $R_L$  ใช้ค่าตามที่ทดลองวัดได้จากวงจรจริงคือ  $R_L = 13.75\text{ k}\Omega$  และกำหนดค่าของอุปกรณ์และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้ในแฟ้มข้อมูลแสดงได้ดัง โปรแกรมที่ 3.1 และผลจากการใช้โปรแกรม PSpice

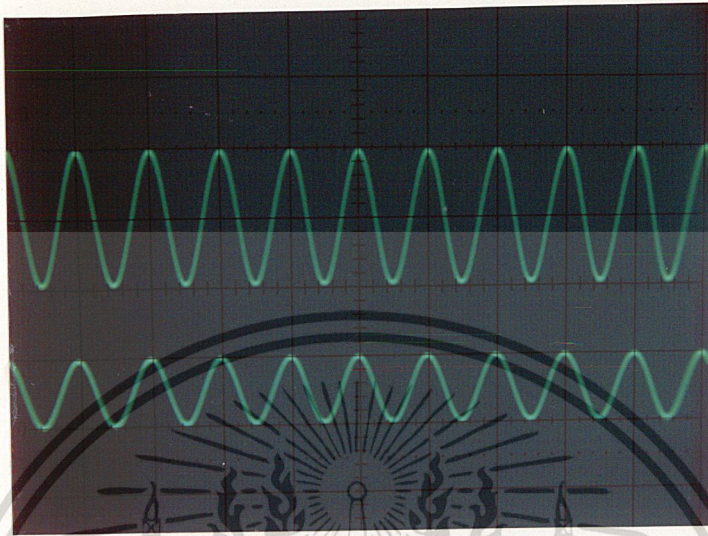


รูปที่ 3.12 วงจรทดลองหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ขณะ  $Z_1 = 10\text{ k}\Omega$

เพื่อเลียนแบบการทำงาน และวิเคราะห์วงจรสามารถวัดค่าระดับสัญญาณที่จุด 7 และจุด 8 ได้ดัง

รูปที่ 3.14 พบว่าสัญญาณที่วัดได้จากการทดลองจริง และการใช้โปรแกรม PSpice ให้ผลใกล้เคียงกัน เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบและวิเคราะห์วงจรตามรูปที่ 3.12 เพื่อทดลองวัดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

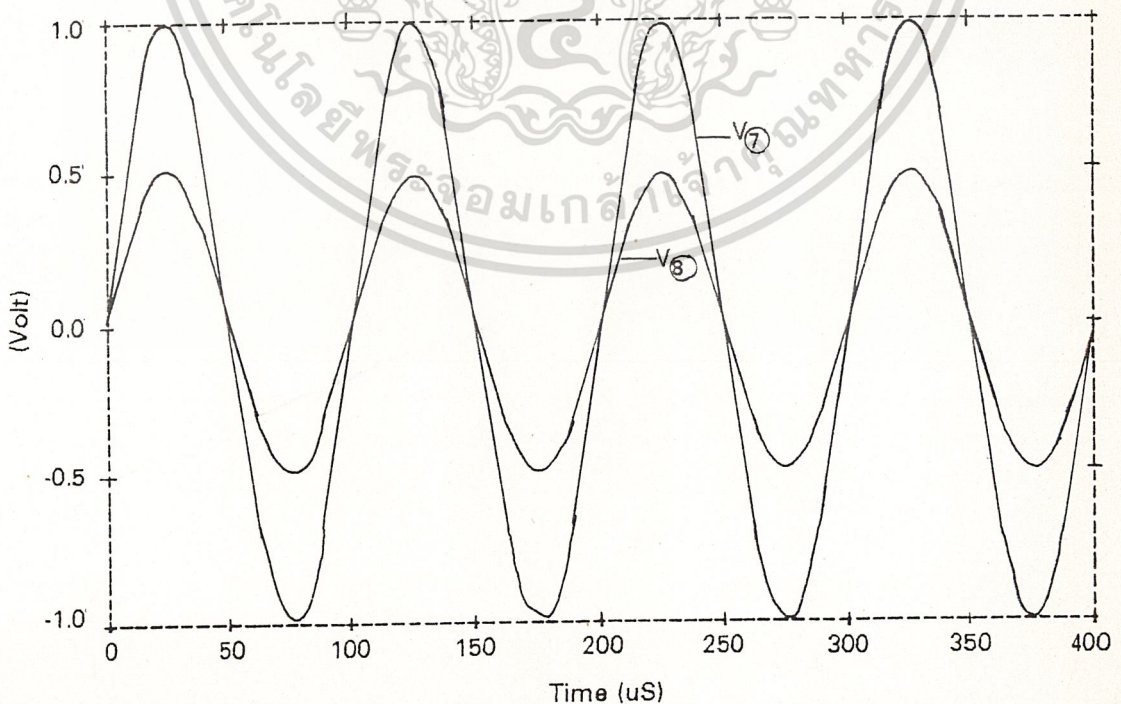
ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ขณะให้  $Z_1 = R_1 = R_2 = 10k\Omega$  และ  $R_L = 0$  โดยวิธีกำหนดแรงดันไฟตรง



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายสัญญาณของจุดที่ 7 และจุดที่ 8 ของรูปที่ 3.12

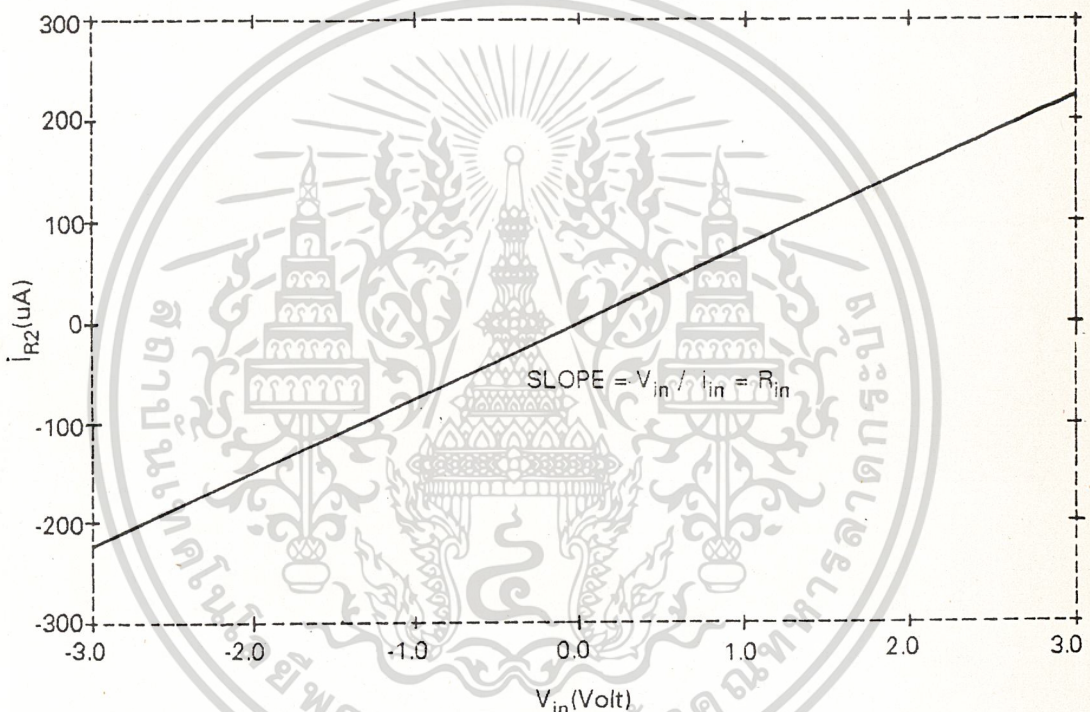
รูปบน สัญญาณที่จุด 7 ความถี่ 10 kHz ขนาด 2 V<sub>p-p</sub>

รูปล่าง สัญญาณที่จุด 8 ความถี่ 10 kHz ขนาด 1 V<sub>p-p</sub>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ารูปที่ 3.14 สั้นผลกั้ววัดสัญญาณจุดที่ 7 และจุดที่ 8 ของรูปที่ 3.12 โดยใช้โปรแกรม PSpice ใช้

ให้เพิ่มค่าขึ้นละ 0.1 โวลต์ จนกระทั่งถึง 1 โวลต์ เข้าที่อินพุต และวัดกระแส  $i$  ไหลผ่าน  $R_2$  สามารถหาค่าของ  $Z_{in}$  ได้โดย  $V_{AB}/i$  ซึ่งรายละเอียดของแฟ้มข้อมูลแสดงไว้ในโปรแกรมที่ 3.2 และผลจากการใช้โปรแกรม PSpice เพื่อเลียนแบบการทำงานและวิเคราะห์ห้วงจรได้ผลวัดค่ากระแส  $i$  ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งพบว่าให้ค่า  $Z_{in} = 13.3 \text{ k}\Omega$  ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองที่ผ่านมาทั้งสองวิธีและค่าที่ได้สอดคล้องตามการวิเคราะห์ผลในทางทฤษฎี



รูปที่ 3.15 ผลการวัด  $Z_{in}$  โดยใช้โปรแกรม PSpice

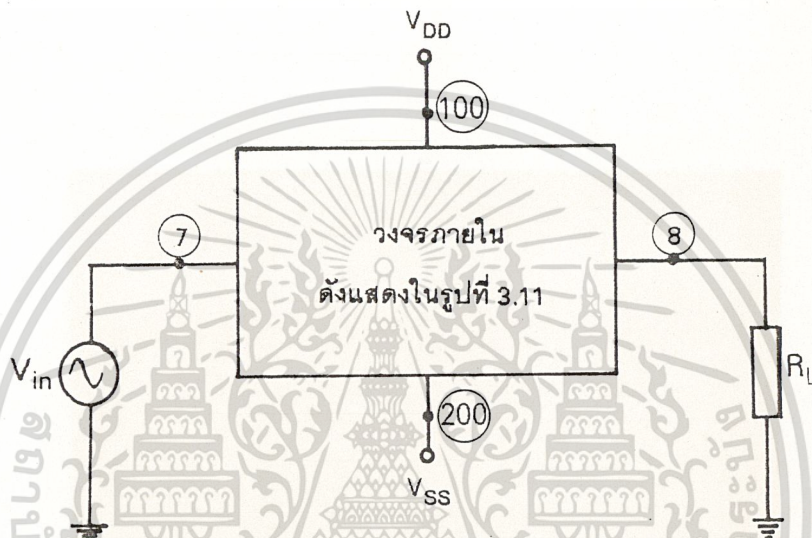
### 3.5.2 การทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ

การทดลองในหัวข้อนี้ได้แบ่งการทดลองเป็นสองหัวข้อย่อยคือการทดลอง เพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำ และการทดลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำที่แปรผัน ตามค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  และตัวต้านทาน  $R_1$  โดยการทดลองทั้งสองหัวข้อนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.5.2.1 การทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า การทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 3.16 แบบตลครีทลงบนไฟร์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โตะบอร์ตหรือแผ่นปริ้น และเลือกใช้มอสเฟตจากไอซีเบอร์ MC14007 โดยออกแบบให้แหล่งจ่าย กระแสคงที่  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8$  และ  $V_{DD}, V_{SS}$  และ  $R_1, R_2$  มีค่าเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.5.1 เพียงแต่เปลี่ยน  $Z_1$  เป็นการต่อด้วยตัวเก็บประจุ  $C_1$  เลือกใช้ค่าประมาณ 1 nF และเลือกใช้ความต้านทานโหลด  $R_2$  เท่ากับ 10 k $\Omega$



รูปที่ 3.16 วงจรการทดลองเพื่อวัดค่าอิน덕ทีฟรีแอกแตนซ์

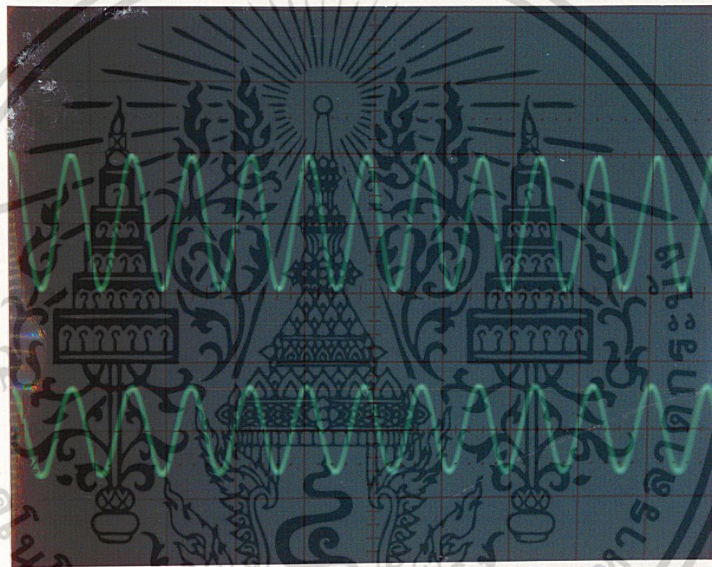
จากวงจรในรูปที่ 3.16 จะเห็นว่าลักษณะการต่อวงจรดังกล่าวเป็นคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยนำขดลวดเหนี่ยวนำเสมือน ที่ได้จากการเลียนแบบจากวงจรมาต่ออนุกรมกับ ความต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับ 10 k $\Omega$  และป้อนแรงดัน  $2 V_{P-P}$  ด้วยความถี่ 10 Hz วัดระดับคิกดาที่จุด 8 จากนั้นเพิ่มความถี่จนกระทั่งระดับคิกดาที่จุด 8 ลดลงเหลือประมาณ  $1.4 V_{P-P}$  และอ่านความถี่ได้ค่าประมาณ 12 kHz ซึ่งเสมือนเป็นความถี่คัทออฟ (Cutoff frequency) ของวงจร และนำความถี่คัทออฟที่วัดได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าขดลวดเหนี่ยวนำเสมือน ตามสมการที่ (3.79) จะได้ค่าขดลวดเหนี่ยวนำประมาณ 132.6 mH

$$L_{eq} = \frac{R_L}{2\pi f_c} \quad (3.87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าหากนำค่า  $C_1 = 1 \text{ nF}$  และค่า  $R_1, R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  และค่าของ  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8$  เท่ากับ  $1 \text{ mA}$  โดยค่า  $g_m = 1.28 \times 10^{-3} \text{ A/V}$  และค่า  $K' = 10^{-4} \text{ A/V}^2$  และค่า  $W/L = 100/10$  แทนลงในสมการ (3.51) หรือสมการ (3.52) จะได้อัตราความถี่ของสัญญาณประมาณ  $130.28 \text{ MHz}$  และ  $133.6 \text{ MHz}$  ตามลำดับ

ดังนั้นจะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองในสมการที่ (3.75) และค่าที่ได้จากการคำนวณจากทฤษฎีจะใกล้เคียงกัน และระดับคิกคาที่อินพุตที่จุด 7 กับระดับคิกคาที่เอาต์พุตที่จุด 8 ขณะที่เป็นการวัดที่ออฟแอสต์ ได้ดังรูปที่ 3.17 และผลตอบสนองความถี่แสดงได้ดังรูปที่ 3.18 ซึ่ง



รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายสัญญาณขณะวัดที่ความถี่คิกคาของวงจรรูปที่ 3.13

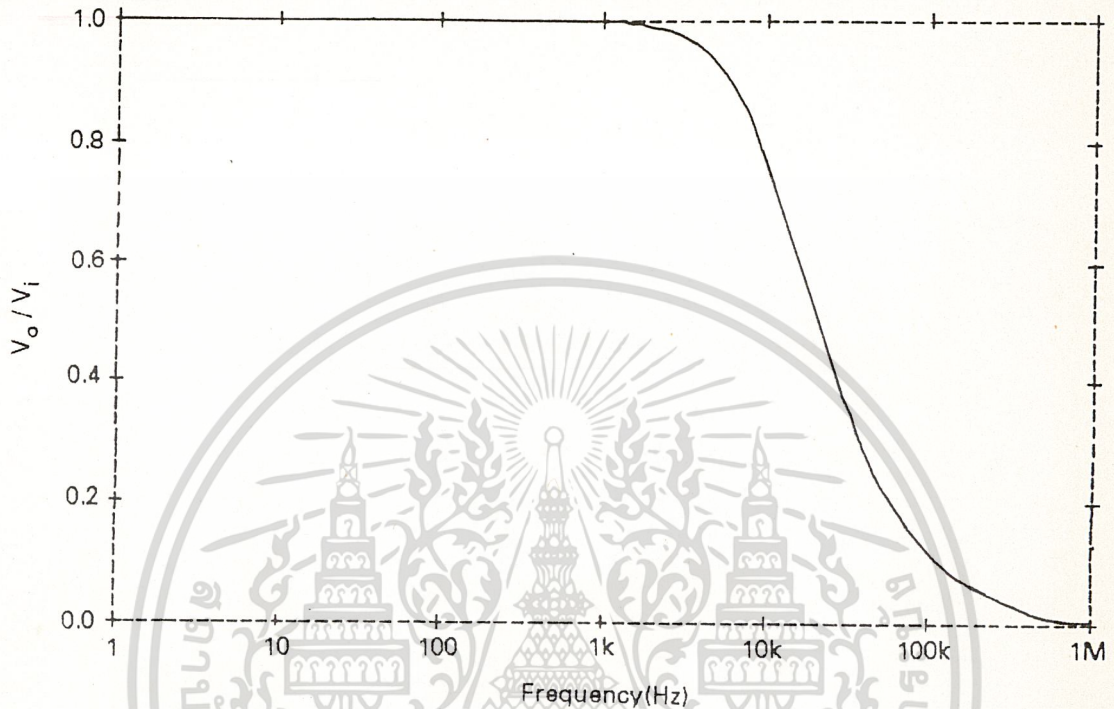
รูปบน สัญญาณที่จุด 7 ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ขนาด  $2 \text{ V}_{p-p}$

รูปล่าง สัญญาณที่จุด 8 ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ขนาด  $1.4 \text{ V}_{p-p}$

ค่าความถี่ของสัญญาณที่ได้จากทฤษฎีเทียบกับ ค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าจะมีค่าผิดพลาดประมาณ  $1.30 \%$  และเพื่อยืนยันความถูกต้องว่าวงจรสามารถมีการทำงานได้ตามหลักการของทฤษฎีที่นำเสนอ ดังนั้นในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบและวิเคราะห์การทำงานของวงจรรูปที่ 3.16 โดยกำหนดค่าของอุปกรณ์และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้ในโปรแกรมที่ 3.3 และจากการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจร ได้ผลการวัดความถี่คิกคาของสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งจากการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 3.16 จะได้ ค่าของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ความถี่คิกคาของสัญญาณ ( $f$ ) ประมาณ  $12.05 \text{ kHz}$  ดังนั้นสามารถหาค่าของความถี่ของสัญญาณได้โดยสมมติว่าความถี่คิกคาของสัญญาณเท่ากับ  $12.05 \text{ kHz}$  ซึ่งค่าความถี่คิกคาของสัญญาณที่ได้นี้จะขึ้นอยู่กับค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่ (3.87) จะให้ความเห็นย่อหน้าประมาณ 132.0 mH ซึ่งพบว่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีของสมการที่ (3.51) และ (3.52)



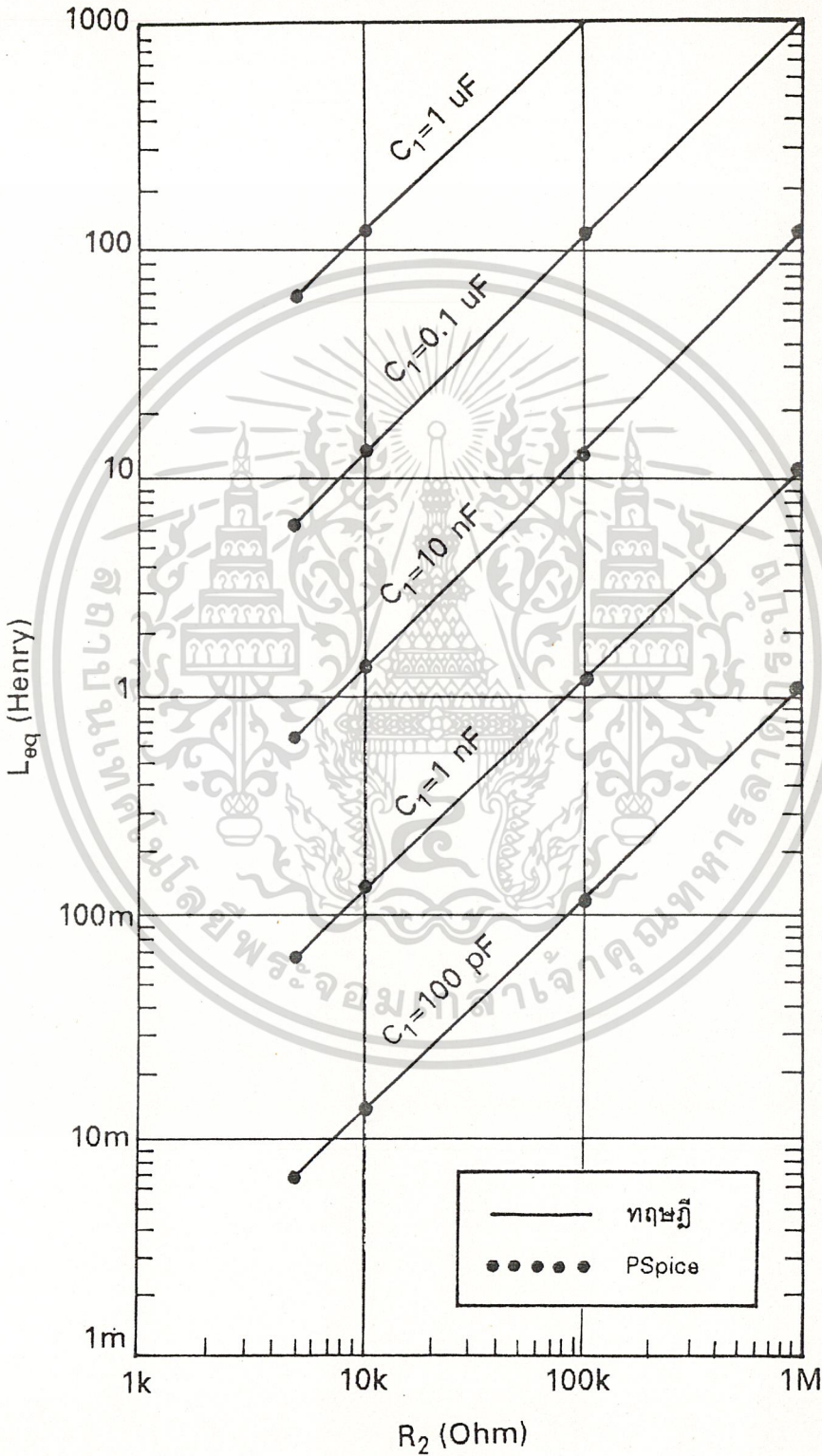
รูปที่ 3.18 ผลการวัดความถี่คutoff เพื่อคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำเสมือน โดยใช้โปรแกรม PSpice

### 3.5.2.2 การทดลองหาค่าสัมพัทธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน

การทดลองหาค่าสัมพัทธ์ของความเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และความต้านทาน  $R_1$  เพื่อความสะดวกในการพิจารณาจึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบและวิเคราะห์วงจรตามวงจรรูปที่ 3.16 โดยเลือกใช้ค่า  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  และ  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$  เขียนรายละเอียดของวงจรตามค่าที่กำหนดตั้งในโปรแกรม 3.5 ผลการเขียนแบบและวิเคราะห์วงจรสามารถวัดค่าความถี่คutoff ของวงจรในการใช้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จำนวน 5 ตัวคือ 100 pF, 1 nF, 10 nF, 0.1  $\mu\text{F}$  และ 1  $\mu\text{F}$  กับความต้านทาน  $R_1$  จำนวน 4 ตัวคือ 5 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$  และ 1 M $\Omega$  โดยในการเขียนแบบวงจรแต่ละครั้งสามารถวัดค่าความถี่คutoff ได้หนึ่งค่า และนำความถี่คutoff

ที่ได้จากการเขียนแบบแต่ละครั้งมาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้สมการที่ (3.79) ก็สามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำได้เหมือนกันทุกประการ อย่างไรก็ตามหากต้องการความแม่นยำสูงยิ่งขึ้น อาจต้องทำการวัดค่าความถี่คutoff ที่จริง ๆ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ ซึ่งอาจพบความคลาดเคลื่อนได้บ้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการวัดค่าความถี่คutoff และค่าของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่ใช้

เขียนความสัมพันธ์ของความเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และความต้านทาน  $R_1$  ได้ ดังรูปที่ 3.19 และเราพบว่าค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  และความต้านทาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ของขดลวดเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และความต้านทาน  $R_2$   
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_1$  ซึ่งสอดคล้องตามผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในหัวข้อที่ 3.4.2

### 3.5.3 การทดลองหาค่าความถี่ปฏิบัติงาน

การทดลองหาความถี่ปฏิบัติงานของวงจร เลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำสามารถแยกพิจารณาได้ดังนี้คือการทดลองหาความถี่ปฏิบัติงานของวงจร เพื่อหาขีดจำกัดทางความถี่ของวงจร เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ (Stray Capacitance) โดยกำหนดให้  $Z_1=R_1=R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  และทดลองหาค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ( $Z_{Leq}$ ) ที่แปรผันตามความถี่ โดยแยกทดลองตามหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 3.5.3.1 การทดลองหาค่าความถี่ปฏิบัติงาน

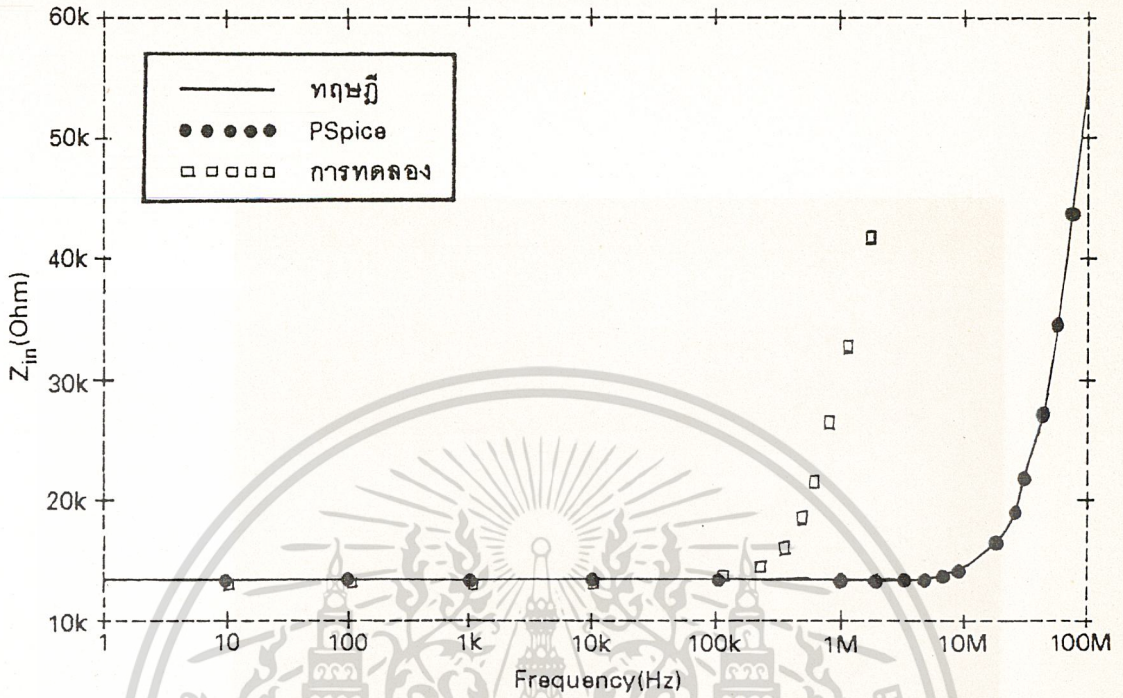
การทดลองหาความถี่ปฏิบัติงานของวงจร เลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อหาขีดจำกัดทางความถี่ของวงจร เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ที่เกิดขึ้นระหว่าง ขาเกตกับซอร์ส โดยเขียนไฟล์ข้อมูล ของวงจรในรูปที่ 3.10 โดยกำหนดให้  $Z_1 = R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$  ได้ตั้งโปรแกรมที่ 3.5 จะได้ผลตอบสนองต่อความถี่ของ  $Z_{in}$  ดังรูปที่ 3.20 จากผลการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจรวัดค่า  $Z_{in}$  จาก  $V(7,8)/i(R_2)$  แสดงได้ดังรูปที่ 3.21 พบว่ามีความถี่ปฏิบัติงานสูงสุดประมาณ 20 MHz และจากผลการวิเคราะห์ของ โปรแกรม เราพบว่าจะได้ค่า  $g_m = 1.28 \times 10^{-3} \text{ A/V}$  และค่า  $C_{gs} = 5 \text{ pF}$  เมื่อนำค่าจากผลการวิเคราะห์แทนในสมการ (3.69) คำนวณความถี่ได้ประมาณ 20 MHz ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตามหัวข้อที่ 3.4.3 อย่างไรก็ตามได้ทดลองจากวงจรที่ต่อแบบดีสครีทบนแผ่นปริ้น (PCB) ปรากฏให้ผลการตอบสนองความถี่ประมาณ 520 kHz ซึ่งต่ำกว่าในทางทฤษฎี สาเหตุดังกล่าวเนื่องจากความจุไฟฟ้าสเตรย์ที่เกิดขึ้นในแผ่น PCB และสายต่อวงจรทำให้การตอบสนองต่อความถี่จากวงจรทดลองมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากทฤษฎีและแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 3.20

#### 3.5.3.2 การทดลองวัดค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ( $Z_{Leq}$ ) ที่แปรตามความถี่ต่างๆ

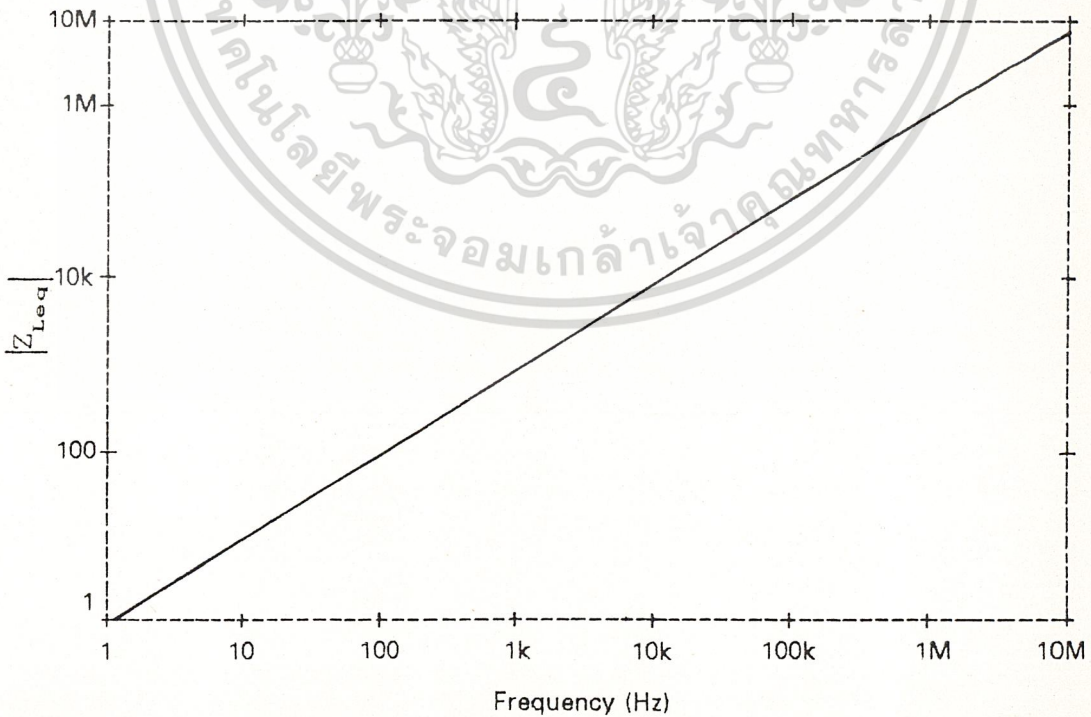
การทดลองวัดค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ที่แปรตามความถี่ค่าต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม PSpice และใช้วงจรตามรูปที่ 3.16 โดยกำหนดค่าตามหัวข้อ 3.5.2.1 ซึ่งเขียนรายละเอียดไว้ในโปรแกรมที่ 3.6 ทำการวัดคิกดาที่จุด 7 และ 8 พร้อมทั้งวัดกระแส  $i$  เพื่อหาค่า  $Z_{Leq}$

ได้ผลการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจรขณะเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 1 Hz ถึง 10 MHz ดังแสดงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปที่ 3.21 จากผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.21 พบว่าค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ( $Z_{Leq}$ ) ที่แปรตามไม่แปรผันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุบังเอิญที่ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ที่ทำการนำมาใช้

ความถี่ดังกล่าวให้ผลใกล้เคียงกับ การวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีตามหัวข้อที่ 3.4.2 ดังสมการที่



รูปที่ 3.20 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรเส้นแบบชดลวดเหนวนำ



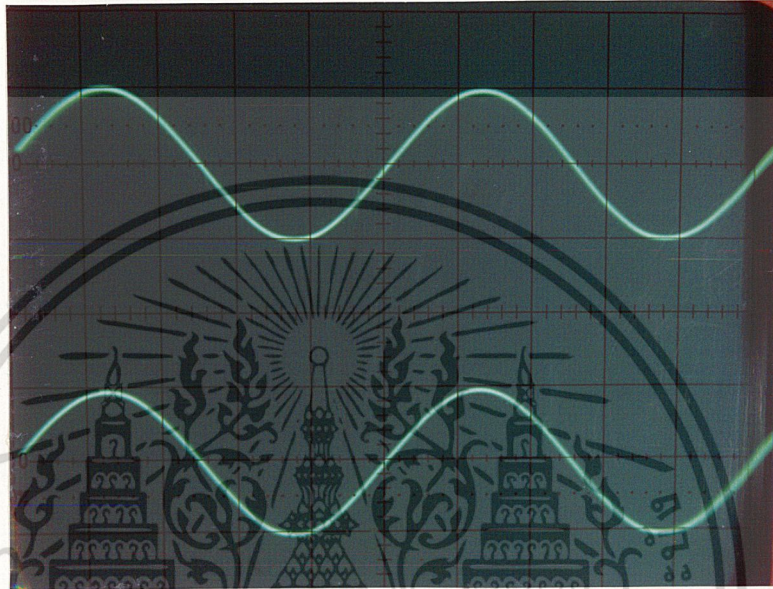
รูปที่ 3.21 ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ( $Z_{Leq}$ ) ขณะแปรตามความถี่โดยใช้โปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.4 การทดลองค่ากระแสและศักดาปฏิบัติงาน

การทดลองวัดค่ากระแสและศักดาปฏิบัติงานสามารถกระทำได้โดยการต่อวงจรดังรูปที่

3.12 และป้อนสัญญาณรูปไซน์ด้วยความถี่ 10 kHz แล้วทำการเพิ่มศักดาจนกระทั่งศักดาที่วัดได้ที่



รูปที่ 3.22 แสดงภาพถ่ายศักดาปฏิบัติงานของวงจรรูปที่ 3.12

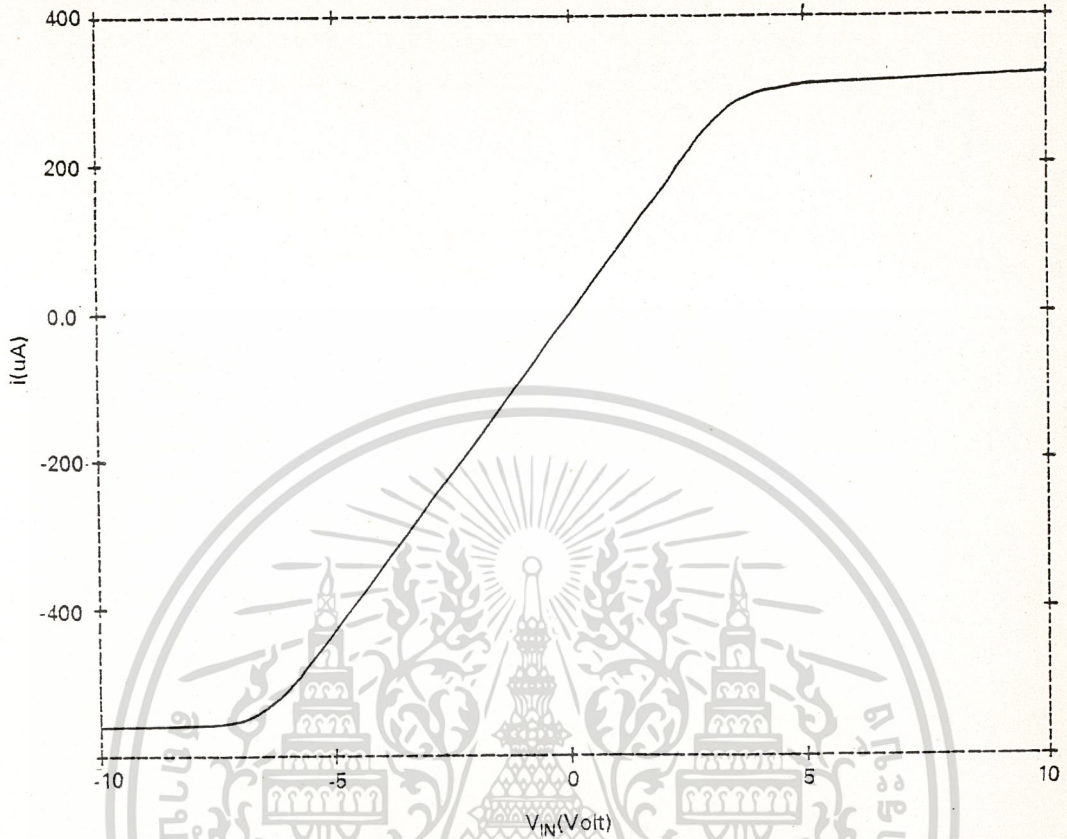
รูปบน สัญญาณที่จุด 7 ความถี่ 10 kHz ขนาด 4.2 V<sub>p-p</sub>

รูปล่าง สัญญาณที่จุด 8 ความถี่ 10 kHz ขนาด 2.1 V<sub>p-p</sub>

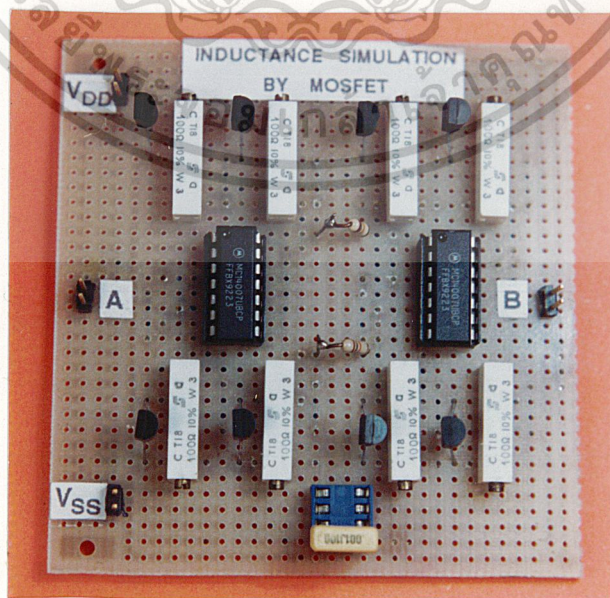
จุด 8 เกิดการผิดเพี้ยนและพบว่าจะได้ค่าศักดาปฏิบัติงานประมาณ 4.2 V<sub>p-p</sub> ดังภาพถ่ายในรูปที่ 3.22 และวัดกระแสขณะนั้นได้ประมาณ 220  $\mu$ A และใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบวงจรตามรูปที่ 3.16 โดยใช้ตัวต้านทาน R แทน  $C_1$  โดยกำหนดให้  $R = R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  และเขียนโปรแกรมได้ตั้ง โปรแกรมที่ 3.6 และผลจากการเลียนแบบและวิเคราะห์ห้วงจรแสดงดังรูปที่ 3.23 ซึ่งพบว่าให้ผลใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในหัวข้อ 3.4.5 และได้แสดงภาพถ่ายวงจรที่ต่อแบบดีสครีทบนแผ่น PCB เพื่อใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.24

จากการทดลองทดสอบวงจรพบว่าวงจรที่นำเสนอในหัวข้อนี้ให้ผลตรงตามทฤษฎีและให้ความแม่นยำสูงมากวงจรหนึ่งและเมื่อเทียบกับวงจรที่เคยปรากฏในวารสารต่างๆ ปรากฏว่าวงจรที่นำเสนอชิ้นนี้มีขนาดเล็กกว่าและให้ความแม่นยำสูง และมีการตอบสนองต่อความถี่สูงกว่าซึ่งถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ถือว่าเป็นการผิดกฎหมายและหากมีการนำไปผลิตเป็นวงจรรวมจะทำให้มี  
ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ผลการทดลองวัดค่ากระแสและค่าศักดาปฏิบัติงาน โดยใช้โปรแกรม PSpice



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้แสดงการต่อวงจรแบบตีลึกรึทบนแผ่น PCB เพื่อใช้ในการทดลอง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็ก และลดต้นทุนในการผลิตได้ และจะสามารถนำไปใช้งานได้สะดวกและมีประสิทธิภาพ  
มากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\* Pro. 3.1 Test Zin \*\*\*\*

.OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.TRAN/OP 3US .5MS

M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U

M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U

M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U

M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U

R1 1 2 10K

R2 3 4 10K

R3 6 5 10K

RL 8 0 13.333K

I1 100 3 DC 1MA

I2 100 5 DC 1MA

I3 100 6 DC 1MA

I4 100 4 DC 1MA

I5 7 200 DC 1MA

I6 1 200 DC 1MA

I7 2 200 DC 1MA

I8 8 200 DC 1MA

VDD 100 0 DC +10

VSS 200 0 DC -10

VIN1 7 0 AC 1 SIN(0 1 10KHZ)

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4  
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)  
.PROBE  
.END
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใส่โปรแกรมที่ 3.11 ในโปรแกรมที่แสดง โปรแกรมทดสอบคืออินพุตอิมพีแดนซ์ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

*** Pro. 3.2 Zin = V(7,8)/I(R2) *****
. OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE
. WIDTH OUT=80
. TEMP 37

M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U
M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U
M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U
M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U

R1 1 2 10K
R2 3 4 10K
R3 6 5 10K
RL 8 0 1E-8

I1 100 3 DC 1MA
I2 100 5 DC 1MA
I3 100 6 DC 1MA
I4 100 4 DC 1MA
I5 7 200 DC 1MA
I6 1 200 DC 1MA
I7 2 200 DC 1MA
I8 8 200 DC 1MA

VDD 100 0 DC +10
VSS 200 0 DC -10
VIN 7 0

. DC VIN -3V 3V .5

. MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PLOT AC V(8)
.PROBE
.END

```



โปรแกรมที่ 3.2 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์หาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์จาก  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $Z_{in} = V(7,8) / i(R2)$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

*** PRO.3.3 MEASUREMENT Leq *****
. OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE
. WIDTH OUT=80
. TEMP 37
. TRAN/OP SUS 1MS
M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U
M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U
M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U
M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U
R1 1 2 10K
R2 3 4 10K
C3 6 5 1NF
RL 8 0 10K
I1 100 3 DC 1MA
I2 100 5 DC 1MA
I3 100 6 DC 1MA
I4 100 4 DC 1MA
I5 7 200 DC 1MA
I6 1 200 DC 1MA
I7 2 200 DC 1MA
I8 8 200 DC 1MA
VDD 100 0 DC +10
VSS 200 0 DC -10
VIN1 7 0 AC 1 SIN(0 1 10K)
. MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.AC DEC 20 1 1MEG
.PLOT AC V(8)
.PROBE
.END

```



```

*** PRO.3.4 MEASUREMENT Leq ****
. OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE
. WIDTH OUT=80
. TEMP 37
. AC DEC 20 1 10MEG
M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U
M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U
M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U
M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U
R1 1 2 10K
R2 3 4 5K
*R2 3 4 10K
*R2 3 4 100K
*R2 3 4 1MEG
C3 6 5 100PF
*C3 6 5 1NF
*C3 6 5 10NF
*C3 6 5 0.1UF
*C3 6 5 1UF
RL 8 0 10K
I1 100 3 DC 1MA
I2 100 5 DC 1MA
I3 100 6 DC 1MA
I4 100 4 DC 1MA
I5 7 200 DC 1MA
I6 1 200 DC 1MA
I7 2 200 DC 1MA
I8 8 200 DC 1MA

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VDD 100 0 DC +10

VSS 200 0 DC -10

VIN1 7 0 AC 1

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

.PROBE

.END



โปรแกรมที่ 3.4 แสดงโปรแกรมวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเหนี่ยวนำ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
กับตัวเก็บประจุและความต้านทาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\* PRO. 3.5 Frequency Response of Zin \*\*\*\*\*

.OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC DEC 20 1 100MEG

M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U

M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U

M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U

M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U

R1 1 2 10K

R2 3 4 10K

RC 6 5 10K

R 8 0 10K

I1 100 3 DC 1MA

I2 100 5 DC 1MA

I3 100 6 DC 1MA

I4 100 4 DC 1MA

I5 7 200 DC 1MA

I6 1 200 DC 1MA

I7 2 200 DC 1MA

I8 8 200 DC 1MA

VDD 100 0 DC +10

VSS 200 0 DC -10

VIN1 7 0 AC 1

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4  
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)  
.PROBE  
.END
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาคใช้เฉพาะที่ออกหรือตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นได้ประโยชน์ด้านการค้า  
โปรแกรมที่ 3.5 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์ เพื่อหาผลตอบสนองความถี่ของ Zin  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\* PRO.3.6 MEASUREMENT Leq \*\*\*\*\*

.OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC DEC 20 1 100MEG

M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U

M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U

M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U

M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U

R1 1 2 10K

R2 3 4 10K

C3 6 5 1NF

RL 8 0 10K

I1 100 3 DC 1MA

I2 100 5 DC 1MA

I3 100 6 DC 1MA

I4 100 4 DC 1MA

I5 7 200 DC 1MA

I6 1 200 DC 1MA

I7 2 200 DC 1MA

I8 8 200 DC 1MA

VDD 100 0 DC +10

VSS 200 0 DC -10

VIN1 7 0 AC 1

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END

```



โปรแกรมที่ 3.6 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์ เพื่อหาค่าอินตทิฟรีแอกแตนท์  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ที่แปรผันตามความถี่  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\* Pro. 3.7 Dinamic rengo of L-MOS \*\*\*

.OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.DC VIN -10V 10V 1V

M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U

M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U

M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U

M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U

M5 10 10 200 200 MN L=10U W=100U

M6 7 10 200 200 MN L=10U W=100U

M7 1 10 200 200 MN L=10U W=100U

M8 2 10 200 200 MN L=10U W=100U

M9 8 10 200 200 MN L=10U W=100U

M10 3 9 100 100 MP L=10U W=100U

M11 5 9 100 100 MP L=10U W=100U

M12 6 9 100 100 MP L=10U W=100U

M13 4 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

R1 1 2 10K

R2 3 4 10K

R3 6 5 10K

RL 8 0 1E-10

I1 100 10 DC 1MA

I2 9 200 DC 1MA

VDD 100 0 DC +10

VSS 200 0 DC -10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 VIN 7 0  
 ไม่วางกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โปรแกรมที่ 3.7 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์ เพื่อหาค่ากระแสและศักดาปฏิบัติงาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

## การเลียนแบบขดลวดเหนียวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์

## 4.1 บทนำ

การออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำโดยใช้มอสเฟตที่ผ่านมาในบทที่ 3 นั้นได้ออกแบบให้วงจรสามารถทำงานได้ตามหลักการที่นำเสนอและวงจรที่ออกแบบขึ้นสามารถเปลี่ยนค่าความเหนียวนำได้โดยการเปลี่ยนค่าของ  $R_1, R_2$  หรือ  $C_3$  ซึ่งยังมีความยุ่งยากในการเปลี่ยนค่าความเหนียวนำขณะนำไปใช้งาน และไม่สามารถเปลี่ยนค่าความเหนียวนำได้โดยใช้กระแสหรือศักดาได้ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำโดยใช้มอสเฟต และสามารถปรับค่าของความเหนียวนำโดยการเปลี่ยนค่ากระแส (หรือศักดา) ซึ่งเรียกรวมว่าการเปลี่ยนค่าความเหนียวนำดังกล่าวว่าการเปลี่ยนโดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะต้องคำนึงถึงความประหยัดความแม่นยำในการทำงาน และการออกแบบวงจรจะต้องมีความเหมาะสมที่จะสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมด้วย และในการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าโดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์วงจรถูกประกอบด้วยมอสเฟต ตัวต้านทาน 2 ตัวและตัวเก็บประจุ 1 ตัว

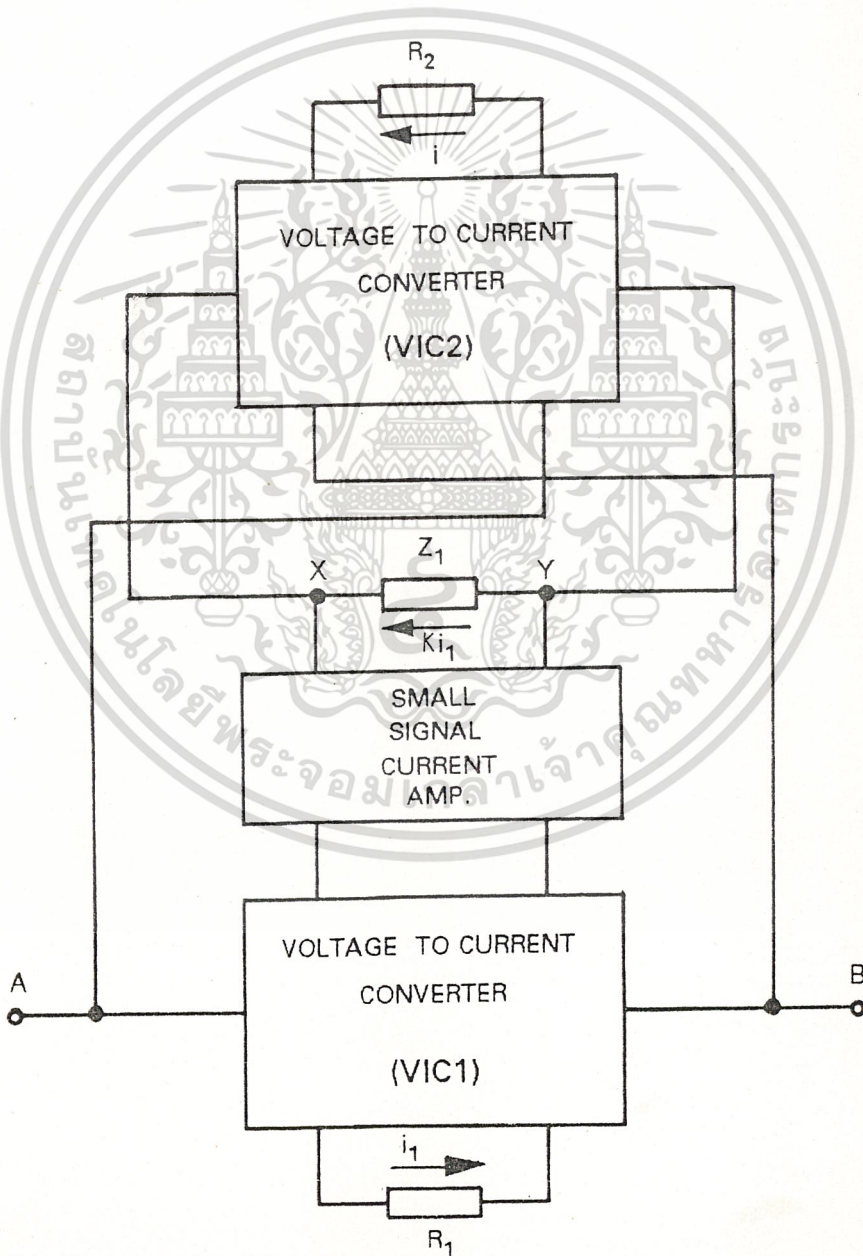
ในบทนี้จะเป็นการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ตามหลักการที่นำเสนอขึ้นมามีวงจรที่ได้จะสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมหรือนำไปเป็นส่วนหนึ่งของวงจรรวมได้โดยง่าย และจะกล่าวถึงการออกแบบวงจร รายละเอียดและการทำงานของวงจร การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจร การทดลองการเลียนแบบ และการวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice และตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อทดสอบการทำงานของวงจร

#### 4.2 หลักการเบื้องต้นของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์

แนวความคิดเบื้องต้นในการออกแบบ วงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์นั้นพิจารณาตามหลักการพื้นฐานของการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนียวนำในบทที่ 3 โดยใช้วิธีศักดาควบคุม และใช้วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสสองวงจรเช่นเดียวกัน โดยเมื่อมีการป้อนศักดา อินพุตให้แก่วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสสองวงจรแรก ก็จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิกส์จึงนำกระแสที่เอาท์พุทมาขยายโดยวงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็ก (Small Signal - Current Amplifier) เพื่อที่จะทำให้กระแสเอาท์พุทที่มีการคูณด้วยค่าคงที่ และถ้าเราบังคับให้กระแสดังกล่าวไหลผ่านตัวเก็บประจุ เกิดเป็นผลต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และค่าศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุดังกล่าวจะถูกนำไปต่อเข้าวงจรเปลี่ยนศักย์เป็นกระแสวงจรถูกที่ 2 ดังนั้นจะเกิดกระแสที่เอาท์พุทของวงจรเปลี่ยนศักย์เป็นกระแสวงจรถูกที่ 2 และนำกระแสนี้ย้อนกลับไปยังจุดศักย์อินพุทของวงจรเปลี่ยนศักย์เป็นกระแสวงจรถูกที่ 1 โดยบังคับให้มีกระแสไหลเข้าที่ขั้วต้นของ



รูปที่ 4.1 หลักการพื้นฐานของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบใช้มอสเฟต  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสงวนไว้สำหรับใช้โดยอาจารย์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุท และไหลออกที่ขั้วปลายของอินพุทของวงจรวจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสวงจรที่ 1 ซึ่งจากความสัมพันธ์ของศักดาและกระแสจากแนวคิดดังกล่าว จะสามารถหาค่าของการเหนี่ยวนำที่แปรผันกับค่าคงที่ และออกแบบวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กให้ปรับค่าอัตราขยายได้ โดยใช้การปรับกระแส (หรือศักดา) ก็จะสามารถปรับขดลวดเหนี่ยวนำแบบปรับค่าด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ได้จากแนวความคิดดังกล่าวสามารถเขียนเป็นหลักการเบื้องต้นได้ดังรูปที่ 4.1

จากหลักการพื้นฐานในรูปที่ 4.1 ถ้าหากเราป้อนศักดาที่จุด A และ B ให้เกิดความต่างศักดากันโดยที่  $V_A$  มีศักดาสูงกว่า  $V_B$  นั่น  $V_A$  ก็จะเป็นบวกกว่า  $V_B$  เป็นผลให้วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสวงจรที่หนึ่งเกิดกระแสไหลผ่าน R โดยกระแสผลต่าง ๆ ที่ได้จะเท่ากับ

$$i_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} \quad (4.1)$$

และเอาที่พหุของวงจรวจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสวงจรที่หนึ่ง จะส่งผ่านไปยังวงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็ก ที่มีอัตราขยายเท่ากับ K ดังนั้นจะได้กระแสเอาต์พุทของวงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็กเป็น  $Ki_1$  และเมื่อนำตัวเก็บประจุมาต่อเอาต์พุทของวงจรทำให้ กระแสไหลผ่าน  $C_1$  เกิดผลต่างศักดาดกคร่อม  $C_1$  ดังนี้

$$V_{xy} = \frac{Ki_1}{SC_1} \quad (4.2)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.1) และ (4.2) จะได้

$$V_{xy} = \frac{KV_{AB}}{SC_1R_1} \quad (4.3)$$

และระดับศักดาผลต่างที่ตกคร่อม  $C_1$  จะเป็นศักดาให้กับวงจรวจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสวงจรที่สอง จึงทำให้เกิดผลต่างกระแสที่เอาต์พุทเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i = \frac{V_{xy}}{R_2} \quad (4.4)$$

และจากสมการที่ (4.3) และ (4.4) จะได้

$$i = \frac{KV_{AB}}{SC_1 R_1 R_2} \quad (4.5)$$

และเราสามารถหาอินพุตอิมพีแดนซ์ได้จากความสัมพันธ์ของ (4.5) ดังนี้

$$Z_{in} = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{SC_1 R_1 R_2}{K} \quad (4.6)$$

ดังนั้นเราสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำเสมือนได้ดังสมการ (4.7)

$$L_{eq} = \frac{C_1 R_1 R_2}{K} \quad (4.7)$$

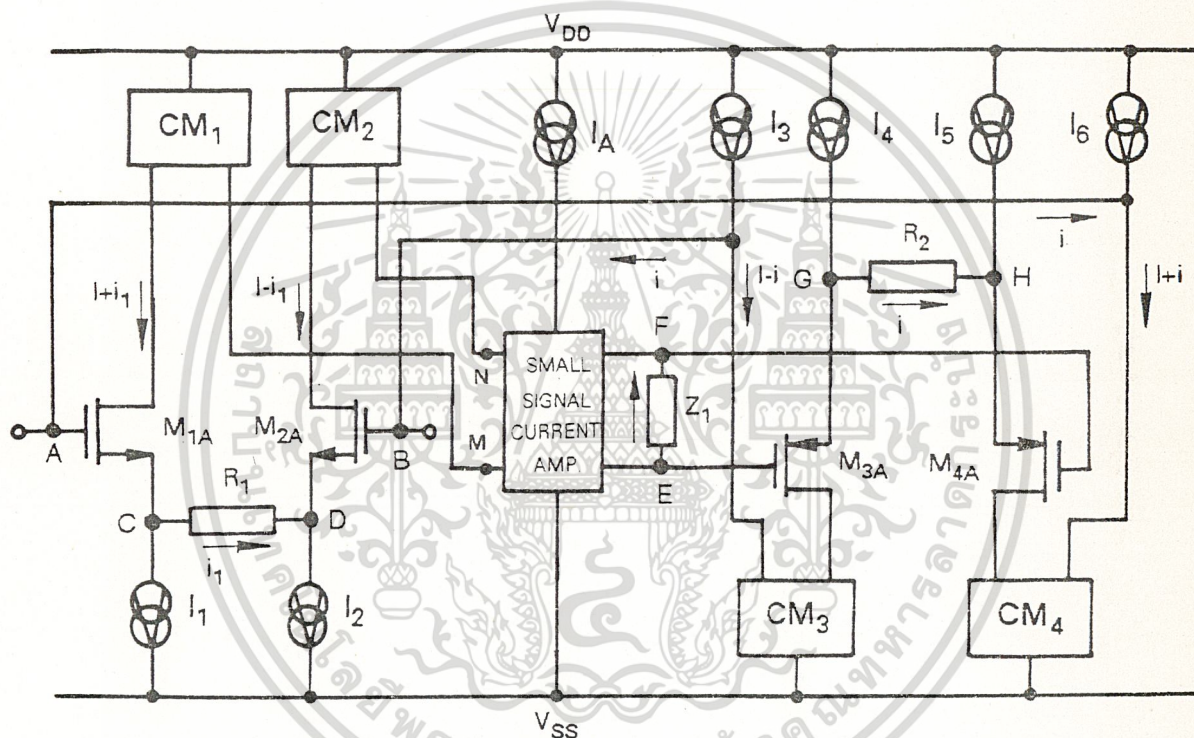
จากสมการที่ (4.7) พบว่าถ้าเราออกแบบวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กให้สามารถปรับค่าอัตราขยาย  $K$  ได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์แล้วเราจะสามารถปรับค่า  $L_{eq}$  ได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์เช่นกัน

#### 4.3 วงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์

ในการออกแบบวงจรเพื่อให้ได้ผลตามหลักการในหัวข้อ 4.2 นั้น สามารถออกแบบได้ตามไดอะแกรมดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่า มีส่วนประกอบของวงจรมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนด้วยกันคือส่วนของวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสซึ่งมีอยู่สองวงจร และส่วนที่สองเป็นวงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็กซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 4.3.1 ในส่วนของวงจรเปลี่ยนศัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ห้ามมิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ต้าเป็นกระแสแล้วจะใช้ วงจรสะท้อนกระแสเข้ามาเพื่อจัดกระแสให้เหมาะสมกับวงจรขยายสัญญาณ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขนาดเล็ก ดังนั้นทำให้วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสมีส่วนประกอบคือ มอสเฟต  $M_{1A}, M_{2A}$  แหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_1$  และ  $I_2$  โดยกำหนดให้  $I_1 = I_2 = I$  วงจรสะท้อนกระแส  $CM_1, CM_2$  และ  $R_1$  ส่วนวงจรเปลี่ยนกระแสแสงวงจรที่สองประกอบด้วยมอสเฟต  $M_{3A}, M_{4A}$  แหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_3, I_4, I_5, I_6$  โดยที่  $I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = I$  วงจรสะท้อนกระแส  $CM_3, CM_4$  และ  $R_2$  โดยในวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสแสงวงจรที่ 2 นั้นจะเพิ่มแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_3, I_6$  ขึ้นมาเพื่อ บังคับให้กระแสไหลเข้าจุด A และไหลออกที่จุด B เพื่อให้เป็นไปตามหลักการที่ได้เสนอไว้



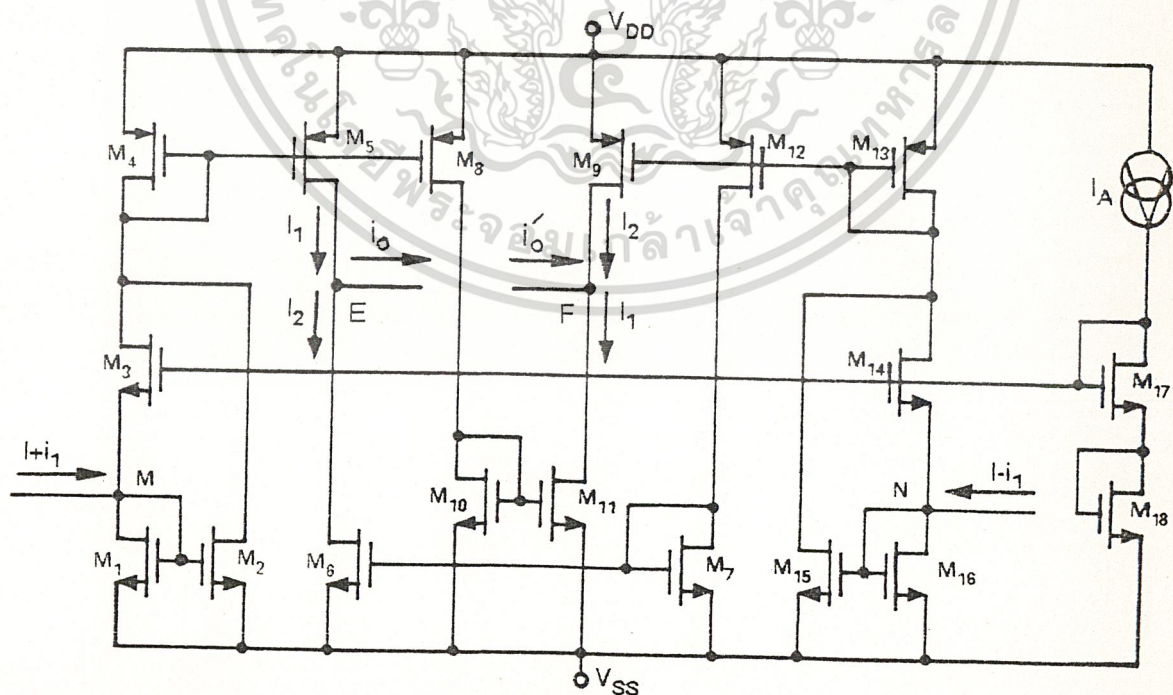
รูปที่ 4.2 แผนภาพของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์

#### 4.3.1 วงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็ก

วงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็กอาศัยหลักการของ วงจร Current Squaring [27] สองวงจรร่วมกับวงจรจัดไบอัสและวงจรสะท้อนกระแส ซึ่งหลักการของวงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็กโดยใช้มอสเฟตได้นำเสนอในปี 1992 [28] แต่เนื่องจากวงจรที่พัฒนาขึ้นตั้งมาตั้งกล่าวนั้นมีเอาท์พุทเพียงพอร์ตเดียวซึ่งยังไม่ตรงกับการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

ที่ได้เสนอนี้ในบทตั้งนั้นจึงได้ทำการพัฒนาใหม่เพื่อให้สอดคล้องตามหลักการที่นำเสนอ โดยวงจรที่ได้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาขึ้นใหม่นี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 จากวงจรในรูปที่ 4.3 มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่สามส่วนด้วยกันคือวงจร Current Squaring วงจรจัดไบอัส และวงจรสะท้อนกระแสโดย  $M_1, M_2$  และ  $M_3$  เป็นวงจร Current Squaring วงจรที่หนึ่ง ส่วน  $M_{14}, M_{15}$  และ  $M_{16}$  เป็นวงจร Current-Squaring วงจรที่สอง โดยมีอินพุทอยู่ที่จุด M และ N ตามลำดับ ส่วนมอสเฟต  $M_{17}, M_{18}$  และแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_A$  เป็นตัวควบคุมการไบอัสของวงจรโดยมันจะเป็นแหล่งจ่ายคิกดาอ้างอิงให้กับมอสเฟต  $M_3$  และ  $M_{14}$  ส่วนมอสเฟต  $M_4, M_5, M_8$  และ  $M_9, M_7, M_{10}, M_{11}$  และ  $M_6, M_{12}, M_{13}$  เป็นวงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror) และเรากำหนดให้มอสเฟตทุกตัวมีค่า W/L เท่ากัน การทำงานของวงจรคือถ้ากำหนดกระแสผลต่างไหลเข้าที่อินพุทของพอร์ท M และ N เป็น  $(I+i_1)$  และ  $(I-i_1)$  ตามลำดับ โดยกระแส  $(I+i_1)$  จะผ่านวงจร Current Squaring วงจรที่หนึ่งเป็นผลให้เกิดกระแส  $I_1$  และกระแส  $I_1$  ถูกสะท้อนไปที่จุด E โดยวงจรสะท้อนกระแส  $M_4, M_8$  ขณะเดียวกันกระแส  $(I-i_1)$  ก็ผ่านวงจร Current Squaring วงจรที่สอง เป็นผลให้เกิดกระแส  $I_2$  และกระแส  $I_2$  ถูกสะท้อนไปยังขาเดรนของ  $M_7$  โดยวงจรสะท้อนกระแส  $M_{12}, M_{13}$  ขณะเดียวกัน  $M_8$  และ  $M_7$  ซึ่งเป็นวงจรสะท้อนกระแส จะทำให้เกิด  $I_2$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 4.3 วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กแบบปรับค่าได้โดยวิธีอเล็กทรอนิกส์  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลออกที่จุด E ดังนั้นผลต่างของกระแส  $I_1$  และ  $I_2$  ที่จุด E คือ  $i_0$  มีทิศทางไหลออกจากจุด E ดังรูป และเช่นเดียวกันจะเห็นว่า  $M_8$  จะคัดลอกกระแส  $I_1$  เพื่อส่งไปยังวงจรสะท้อนกระแส  $M_{10}, M_{11}$  และจะคัดลอกกระแส  $I_2$  เกิดกระแส  $I_2$  ไหลเข้าจุด F เป็นผลให้เกิดกระแสผลต่างของกระแสที่จุด F คือ  $i'_0$  มีทิศทางไหลเข้าดังรูปที่ 4.3 จากการทำงานเราสามารถเขียนเป็นสมการของ  $I_1$  และ  $I_2$  ได้ดังนี้

$$I_1 = 2I_A + \frac{(I+i_1)^2}{8I_A} \quad (4.7)$$

และ

$$I_2 = 2I_A + \frac{(I-i_1)^2}{8I_A} \quad (4.8)$$

โดยที่เราให้อุปกรณ์ทุกตัวทำงานที่กระแส  $I+i_1 < 4I_A$  แล้วเราเขียนสมการกระแสเอาที่พหุ  $I_0$  ที่ไหลออกจากจุด E ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} i_0 &= (I_1 - I_2) \\ &= Ki_1 = \left( \frac{I}{2I_A} \right) i_1 \end{aligned} \quad (4.9)$$

เช่นเดียวกันสามารถเขียนสมการกระแส  $i'_0$  ที่ไหลเข้าจุด F ได้ก็คือ

$$\begin{aligned} i'_0 &= (I_1 - I_2) \\ &= Ki_1 = \left( \frac{I}{2I_A} \right) i_1 \end{aligned} \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นว่ากระแสขนาดเล็กลูกขยายโดยค่า  $K$  ซึ่งพบว่าค่า  $K$  สามารถเปลี่ยนค่าได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์โดยการเปลี่ยนค่ากระแส  $I_A$  และจากสมการที่ (4.7) และ (4.8) พบว่าค่า  $K$  จะจำกัดที่  $K_{MAX} \leq 2$  และเมื่อได้วงจรตามที่เรากำลังต้องการแล้วต่อไปจะกลับไปพิจารณาถึงการทำงานของวงจรตามไดอะแกรมรูปที่ 4.2 ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

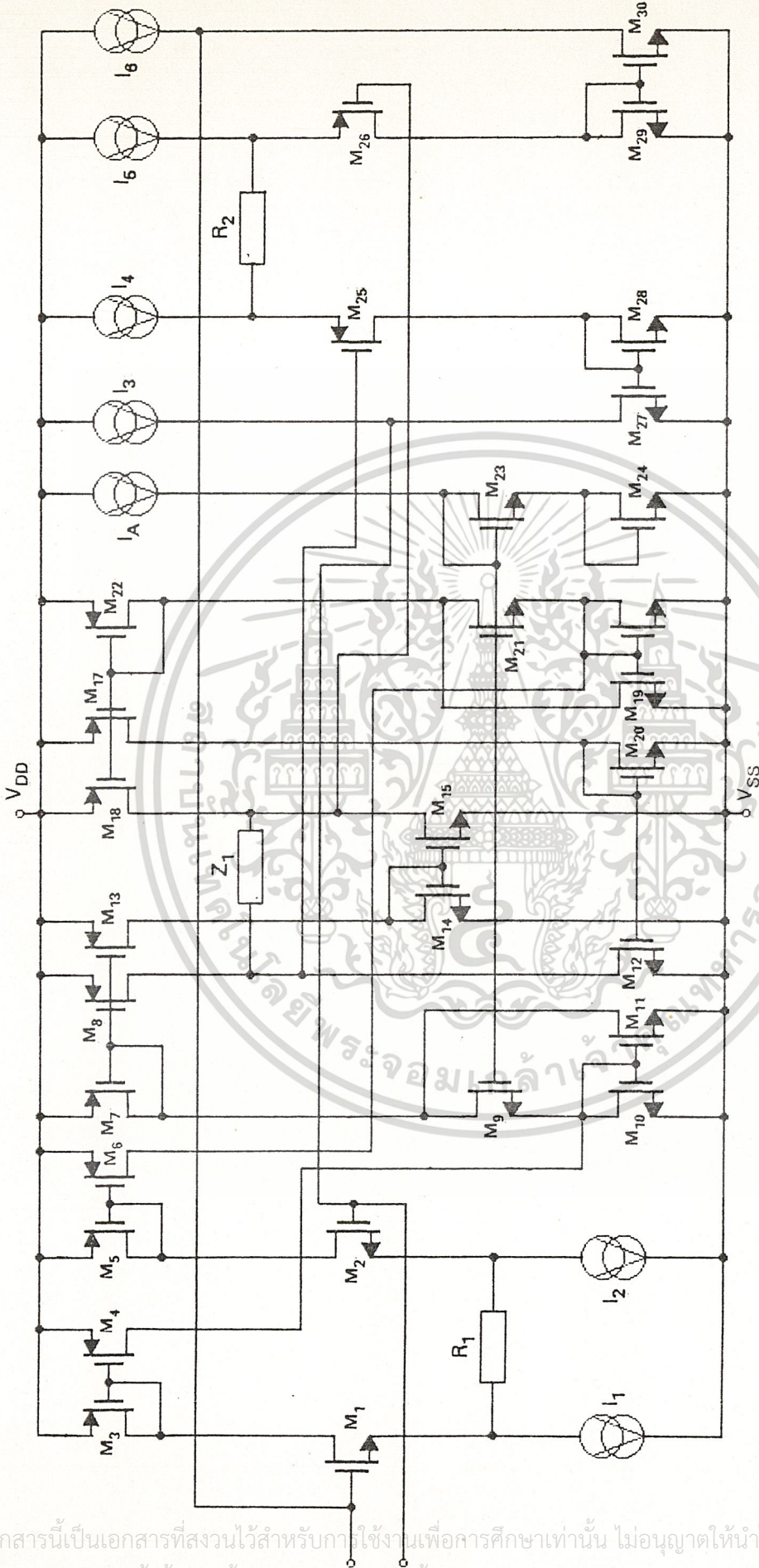
#### 4.3.2 การทำงานของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต

##### แบบปรับค่าได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์

จากแผนภาพของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟตแบบปรับค่าด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งได้กล่าวถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรไว้แล้วในหัวข้อ 4.3 ต่อไปเราจะพิจารณาการทำงานของวงจรคือเมื่อเราป้อนศักดาที่จุด A และ B โดยที่ให้ศักดาที่จุด A มีค่าศักดาสูงกว่า  $V_B$  ฉะนั้น  $V_A$  จะเป็นบวกมากกว่า  $V_B$  จะทำให้กระแสเดรนของมอสเฟต  $M_{1A}$  เพิ่มขึ้นมาอีก  $i_1$  ทำให้กระแสเดรนรวมเป็น  $I+i_1$  เป็นผลให้กระแสเดรนในมอสเฟต  $M_{2A}$  ลดลงจากเดิมเท่ากับ  $i_1$  ทำให้กระแสเดรนรวมเป็น  $I-i_1$  นั่นคือกระแสด้านหนึ่งเพิ่มขึ้นเท่าใดก็จะไปลดลงอีกด้านหนึ่งเท่านั้น และเนื่องจากวงจรจ่ายกระแสคงที่  $I_1$  และ  $I_2$  จะคงตั้งกระแสผ่านตัวมันเองแต่ละ  $I$  ฉะนั้นกระแสที่ขาดหรือเกินมาในวงจรก็จะย้ายจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง โดยผ่าน  $R_1$  เป็นกระแส  $i_1$  จากนั้นวงจรสะท้อนกระแส  $CM_1$  จะคัดลอกกระแสเดรนของ  $M_{1A}$  คือ  $I+i_1$  ส่งไปยังพอร์ท N ของวงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็ก เช่นเดียวกันวงจรสะท้อนกระแส  $CM_2$  จะคัดลอกกระแสเดรนของ  $M_{2A}$  คือ  $I-i_1$  ส่งไปยังพอร์ท N ของวงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็ก และจากการทำงานของวงจรขยายสัญญาณกระแสขนาดเล็กในหัวข้อที่ 4.3.2 จะได้กระแสเอาต์พุตเป็น  $Ki_1$  โดยไหลออกที่จุด E และผ่าน  $C_1$  (ในไดอะแกรมเขียนไว้ในรูป  $Z_1$ ) ไหลเข้าที่จุด F เป็นผลให้เกิดศักดาผลต่างตกร่วมตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำให้วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสวงจที่สองได้ศักดาที่ขาเกทของมอสเฟต  $M_{3A}$  และ  $M_{4A}$  โดยที่เกท  $M_{3A}$  จะได้ศักดาบวกสูงกว่าที่ขาเกทของมอสเฟต  $M_{4A}$  เป็นผลให้เกิดผลต่างศักดาตกร่วม  $R_2$  เกิดกระแส  $i$  ไหลผ่าน  $R_2$  และเนื่องจากที่ขาซอสทั้งสองของ  $M_{3A}$  และ  $M_{4A}$  มีแหล่งจ่ายกระแสคงที่ตันกระแสไหลผ่านตัวมันเท่ากับ  $I$  และที่จุด A และ B ก็เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ตันกระแสไหลผ่านตัวมันเท่ากับ  $I$  เช่นกัน เป็นผลให้เกิดกระแสไหลเข้าที่จุด A และไหลออกที่จุด B ดังแสดงทิศทางกระแสดังรูปที่ 4.2 และจากไดอะแกรมรูปที่ 4.2 เขียนเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรเรียงแบบทอดตัวต่อเนื่องนำโดยใช้ออสเฟต แบบรับค่าโดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎี

จากการออกแบบวงจร รายละเอียดและการทำงานของวงจร ได้กล่าวแล้วข้างต้น โดยเราได้สร้างวงจรเลียนแบบวงจรขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟต แบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ตามหลักการที่ได้เสนอขึ้นมาตั้งวงจรตามรูปที่ 4.4 และเพื่อยืนยันหลักการที่ได้เสนอขึ้นมา นั้น ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรดังกล่าวในทางทฤษฎี โดยจะพิจารณาถึงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ค่าความเหนี่ยวนำ ช่วงความถี่ปฏิบัติงาน ค่าคิวแฟกเตอร์ (Quality Factor) ของขดลวดเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ และช่วงกระแสและศักดาปฏิบัติงานของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟต แบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีรายละเอียดตามลำดับหัวข้อดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 การวิเคราะห์หาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจร

จากรูปที่ 4.2 พิจารณาที่จุด A และ B (โดยใช้การวิเคราะห์เพื่อความสะดวกจะใช้  $Z_1$  ต่อระหว่างจุด F และ E แทนตำแหน่งของ  $C_1$ )

$$V_{AB} = V_{GS1A} - V_{GS2A} + i_1 R_1 \quad (4.11)$$

และที่จุด E และ F จะได้

$$V_{EF} = V_{SG3A} - V_{SG4A} + i_2 R_2 \quad (4.12)$$

และจะเห็นว่าที่จุด E และ F จะได้

$$V_{EF} = K i_1 Z_1 \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.12) และ (4.13) จะได้

$$i_1 = \frac{V_{SG3A} - V_{SG4A} + 1R_2}{KZ_1} \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำ (4.14) แทนในสมการ (4.11) จะได้

$$V_{AB} = V_{GS1A} - V_{GS2A} + \frac{R_1 V_{SG3A}}{KZ_1} - \frac{R_1 (V_{SG4A})}{KZ_1} + \frac{iR_2 R_1}{KZ_1} \quad (4.15)$$

เมอมอสเฟตทุกตัวทำงานช่วงอิมิตวตั้งนั้น

$$V_{GS1A} = \sqrt{(2i_{D1A})} + V_{T1A} \quad \text{สำหรับ NMOS เมื่อ } i = 1, 2 \quad (4.16)$$

โดยที่

$$B_{1A} = \frac{K'_{1A} W_{1A}}{L_{1A}} \quad (4.17)$$

และ

$$V_{GSJA} = \sqrt{(2i_{DJA})} + |V_{TJA}| \quad \text{สำหรับ PMOS เมื่อ } j=3, 4 \quad (4.18)$$

โดยที่

$$B_{JA} = \frac{K'_{JA} W_{JA}}{L_{JA}} \quad (4.19)$$

และวงจรสามารถเขียนกระแสเดรนของมอสเฟตแต่ละตัวได้ดังนี้

$$i_{D1A} = I + i_1 \quad (4.20)$$

$$i_{D2A} = I - i_1 \quad (4.21)$$

$$i_{D3A} = I - i \quad (4.22)$$

$$i_{D4A} = I + i \quad (4.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อเรากำหนดให้

$$B_{1A} = B_{2A} = B_{3A} = B_{4A} = B \quad (4.24)$$

$$V_{T1A} = V_{T2A} \quad (4.25)$$

$$|V_{T3A}| = |V_{T4A}| \quad (4.26)$$

จากสมการที่ (4.15) และสมการ (4.26) เราจะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{2I}{B}} \left[ \sqrt{\frac{1+i}{I}} - \sqrt{\frac{1-i}{I}} + \frac{R_1}{KZ_1} \sqrt{\frac{2I}{B}} \left( \sqrt{\frac{1+i}{I}} - \sqrt{\frac{1-i}{I}} \right) + \frac{iR_1R_2}{KZ_1} \right] \quad (4.27)$$

จากสมการที่ (4.27) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์เราจะประมาณโดยอาศัยคุณสมบัติของฟังก์ชันการกระจายตามสมการที่ (3.45) ดังนั้นจาก (4.27) จะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{2}{IB}} \left[ \frac{i}{I} + \frac{R_1}{KZ_1} \sqrt{\frac{2I}{B}} \left[ \frac{i}{I} \right] + \frac{iR_1R_2}{KZ_1} \right] \quad (4.28)$$

นำสมการที่ (4.14) แทนในสมการที่ (4.28) จะได้

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{2}{B}} \left[ \frac{1}{KZ_1} \left( \sqrt{\frac{2(I+i)}{B}} + V_{T4A} \right) - \frac{1}{KZ_1} \left( \sqrt{\frac{2(I-i)}{B}} + V_{T3A} \right) + \frac{iR_2}{KZ_1} \right] + \frac{R_1}{KZ_1} \sqrt{\frac{2}{IB}} i + iR_1R_2 \quad (4.29)$$

จากการประมาณค่าตามสมการที่ (3.35) ดังนั้นสมการที่ (4.29) เขียนใหม่ได้เป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{AB} = \frac{i}{KZ_1} \left[ \frac{2 + R_2}{IB} \sqrt{\frac{2}{IB}} + R_1 \sqrt{\frac{2}{IB}} \right] + \frac{R_1 R_2 i}{KZ_1} \quad (4.30)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้คือ

$$Z_{in} = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{1}{KZ_1} \left[ \frac{2 + \sqrt{\frac{2}{IB}} (R_1 + R_2) + R_1 R_2}{IB} \right] \quad (4.31)$$

ตัวอย่างเช่นถ้าเรากำหนด  $K = 1 \times 10^{-4} \text{ A/V}^2$ ,  $W/L = 100/10$ ,  $Z_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  แหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I = 1 \text{ mA}$  และกำหนดให้  $I_A = 0.5 \text{ mA}$  ซึ่งจะได้ค่า  $K = 1$  เราสามารถหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์จากสมการที่ (4.31) ได้ คือ  $Z_{in} = 13.06 \text{ k}\Omega$

#### 4.4.2 การวิเคราะห์หาค่าอินดักทีฟแอกแตนซ์และค่าความเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์หาค่าอินดักทีฟแอกแตนซ์โดยพิจารณาจากอิมพีแดนซ์ในสมการที่ (4.31) ถ้าเราพิจารณาสมการจะเห็นว่าถูกหารด้วย  $KZ_1$  และจากวงจรเมื่อถ้าเราต่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  แทน  $Z_1$  ดังนั้น ค่าของ  $Z_1$  ในสมการที่ (4.31) ก็จะเป็นค่าคาปาซิทีฟแอกแตนซ์ (Capacitive Reactance) หรือ  $1/SC_1$  และสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Z_{Leq} = \frac{SC_1}{K} \left[ \frac{2 + \sqrt{\frac{2}{IB}} (R_1 + R_2) + R_1 R_2}{IB} \right] \quad (4.32)$$

จากเราทราบว่าค่าที่ได้นั้น เหมือนเป็นค่าอินดักทีฟแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) คือ  $X_L = SL$  ดังนั้นจากสมการที่ (4.32) ได้ค่าความเหนี่ยวนำเหมือน (Equivalent Inductance) เขียนย่อเป็น  $L_{eq}$  ได้ดังนี้

$$L_{eq} = \frac{C_1}{K} \left[ \frac{2 + \sqrt{\frac{2}{IB}} (R_1 + R_2) + R_1 R_2}{IB} \right] \quad (4.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.33) พบว่าค่าความเหนี่ยวนำเสมือนจะขึ้นอยู่กับค่า  $K$  โดยที่ค่า  $K = I/2I_A$  ซึ่ง  $K$  เป็นตัวหารหรือพิจารณาอีกนัยหนึ่งได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำคูณอยู่กับ  $2I_A/I$  ดังนั้นค่าของ  $L_{eq}$  จะแปรผันตรงกับ  $1/K$  โดยถ้าเปลี่ยนค่ากระแส  $I_A$  จะทำให้ค่า  $K$  เปลี่ยนตามเป็นผลให้ค่า  $L_{eq}$  เปลี่ยนได้ซึ่งวิธีการเปลี่ยนค่าโดยการเปลี่ยนกระแส(หรือศักดา)นั้นเราเรียกว่าการเปลี่ยนค่าด้วยวิธีอิล็กทรอนิกส์

ตัวอย่างเช่นถ้าเรากำหนด  $K' = 1 \times 10^{-4} \text{ A/V}^2$ ,  $W/L = 100/10$ ,  $C_1 = 1 \text{ nF}$   
 $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  แหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I = 1 \text{ mA}$  และกำหนดให้  $I_A = 0.5 \text{ mA}$  ดังนั้น  
 $K = 1$  เราสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำเสมือน  $L_{eq} = 130.06 \text{ mH}$

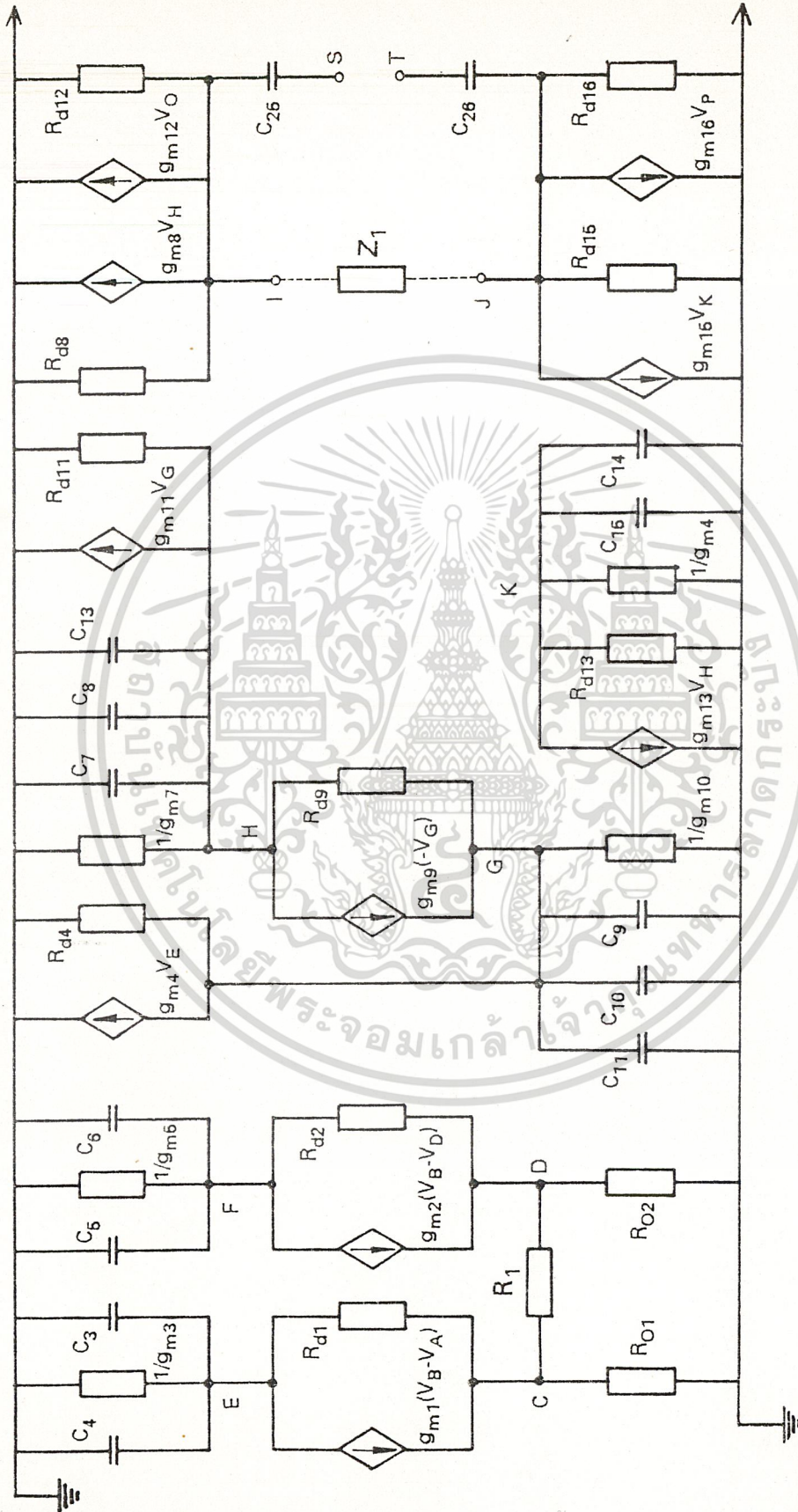
#### 4.4.3 การวิเคราะห์หาความถี่ปฏิบัติการ

ค่าความถี่ปฏิบัติการของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ ตามหลักการที่นำเสนอในรูปที่ 4.2 จะมีผลตอบสนองต่อความถี่ถูกจำกัดเนื่องจากค่าของความจุไฟฟ้าสเตรย์ที่เกิดขึ้น ระหว่างขาเกตและซอร์สของมอสเฟต ( $C_{gs}$ ) และเกิดจากค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ซึ่งตัวเก็บประจุที่เป็นตัวเปลี่ยนจะมีค่าคาปาซิทีฟแอกแตนซ์ (Capacitive Reactance) ซึ่งเป็นค่าที่แปรผันตามความถี่ ดังนั้นสามารถพิจารณาค่า  $Z_{L_{eq}}$  ที่แปรผันตามความถี่ได้สำหรับกรณีแรกในการพิจารณา การสนองของวงจรที่ถูกจำกัด เนื่องจากค่าของความจุไฟฟ้าสเตรย์ที่เกิดขึ้นระหว่างเกตกับซอร์สของมอสเฟต โดยจะพิจารณารณที่แทน  $Z_1$  ด้วยความต้านทานเท่ากับ  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  และจะพิจารณาวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก โดยเขียนวงจรทดเทียมนของวงจรรูปที่ 4.4 ได้ดังรูปที่ 4.5 จากรูปที่ 4.5 ใช้ KCL เพื่อเขียนสมการที่จุดต่าง ๆ ได้ดังนี้ ที่จุด A

$$\left( \frac{1}{R_{o8}} + \frac{1}{R_{d3}} + SC_1 \right) V_A - SC_1 V_C + g_{m30} V_R - i = 0 \quad (4.34)$$

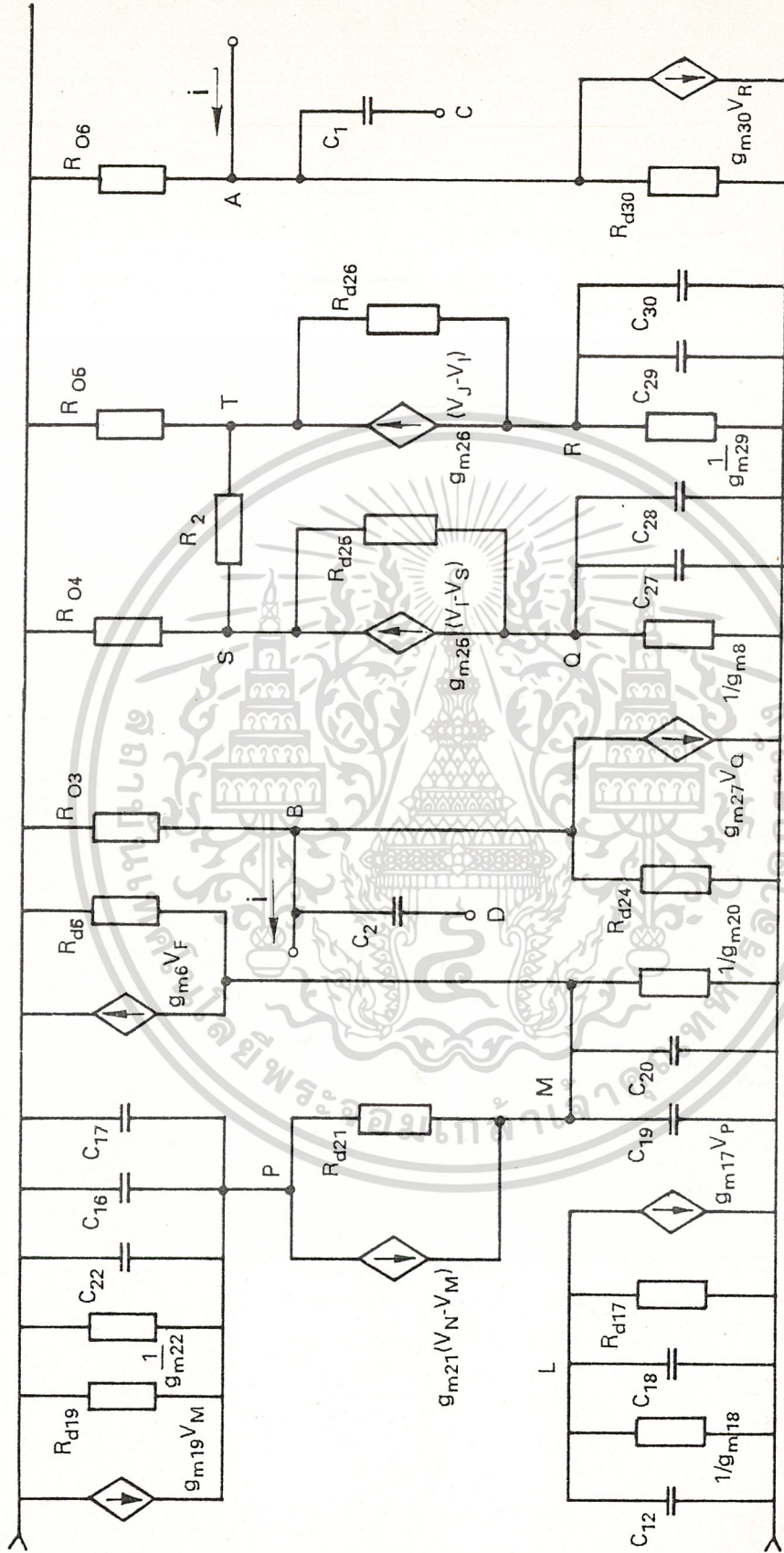
ที่จุด B

$$\left( \frac{1}{R_{o3}} + \frac{1}{R_{d24}} + SC_2 \right) V_B - SC_2 V_D + g_{m2} V_Q + i = 0 \quad (4.35)$$



รูปที่ 4.5 วงจรที่เติมของวงจรรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left( \frac{1}{R_{o1}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{d1}} + SC_1 \right) V_C - SC_1 V_A + \frac{1}{R_{d1}} V_E - \frac{1}{R_1} V_D - g_{m1} (V_A - V_B) = 0 \quad (4.36)$$

ทจุด D

$$\left( \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{o1}} + \frac{1}{R_{1v}} \right) V_D - \frac{1}{R_{d2}} V_F - \frac{1}{R_1} V_C - g_{m2} (V_B - V_D) = 0 \quad (4.37)$$

ทจุด E

$$\left( SC_4 + g_{m3} + \frac{1}{R_{d1}} + SC_3 \right) V_E - \frac{1}{R_{d1}} V_C + g_{m1} (V_A - V_B) = 0 \quad (4.38)$$

ทจุด F

$$\left( SC_5 + SC_6 + g_{m5} + \frac{1}{R_{d2}} \right) V_F - \frac{1}{R_{d2}} V_D + g_{m2} (V_B - V_D) = 0 \quad (4.39)$$

ทจุด G

$$\left( SC_{11} + SC_{10} + SC_9 + g_{m10} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{d9}} \right) V_G - \frac{1}{R_{d9}} V_H + g_{m9} V_G + g_{m4} V_E = 0 \quad (4.40)$$

ทจุด H

$$\left( \frac{1}{R_{d9}} + g_{m7} + SC_7 + SC_8 + SC_{19} + \frac{1}{R_{d11}} \right) V_H - \frac{1}{R_{d9}} V_G + g_{m11} V_G - g_{m9} V_G = 0 \quad (4.41)$$

ทจุด I

$$\left( \frac{1}{R_{d8}} + \frac{1}{R_{d12}} + \frac{1}{Z_1} + SC_{25} \right) V_I - SC_{25} V_S - \frac{1}{Z_1} V_J + g_{m8} V_H + g_{m12} V_O = 0 \quad (4.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ทจุด J  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left( \frac{1}{R_{O1}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{d1}} + SC_1 \right) V_C - SC_1 V_A + \frac{1}{R_{d1}} V_E - \frac{1}{R_1} V_D - g_{m1} (V_A - V_B) = 0 \quad (4.36)$$

ที่จุด D

$$\left( \frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{O1}} + \frac{1}{R_1} \right) V_D - \frac{1}{R_{d2}} V_F - \frac{1}{R_1} V_C - g_{m2} (V_B - V_D) = 0 \quad (4.37)$$

ที่จุด E

$$\left( SC_4 + g_{m3} + \frac{1}{R_{d1}} + SC_3 \right) V_E - \frac{1}{R_{d1}} V_C + g_{m1} (V_A - V_B) = 0 \quad (4.38)$$

ที่จุด F

$$\left( SC_5 + SC_6 + g_{m5} + \frac{1}{R_{d2}} \right) V_F - \frac{1}{R_{d2}} V_D + g_{m2} (V_B - V_D) = 0 \quad (4.39)$$

ที่จุด G

$$\left( SC_{11} + SC_{10} + SC_9 + g_{m10} + \frac{1}{R_{d4}} + \frac{1}{R_{d9}} \right) V_G - \frac{1}{R_{d9}} V_H + g_{m9} V_G + g_{m4} V_E = 0 \quad (4.40)$$

ที่จุด H

$$\left( \frac{1}{R_{d9}} + g_{m7} + SC_7 + SC_8 + SC_{19} + \frac{1}{R_{d11}} \right) V_H - \frac{1}{R_{d9}} V_G + g_{m11} V_G - g_{m9} V_G = 0 \quad (4.41)$$

ที่จุด I

$$\left( \frac{1}{R_{d8}} + \frac{1}{R_{d12}} + \frac{1}{Z_1} + SC_{25} \right) V_I - SC_{25} V_S - \frac{1}{Z_1} V_J + g_{m8} V_H + g_{m12} V_O = 0 \quad (4.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{R_{d15}} + \frac{1}{R_{d16}} + SC_{26} \right) V_J - SC_{26} V_T - \frac{1}{Z_1} V_I + g_{m15} V_K + g_{m16} V_P = 0 \quad (4.43)$$

ที่จุด K

$$\left( \frac{1 + g_{m14} + SC_{15} + SC_{14}}{R_{d13}} \right) V_K + g_{m13} V_H = 0 \quad (4.44)$$

ที่จุด L

$$\left( \frac{SC_{12} + SC_{18} + g_{m16} + 1}{R_{d17}} \right) V_L + g_{m17} V_P = 0 \quad (4.45)$$

ที่จุด M

$$\left( \frac{SC_{19} + SC_{20} + g_{m20} + 1}{R_{d21}} \right) V_M - \frac{1}{R_{d11}} V_P + g_{m21} (V_N - V_M) = 0 \quad (4.46)$$

ที่จุด P

$$\left( \frac{SC_{22} + SC_{16} + SC_{17} + g_{m22} + 1}{R_{d11}} + \frac{1}{R_{d19}} \right) V_P - \frac{1}{R_{d21}} V_M - g_{m19} V_M = 0 \quad (4.47)$$

ที่จุด Q

$$\left( \frac{SC_{27} + SC_{28} + g_{m8} + 1}{R_{d11}} \right) V_Q - \frac{1}{R_{d25}} V_S + g_{m25} (V_I - V_S) = 0 \quad (4.48)$$

ที่จุด R

$$\left( \frac{SC_{29} + SC_{30} + 1 + g_{m29}}{R_{d26}} \right) V_R - \frac{1}{R_{d26}} V_T + g_{m26} (V_J - V_T) = 0 \quad (4.49)$$

ที่จุด S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left( \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ \hline R_{o4} & R_2 & R_{d9} \end{array} \right) V_S - \frac{1V_T}{R_2} - \frac{1V_Q}{R_{d25}} - g_{m25} (V_I - V_T) = 0 \quad (4.50)$$

ที่จุด T

$$\left( \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ \hline R_{o5} & R_2 & R_{d26} \end{array} \right) V_T - \frac{1V_S}{R_2} - \frac{1V_R}{R_{d26}} - g_{m26} (V_J - V_T) = 0 \quad (4.51)$$

จากสมการที่ (4.34) ถึง สมการ (4.51) จะเห็นว่า  $1/R_o \ll 1$  และ  $1/R_d \ll 1$  ดังนั้น จึงกำหนดให้  $1/R_o \cong 1/R_d \cong 0$  และสามารถหาการตอบสนองความถี่ของวงจรโดยพิจารณาการตอบสนองความถี่ของ  $Z_{in}$  อย่างไม่รัดกุมเนื่องจากสมการที่ได้ทั้งหมดอยู่ในเทอมของ โพลีโนเมียลที่มีอันดับสูงซึ่งจะยุ่งยากในการพิจารณาารวมกันทั้งหมด ดังนั้นจึงได้จัดสมการให้สะดวกในการพิจารณาและได้ผลดังนี้

$$Z_{in}(S) = \left( \begin{array}{c} V_{AB} \\ \hline i_1 \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} i_1 \\ \hline i_o \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} i_o \\ \hline i \end{array} \right) \quad (4.52)$$

โดยที่

$$\left( \begin{array}{c} V_{AB} \\ \hline i_1 \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} i_o \\ \hline i \end{array} \right) = Z_M \frac{[a]S^2 + [b]S + 1}{[c]S^2 + [d]S + 1} \quad (4.53)$$

$$\frac{i_o}{i_1} = A_{iM} \frac{1}{[e]S^2 + (f)S + 1} \quad (4.54)$$

โดยที่

$$Z_M = \frac{(g_{m1}R_1 + 2)(g_{m5}R_1 + 2)}{g_{m2}g_{m26}Z_1} \quad (4.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{im} = \frac{2g_{m8} (g_{m11} - g_{m9})}{g_{m7} (g_{m9} + g_{m10})} \quad (4.55)$$

$$[a] = \frac{C_1 C_2 5R_1 R_2}{(g_{m1} R_1 + 2)(g_{m5} R_1 + 2)} \quad (4.55)$$

$$[b] = \frac{C_1 R_1 (g_{m5} R_1 + 2) + C_{25} R_2 (g_{m1} R_1 + 2)}{(g_{m1} R_1 + 2)(g_{m5} R_1 + 2)} \quad (4.56)$$

$$[c] = \frac{C_2 C_{25} Z_1}{g_{m2} g_{m26} Z_1} \quad (4.57)$$

$$[d] = \frac{C_2 g_{m26} Z_1 + C_{25} Z_1 g_{m2}}{g_{m2} g_{m26} Z_1} \quad (4.58)$$

$$[e] = \frac{(C_9 + C_{10} + C_{11})(C_1 + C_8 + C_{13})}{g_{m7} (g_{m9} + g_{m10})} \quad (4.59)$$

$$[f] = \frac{g_{m7} (C_9 + C_{10} + C_{11}) + (g_{m9} + g_{m10})(C_1 + C_8 + C_{13})}{g_{m7} (g_{m9} + g_{m10})} \quad (4.60)$$

จากสมการที่ (4.52) เราสามารถพิจารณาค่าของโพล และซีโรเพื่อหาค่าโพลและซีโรที่ทำให้เกิดความถี่คutoff (Cutoff frequency) ซึ่งจากการพิจารณาสมการ (4.53) จะได้ค่าของซีโรและโพลตามสมการที่ (4.61), (4.62) และสมการที่ (4.63), (4.64) ตามลำดับ และจากการพิจารณาสมการที่ (4.54) จะได้ซีโรตามสมการที่ (4.64) และ (4.65)

$$f_{z1} = 1 \frac{[(g_{m1} R_1 + 2)(g_{m5} R_1 + 2)]}{27} \quad (4.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานับแต่บัดนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{z2} = \frac{1}{2\pi} \frac{[C_1 R_1 (g_{m5} R_1 + 2) + C_{25} R_2 (g_{m1} R_2 + 2)]}{C_1 C_{25} R_1 R_2} \quad (4.62)$$

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi} \frac{[g_{m2} g_{m26}]}{C_2 g_{m26} + C_{25} g_{m2}} \quad (4.63)$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi} \frac{[C_2 g_{m26} + C_{25} g_{m2}]}{C_2 C_{25}} \quad (4.64)$$

$$f_{p3} = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{m7} (g_{m9} + g_{m10})}{g_{m7} (C_9 + C_{10} + C_{11}) + (g_{m9} + g_{m10}) (C_1 + C_8 + C_{13})} \quad (4.65)$$

$$f_{p4} = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{m1} (C_9 + C_{10} + C_{11}) + (g_{m9} + g_{m10}) (C_1 + C_8 + C_{13})}{(C_9 + C_{10} + C_{11}) (C_1 + C_8 + C_{13})} \quad (4.66)$$

จากสมการที่ (4.61) ถึง (4.66) นั้นถ้าหากแทนค่า  $g_m$  ใดๆเท่ากับ  $1.28 \times 10^{-3}$  A/V และค่าตัวเก็บประจุ C ใดๆเท่ากับ 5 pF,  $R_1 = R_2 = Z_1 = 10$  kΩ และค่าของซีโรคือสมการที่ (4.61) และ (4.62) มีค่าเท่ากับ 23.5 MHz และ 89.18 MHz ตามลำดับและค่าโพลของสมการที่ (4.63) และ (4.64) จะมีค่า 20.114 MHz และ 81.48 MHz ตามลำดับ ส่วนสมการที่ (4.65) และ (4.66) แทน  $g_{m7} = 1.43 \times 10^{-3}$  A/V,  $g_{m9} = 4.47 \times 10^{-4}$  A/V  $g_{m10} = 1.36 \times 10^{-3}$  A/V โดยมีค่าตัวเก็บประจุใดๆเท่ากับ 5 pF จะได้ค่าโพลของสมการที่ (4.65) และ (4.66) ประมาณ 8 MHz และ 19 MHz ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำความถี่จากค่าโพล และซีโรมาเปรียบเทียบกันพบว่าการตอบสนองความถี่ของวงจรประมาณ  $f_{p3} = 8$  MHz

#### 4.4.4 การวิเคราะห์หาค่าคิวแฟกเตอร์ (Quality Factor)

จากสมการที่ (4.32) และ (4.33) พบว่าค่าความถี่ขั้วนำที่เลียนแบบชั้นมานั้น

เป็นค่าความถี่ขั้วนำที่มีค่าคิวเป็นอนันต์ อย่างไรก็ตามจากหลักการที่นำเสนอมานั้นใช้ตัวเก็บ-  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ประจุ  $C_1$  เป็นตัวเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ ดังนั้นในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุดังกล่าวจะมีค่าความต้านทาน  
ไม่จำกัดที่หนึ่งส่วน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเกิดจากสารไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งเรากำหนดเป็น  $R_c$  เกิดขึ้นในลักษณะที่ขนานกับตัวเก็บประจุ ดังนั้นจึงเป็นผลให้สามารถพิจารณาค่าคิวกแพกเตอร์ได้ในการพิจารณาจะพิจารณาจากอิมพีแดนซ์ที่จุด A และ B ดังแสดงไว้ในสมการที่ (4.32) ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

$$Z_{Leq} = \frac{1}{K} \left( \frac{1 + SC_1 R_c}{R_c} \right) \left( \frac{2}{IB} + \sqrt{\frac{2}{IB}} \frac{(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{IB} \right) \quad (4.67)$$

และเมื่อกำหนดให้  $S = j\omega$  แล้วเขียนสมการที่ (4.67) ใหม่ได้คือ

$$Z_{Leq} = \frac{1}{KR_c} \left[ \frac{2 + \sqrt{\frac{2}{IB}} \frac{(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{IB}}{IB} + \frac{j\omega C_1}{K} \left[ \frac{2}{IB} + \sqrt{\frac{2}{IB}} \frac{(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{IB} \right] \right] \quad (4.68)$$

และถ้าหากนำค่าของขดลวดเหนี่ยวนำเชิงอุดมคติซึ่งมีค่าคิวกแพกเตอร์เป็นอนันต์ ต่อเป็นวงจรรีโซแนนซ์ตามสมการที่ (3.81) ในหัวข้อ 3.4.5 เราสามารถหาค่าของความถี่รีโซแนนซ์ได้คือ

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{C_1 \left( \frac{2}{K IB} + \sqrt{\frac{2}{IB}} \frac{(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{IB} \right) C_0}} \quad (4.69)$$

แต่กรณีของขดลวดเหนี่ยวนำที่เขียนแบบขึ้นในทางปฏิบัติจะมีค่าคิวกแพกเตอร์เกิดขึ้นจากค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กทริกดังกล่าวและสามารถพิจารณาค่า  $Q$  ได้โดยใช้สมการที่ (4.67) และ (4.69) จะได้ค่า  $Q$  ตามสมการที่ (4.70)

$$Q \approx \frac{C_1 R_c}{\sqrt{\left[ \frac{2}{IB} + \sqrt{\frac{2}{IB}} \frac{(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{IB} \right] \frac{C_0 C_1}{K}}} \quad (4.70)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเพื่อความสะดวกในการพิจารณาค่าสามารถเขียนสมการที่(4.70) ใหม่ได้ตั้งสมการที่(4.71)

$$Q \approx \frac{R_c}{\sqrt{\frac{2}{IB} + \sqrt{\frac{2(R_1+R_2)}{IB} + R_1R_2}}} \sqrt{\frac{KC_1}{C_0}} \quad (4.71)$$

และจากสมการที่(4.72) ถ้าหากในการทดสอบหาค่า Q เลือกใช้  $C_1$  เท่ากับ  $C_0$  แล้วเราเขียนสมการที่ (4.71) ใหม่ได้เป็น

$$Q \approx \frac{R_c \sqrt{K}}{\sqrt{\frac{2}{IB} + \sqrt{\frac{2(R_1+R_2)}{IB} + R_1R_2}}} \quad (4.72)$$

จากสมการที่ (4.71) เราพบว่าค่า Q จะขึ้นอยู่กับ  $R_c$  และ K ดังนั้นจะเห็นว่าค่า Q มีค่าสูงมากหรือน้อยนอกจากจะขึ้นกับการเลือกใช้ตัวเก็บประจุแล้วก็ยังขึ้นกับค่าของ K ด้วย แต่อย่างไรก็ตามค่า Q ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับ การเลือกคุณภาพของตัวเก็บประจุ

#### 4.4.5 การวิเคราะห์ช่วงคักตาและกระแสปฏิบัติงาน

การพิจารณาค่าคักตาและกระแสปฏิบัติงานนั้นจะแบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ การพิจารณาคักตาปฏิบัติงาน และการพิจารณากระแสปฏิบัติงานของวงจรถ และจะพิจารณาคักตาปฏิบัติงานเป็นอันดับแรก การพิจารณาคักตาปฏิบัติงานของวงจรถเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่เสนอในบทนี้จะพิจารณาจากการทำงานของวงจรถ ซึ่งพบว่าคักตาปฏิบัติงานมีขีดจำกัดเนื่องจากวงจรถเปลี่ยนคักตาเป็นกระแสทั้งสองวงจรถ แต่อย่างไรก็ตามเราพบว่าถ้าหากวงจรถเปลี่ยนคักตาเป็นกระแสวงจรถที่หนึ่ง ไม่สามารถทำงานได้แล้วจะทำให้วงจรถในส่วนอื่นทำงานผิดพลาดไปได้ ดังนั้นเราจึงพิจารณาการทำงานของมอสเฟตในวงจรถเปลี่ยนกระแสเป็นคักตาวงจรถที่หนึ่งคือ  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$  และเราพบว่า  $M_1$  และ  $M_2$  ถูกไบอัสในลักษณะที่สมมาตรกันดังนั้นเราจะพิจารณาเฉพาะ  $M_1$  และวงจรถสะท้อนกระแส  $M_3, M_4$  เพื่อหาคักตาปฏิบัติงานของวงจรถและในการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ระบุไว้บนเอกสารฉบับนี้ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จรีให้ส่วนอยู่ในช่วง  $V_{A(\min)}$  ทำงานสมการได้ดังนี้

$$\text{ศักดาปฏิบัติงาน} = V_{A(\max)} - V_{A(\min)} \quad (4.73)$$

โดยพิจารณา  $V_{A(\max)}$  ซึ่งจะสวิงในช่วงของ  $V_{DD}$  โดยผ่าน  $M_3$  และ  $M_1$  ดังนั้นจากวงจรรูปที่ 4.4 ขณะแทนแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I$  ด้วยมอสเฟต  $M_1$  ที่ไบอัสให้มีกระแสเดรนเท่ากับ  $I$  เช่นเดียวกับรูปที่ 3.10 ดังนั้นสามารถพิจารณา  $M_1, M_3$  จะได้

$$V_{A(\max)} = V_{DD} - V_{DS3} - V_{DS1} + V_{GS1} \quad (4.74)$$

และถ้าหาก  $M_1$  และ  $M_2$  ทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัวแล้ว

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T \quad (4.75)$$

$$\text{และ} \quad V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D + V}{B}} \quad (4.76)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.74), (4.75) และ (4.76) จะได้

$$V_{A(\max)} = V_{DD} - \sqrt{\frac{2(I+I_1)}{B}} \quad (4.77)$$

เช่นเดียวกันเราสามารถพิจารณา  $V_{A(\min)}$  ซึ่งสวิงอยู่ในช่วง  $V_{SS}$  โดยผ่าน  $M_{11}$  และ  $M_1$  ดังนั้น

$$V_{A(\min)} = V_{SS} + V_{GS1} + V_{DS11} \quad (4.78)$$

$$V_{A(\min)} = V_{SS} + \sqrt{\frac{2(I+i_1)}{B}} + \sqrt{\frac{2I}{B}} + V_{T1} \quad (4.79)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.73) เราจะได้ช่วงคัทตาปฏิบัติงานดังนี้

$$\text{คัทตาปฏิบัติงาน} = V_{DD} - V_{SS} - 2 \sqrt{\frac{2(I+i_1)}{B}} - \sqrt{\frac{2I}{B}} - V_{T1} \quad (4.80)$$

จากสมการที่ (4.80) พบว่าคัทตาปฏิบัติงานขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ  $W/L$  และค่าแหล่งจ่ายกระแสคงที่โดยถ้าออกแบบให้ค่าอัตราส่วนของ  $W/L$  มีค่ามาก และให้  $I$  มีค่าน้อยแล้วจะทำให้ช่วงคัทตาปฏิบัติงานกว้างมากขึ้นอย่างเช่นออกแบบให้  $W/L = 100/10$  ใช้  $K' = 1 \times 10^{-4} \text{ A/V}^2$  และ  $I = 1 \text{ mA}$  จะได้ช่วงคัทตาปฏิบัติงาน  $14 V_{D-P}$  หรือประมาณ  $\pm 7 V_p$

ส่วนการพิจารณากระแสปฏิบัติงานเราจะพิจารณาจากกระแส  $i, i_1$  และ  $I$  ของวงจรจากวงจรพิจารณาที่จุด C และ D พบว่าถ้าหากผลต่างกระแส  $i_1$  ที่ไหลผ่าน  $R_1$  มีค่ามากขึ้นเท่ากับ  $I$  จะทำให้กระแสเดรนของ  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นศูนย์ได้ดังนั้นจะเป็นผลให้วงจรเปลี่ยนคัทตาเป็นกระแสวงจรถัดไปไม่ทำงานจะทำให้ไม่มีกระแส  $i$  เกิดขึ้นดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่า

$$I_{D1} = 0 \quad \text{เมื่อ } i_1 = -I \quad (4.81)$$

$$\text{หรือ } I_{D2} = 0 \quad \text{เมื่อ } i_1 = I \quad (4.82)$$

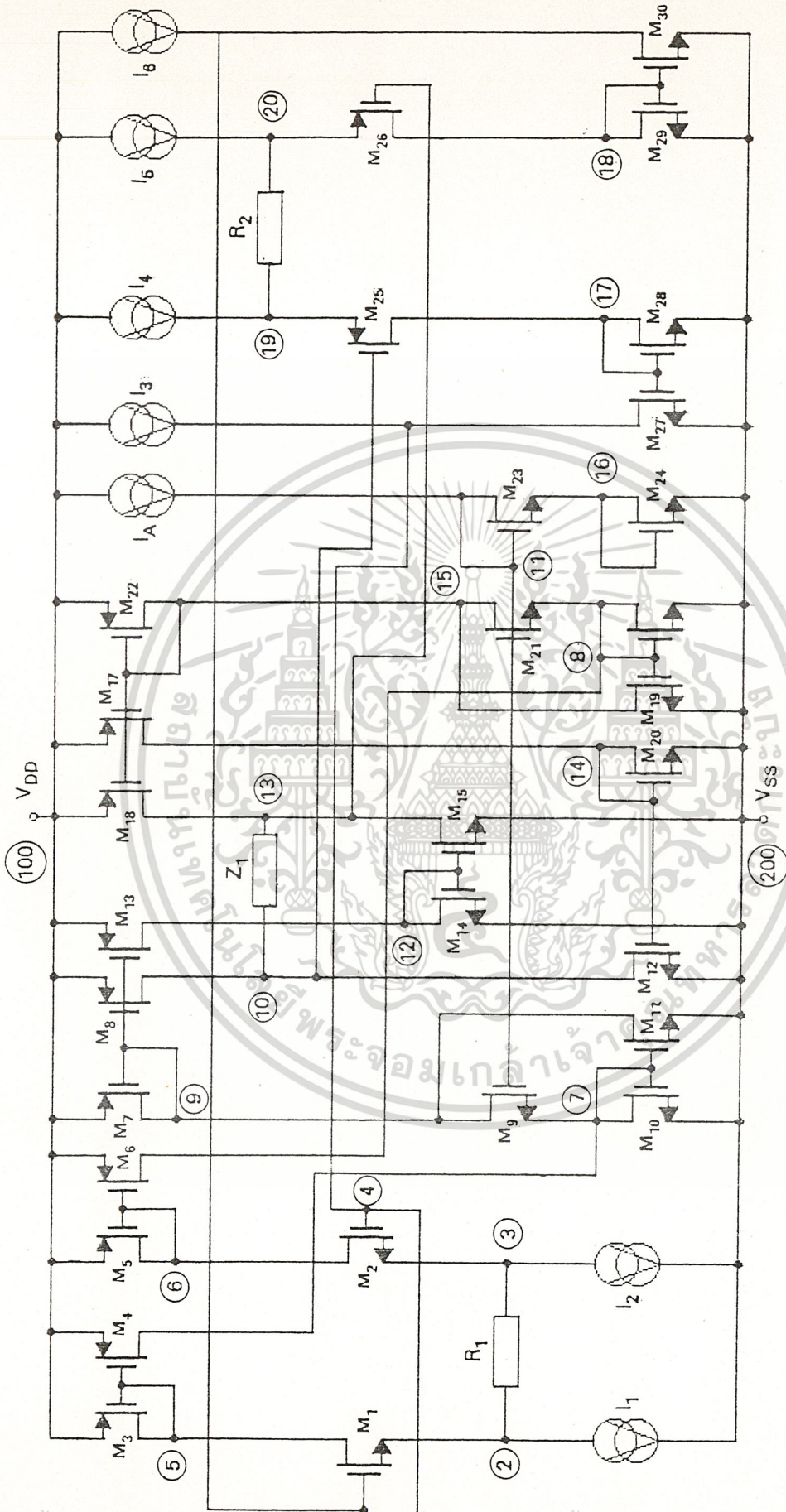
จากสมการที่ (4.81) และ (4.82) จึงสามารถสรุปได้ว่า กระแสปฏิบัติงาน ของวงจรคือ

$$-I < i_1 < I \quad (4.83)$$

และในวงจรนี้เลือกให้แหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I = 1 \text{ mA}$  ดังนั้นกระแสปฏิบัติงานจะมีค่าประมาณ  $-1 \text{ mA} < i_1 < 1 \text{ mA}$

#### 4.5 การทดลองและผลการทดลอง

วิธีการทดลองจะใช้กระบวนการเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.5 คือมีการทดลองจริงและโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น, เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบและวิเคราะห์วงจรเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันหลักการของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

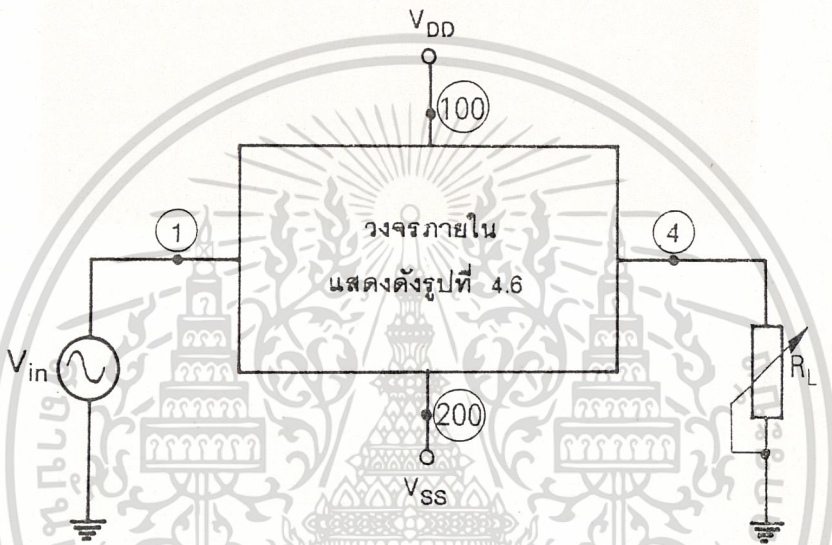


รูปที่ 4.6 แสดงโน้ตต่าง ๆ ของวงจรวจรเลียนแบบหลอดวสุทเทียวนำเข้าเพื่ออ้างอิงในการ  
ทดลองและการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PSpice

วงจรที่นำเสนอนี้ และเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงการทดลองและการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PSpice จึงกำหนดวงจรและหมายเลขประจำจุด แต่ละจุดของวงจรในรูปที่ 4.4 ได้ดังรูปที่ 4.6

4.5.1 การทดลองเพื่อหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ขณะแทน  $Z_1$  ด้วยตัวต้านทาน

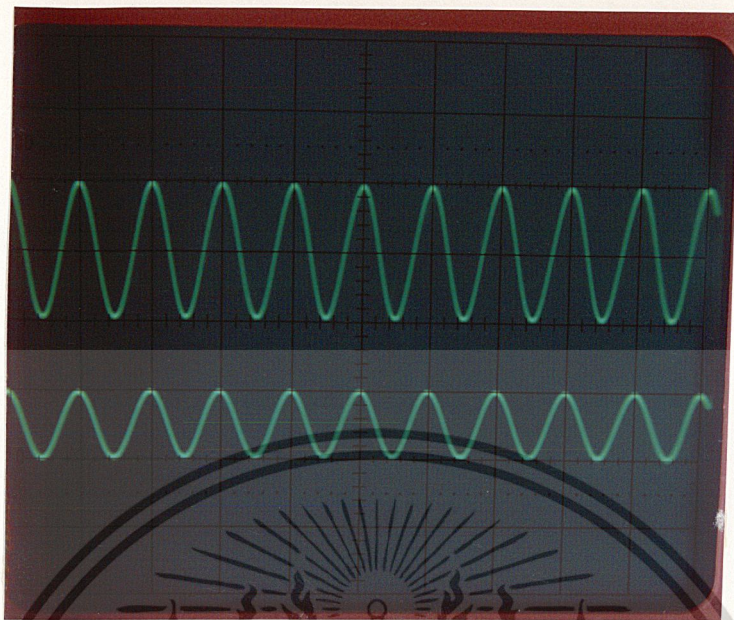
การทดลองในหัวข้อนี้จะต่อวงจรตามรูปที่ 4.7 โดยวงจรภายในคือวงจรในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.7 วงจรการทดลองหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ขณะแทน  $Z_1 = 10 \text{ k}\Omega$

นั้นโดยแทน  $Z_1$  ด้วยค่าความต้านทานเท่ากับ  $10 \text{ k}\Omega$  และ  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  และปรับค่ากระแสแสดงที่ให้  $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = 1 \text{ mA}$  ส่วน  $I_A$  ปรับไว้ที่  $0.5 \text{ mA}$  เพื่อจะทดลองหาค่า  $K=1$  และใช้ศักดาจ่ายให้กับวงจร  $V_{DD}$  เท่ากับ  $10 \text{ โวลต์}$  และ  $V_{SS}$  เท่ากับ  $-10 \text{ โวลต์}$  และทดลองป้อนสัญญาณไซน์ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ขนาด  $2 \text{ V}_{p-p}$  และวัดสัญญาณที่จุด 4 และปรับค่าความต้านทาน  $R_L$  จนกระทั่งสัญญาณมีขนาดลดเหลือครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุท นำค่าของความต้านทานดังกล่าวมาวัดได้ค่าประมาณ  $13 \text{ k}\Omega$  ซึ่งนั่นแสดงว่าค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรขณะแทน  $Z_1 = R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  นั้นจะมีค่าประมาณ  $13 \text{ k}\Omega$  ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของวงจรในหัวข้อ 3.4.1 ดังสมการที่ 4.31 และแสดงภาพถ่ายของสัญญาณที่จุด 4 และจุด 8 ของวงจร ดังรูปที่ 4.8 และเมื่อทดลองเปลี่ยนค่ากระแส  $I_A$  โดยเริ่มจาก  $250 \text{ uA}$  ถึง  $5 \text{ mA}$

พบว่าศักดาที่จุด 4 แปรผันตรงกับการเปลี่ยนกระแส  $I_A$  และจากการทดลองพบว่าช่วงที่กระแสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รวมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นค่า  $I_A$  เท่ากับ  $100 \text{ uA}$  ถึง  $250 \text{ uA}$  นั้น ศักดาที่เอาท์พุทจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งผลที่ได้จะเห็นไม่ต่างกันทีเดียว ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลัง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายสัญญาณจากรูปที่ 4.7 ขณะปรับ  $R_L = Z_{in}$

รูปบน สัญญาณที่จุด 1 ความถี่ 10 kHz ขนาด 2 V<sub>p-p</sub>

รูปล่าง สัญญาณที่จุด 4 ความถี่ 10 kHz ขนาด 1 V<sub>p-p</sub>

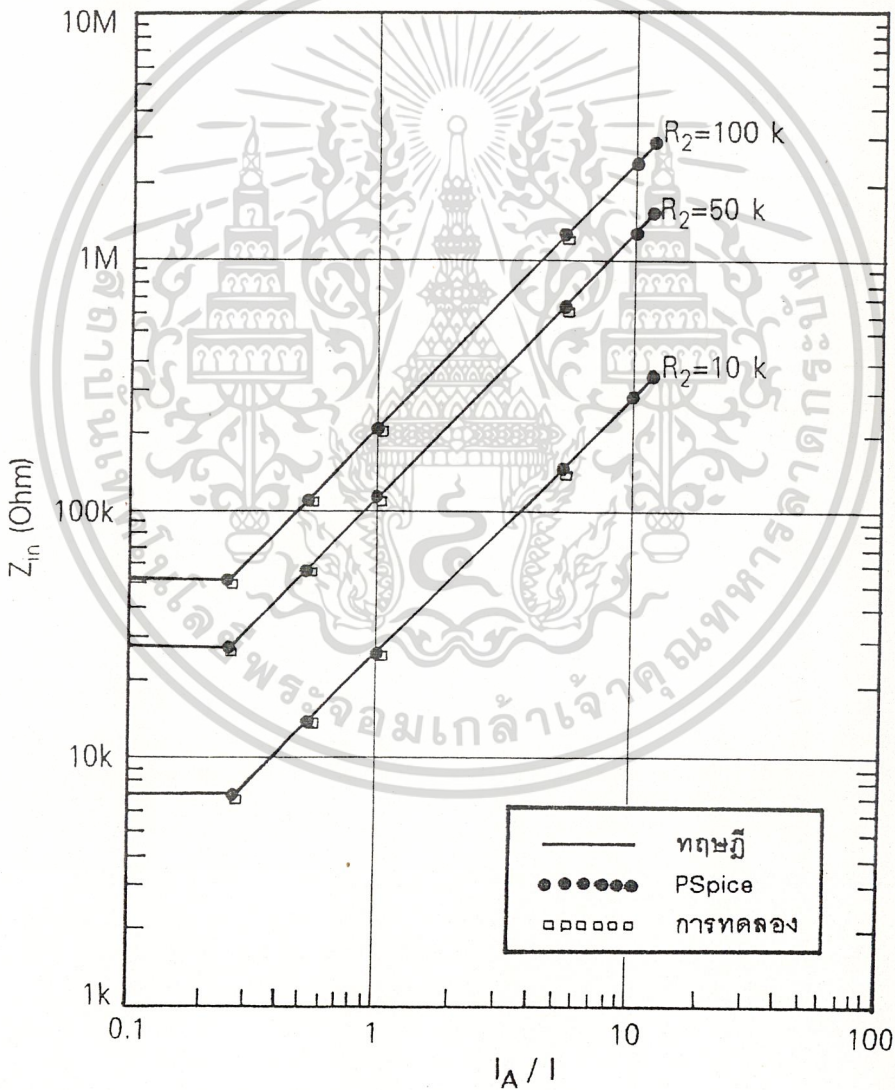
ว่าสอดคล้องตามสมการเงื่อนไขการออกแบบวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กคือ  $K \leq 2$  หรือ  $I_A/I$  จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.25 ดังนั้นกระแส  $I_A$  จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 250  $\mu A$  จากผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ กับอัตราส่วนของกระแส  $I_A/I$  ที่ค่าความต้านทาน  $R_1=R_2=Z_1=10\text{ k}\Omega$ , 30  $\text{k}\Omega$  และ 100  $\text{k}\Omega$  แสดงได้ดังรูปที่ 4.9

และเพื่อยืนยันความถูกต้องของวงจรที่นำเสนอจึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบและวิเคราะห์วงจรเพื่อหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ จะใช้วงจรตามรูปที่ 4.7 โดยวงจรภายในจะอ้างอิงกับรูปที่ 4.6 และใช้  $R_L = 13.2\text{ k}\Omega$  กำหนดค่าอุปกรณ์และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามหัวข้อ 4.5.1 จะได้ตั้งโปรแกรมที่ 4.1 และผลจากการใช้โปรแกรม PSpice เพื่อเลียนแบบการทำงานของวงจรและวิเคราะห์วงจรจะเก็บไว้ในไฟล์ข้อมูลจากนั้นทำการวัด เพื่อหาค่าระดับสัญญาณที่จุด 1 และจุด 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ผลการวัดสัญญาณที่จุด 1 และ จุด 4 โดยใช้โปรแกรม PSpice พบว่าให้ค่าใกล้เคียง กับการทดลองจากวงจรจริง และสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีในหัวข้อที่ 4.4.1 และใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบและวิเคราะห์วงจรเพื่อหาความสัมพันธ์ของ  $Z_{in}$  กับกระแส  $I_A$  จะใช้วงจรดังรูปที่ 4.6 โดยเขียนรายละเอียดของวงจรไว้ในโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นจำเป็นต้องระบุชื่อผู้จัดทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกรมที่ 4.2 โดยในการเขียนแบบวงจรจะเปลี่ยนค่ากระแส  $I_A$  และวัดค่าของคักตาที่จุด 1 และจุด 4 และวัดกระแส  $i$  จะสามารถหาความสัมพันธ์ของอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจร ขณะกำหนด  $Z_1=R_1=R_2=10\text{ k}\Omega$  ,  $Z_1=R_1=R_2=50\text{ k}\Omega$  และ  $Z_1=R_1=R_2=100\text{ k}\Omega$  กับอัตราส่วนของกระแส  $I_A/I$  ได้ดังรูปที่ 4.9 และเราพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองและจากการใช้โปรแกรม PSpice จะให้ค่าใกล้เคียงกับค่าของการคำนวณจากทฤษฎีในหัวข้อ 4.4.1



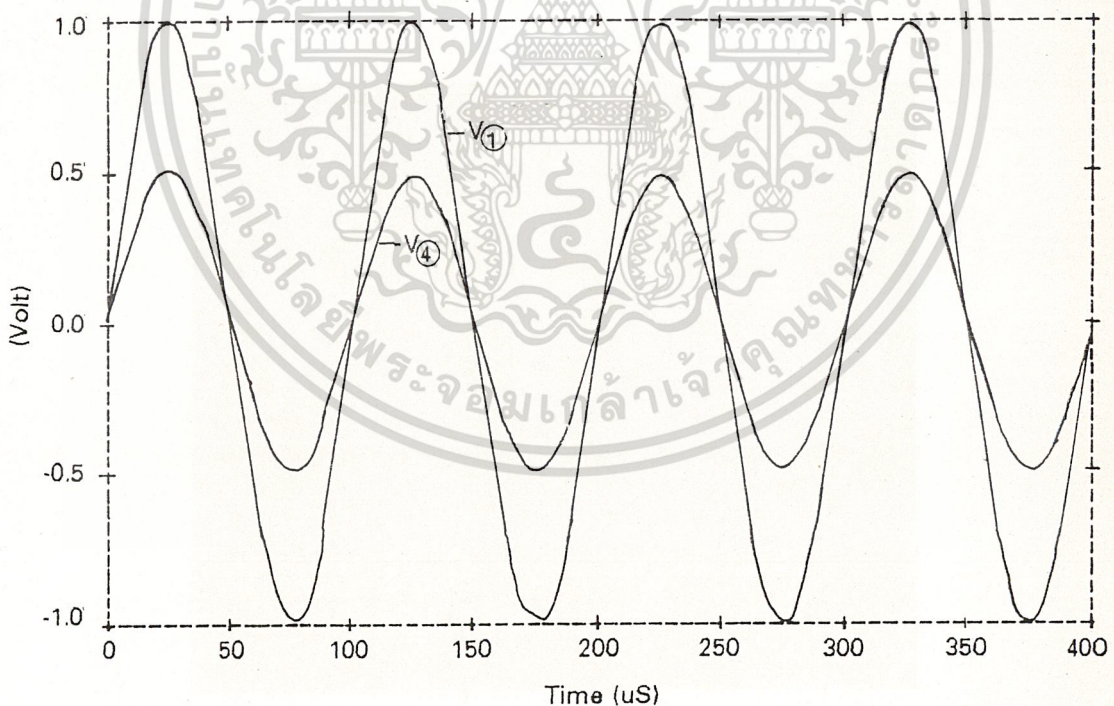
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทอิมพีแดนซ์ขณะแทน  $Z_1$  ด้วยตัวต้านทาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กับอัตราส่วนกระแส ( $I_A/I$ ) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 การทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ

ในการทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำจะทำการทดลองเป็นสองหัวข้อเช่นกัน คือ โดยการทดลองเพื่อวัดค่าความเหนี่ยวนำ และการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำ ที่แปรผันตรงกับค่าตัวเก็บประจุ และ กระแส  $I_A$  ซึ่งทดลองได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

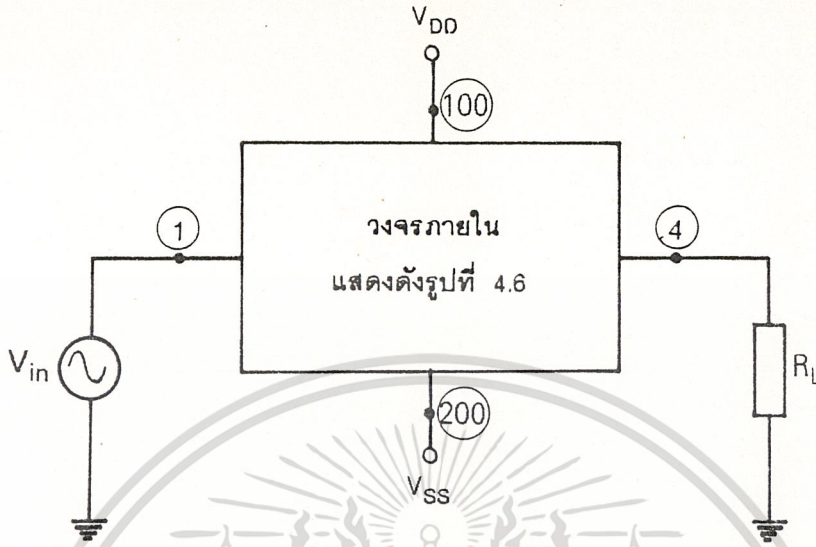
##### 4.5.2.1 การทดลองเพื่อวัดค่าความเหนี่ยวนำ

การทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำโดยการต่อวงจรดังรูปที่ 4.11 แบบดีสครีท โดยในส่วนของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.5.1 และใช้กระแส  $I_A = 0.5 \text{ mA}$  และ  $C_1 = 1 \text{ nF}$  ส่วนในวงจรรูปที่ 4.11 ใช้ความต้านทาน  $R_L$  เท่ากับ  $10 \text{ k}\Omega$  จากวงจรดังรูปที่ 4.11 เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง โดยนำขดลวดเหนี่ยวนำเสมือนต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน  $R_L$  ซึ่งมีค่าเท่า  $10 \text{ k}\Omega$  บ้อนสัญญาณไซน์ขนาด  $2 \text{ V}_{\text{p-p}}$

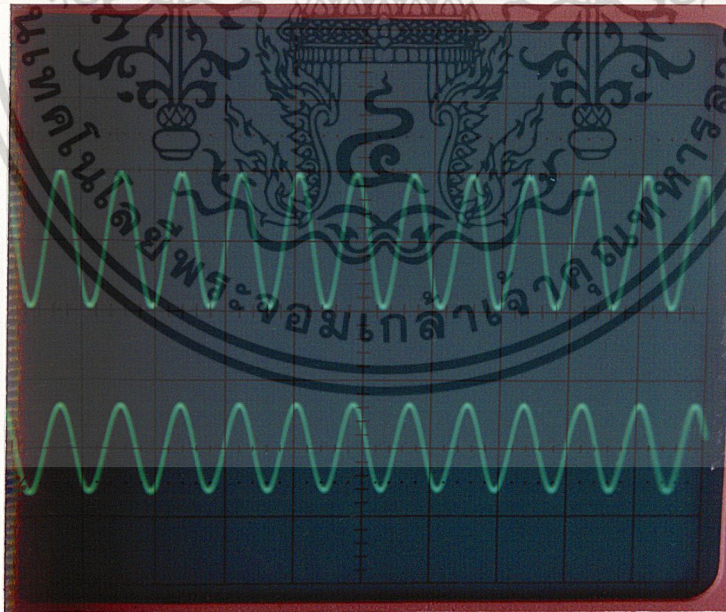


รูปที่ 4.10 ผลการวัดระดับคัทตาที่จุด 1 และ จุด 4 วงจรโดยโปรแกรม PSpice

ด้วยความถี่  $10 \text{ Hz}$  โดยวัดสัญญาณที่จุด 4 และเพิ่มความถี่จนกระทั่งระดับคัทตาของสัญญาณลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เหลือประมาณ  $1.4 \text{ V}_{\text{p-p}}$  และอ่านความถี่ได้ประมาณ  $12 \text{ kHz}$  ซึ่งเป็นความถี่คัทออฟ (Cutoff-frequency) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 วงจรการทดลองวัดค่าความถี่คutoff เพื่อหาค่าขีดลวดเหนี่ยวนำ



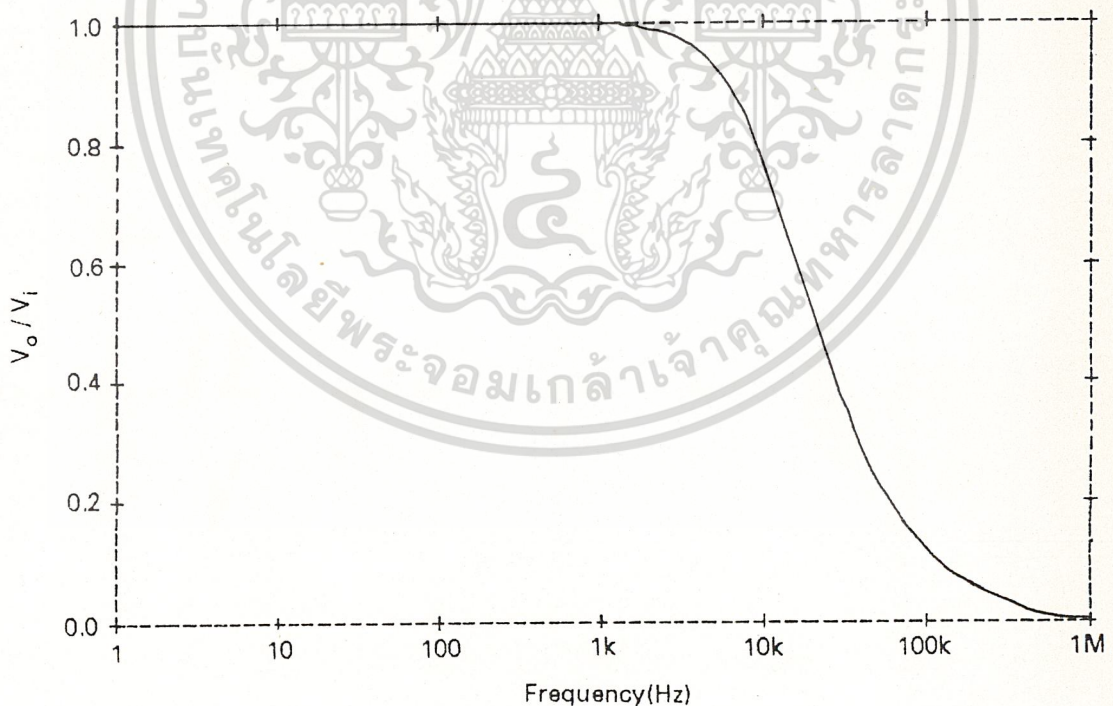
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายสัญญาณของวงจรรูปที่ 4.10 ขณะวัดความถี่คutoff เพื่อคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำเสมือน

รูปบน สัญญาณที่จุด 1 ความถี่ 10 kHz ขนาด 2 V<sup>p-p</sup>

รูปล่าง สัญญาณที่จุด 4 ความถี่ 10 kHz ขนาด 1.4 V<sup>p-p</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency) ของวงจรกรองความถี่และนำค่าความถี่ที่วัดได้ไปคำนวณ เพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำเสมือน โดยคำนวณจากสมการที่ (3.63) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเสมือน  $L_{eq}$  ประมาณ 132.62 mH ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณ และสอดคล้องตามหัวข้อการวิเคราะห์คุณสมบัติทางทฤษฎี และแสดงภาพถ่ายของสัญญาณที่จุด 1 และที่จุด 4 ขณะเป็นความถี่คัทออฟได้ดังรูปที่ 4.12 และเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบและวิเคราะห์การทำงานของวงจรเพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำเสมือน โดยกำหนดค่าอุปกรณ์ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามวงจรรูปที่ 4.11 และเขียนรายละเอียดของวงจรได้ดังโปรแกรมที่ 4.3 จากการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจร สามารถวัดสัญญาณของจุดที่ 4 โดยเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 1Hz ถึง 1MHz ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 ได้ความถี่คัทออฟ  $f_c$  ประมาณ 12.18 KHz ดังนั้นสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำได้โดยใช้สมการที่ (3.87) คำนวณค่าขดลวดเหนี่ยวนำเสมือนซึ่งจะได้ค่าประมาณ 131 mH และจากผลการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจรพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของสมการที่ 4.33 ผิดพลาดประมาณ 1.32 %

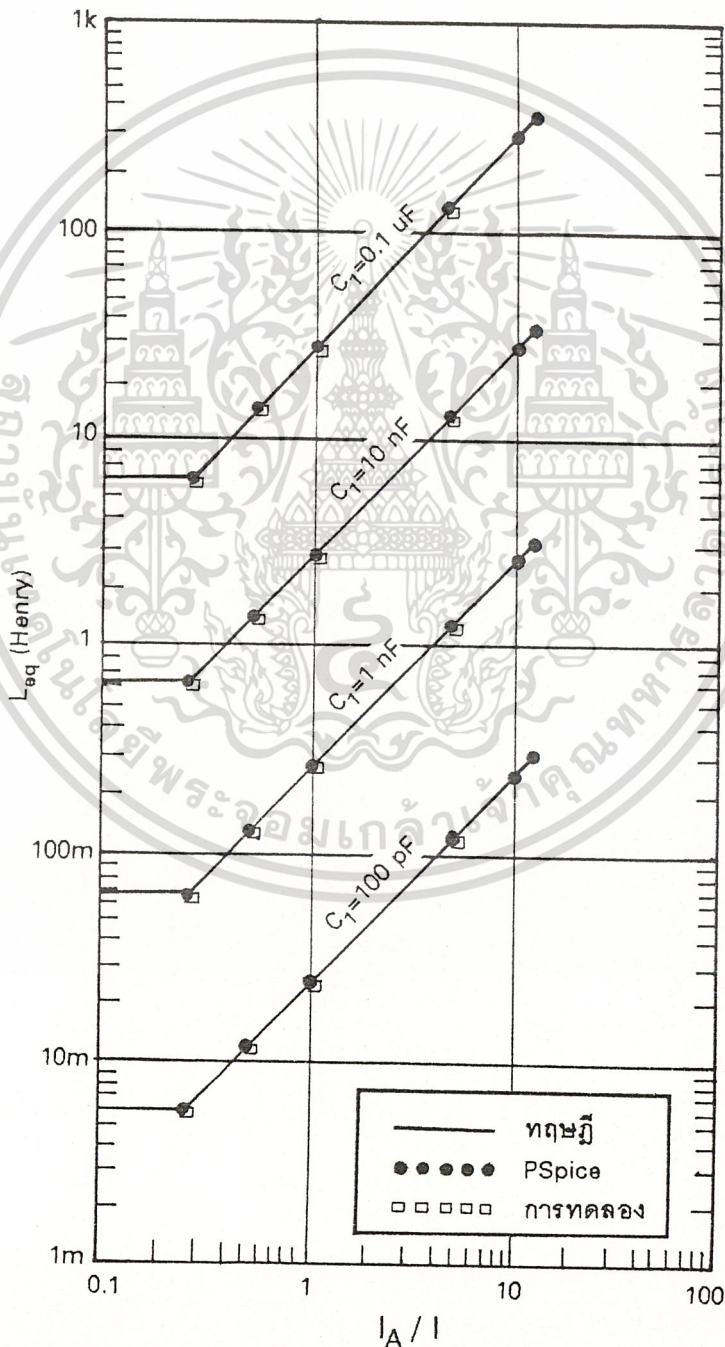


รูปที่ 4.13 ผลการวัดความถี่คัทออฟเพื่อนำไปหาค่าความเหนี่ยวนำเสมือน โดยใช้ โปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ของความเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และกระแส  $I_A$

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของขดลวดเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และกระแส  $I_A$  สามารถกระทำได้โดยการใช้วงจรดังรูปที่ 4.11 การทดลองโดยการวัดค่าความถี่ที่ออกจะกระทำเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.5.2.1 แต่ในหัวข้อนี้ได้ทดลองเปลี่ยน ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  เป็นค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ 100 pF, 1 nF, 10 nF และ 0.1uF โดยในการใช้ตัวเก็บประจุแต่ละค่าจะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $I_A / I$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองเปลี่ยนค่ากระแส  $I_A$  ดังนี้คือ 250  $\mu\text{A}$ , 300  $\mu\text{A}$ , 1 mA, 5 mA แต่ละค่ากระแส  $I_A$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะทดลองหาค่าความถี่คutoff เพื่อนำค่าความถี่คutoff มาคำนวณหาค่าความถี่ยวนำ และผลจากการทดลองหาค่าความถี่ยวนำดังกล่าว สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ และอัตราส่วนของกระแส  $I_A/I$  ดังรูปที่ 4.14 และเพื่อยืนยันผลการทดลอง และการวิเคราะห์วงจรทางทฤษฎีจึง ได้ทดลองโดยใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบและวิเคราะห์วงจร โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรดังรูปที่ 4.11 ไว้ในโปรแกรมที่ 4.4 และทำการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจรเพื่อหาค่าความถี่คutoff ที่ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  เท่ากับ 100 pF, 1 nF, 10 nF และ 0.1  $\mu\text{F}$  โดยที่ขณะตัวเก็บประจุแต่ละค่า นั้นจะเปลี่ยนค่ากระแส  $I_A$  เป็น 5 ค่าด้วยกันคือ 250  $\mu\text{A}$ , 500  $\mu\text{A}$ , 1 mA, 5 mA และ 10 mA และแต่การเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  และกระแส  $I_A$  โดยเลียนแบบและวิเคราะห์วงจรและวัดค่าความถี่คutoff เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความถี่ยวนำ ซึ่งผลที่ได้จากการเลียนแบบและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ของความถี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และกระแส  $I_A/I$  ได้ดังรูปที่ 4.14 โดยจะเปรียบเทียบให้เห็นถึงค่าที่ได้จากการคำนวณของทฤษฎีการทดลองและจากการเลียนแบบและวิเคราะห์โดยโปรแกรม PSpice เราพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงทั้งสองให้ใกล้เคียงกันและมีค่าผิดพลาดเมื่อเทียบกับค่าที่ได้ทางทฤษฎีประมาณ 1.32 % และความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎี

#### 4.5.3 การทดลองหาค่าความถี่ปฏิบัติงานของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

การทดลอง เพื่อหาค่าความถี่ปฏิบัติงานของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ โดยวิธีอเล็กทรอนิกส์ จะแยกพิจารณาเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.5.3 คือทดลองหาค่าความถี่ปฏิบัติงานของวงจร เพื่อหาขีดจำกัดทางความถี่ของวงจร เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ระหว่างขาเกตและซอร์สของมอสเฟต โดยกำหนดให้  $Z_1=R_1=R_2=10\text{ k}\Omega$  และทดลองหาค่าอินดักทีฟรีเอกแตนซ์  $Z_{L_{eq}}$  ที่แปรตามความถี่ต่าง ๆ โดยจะแยกทดลองตามหัวข้อดังต่อไปนี้

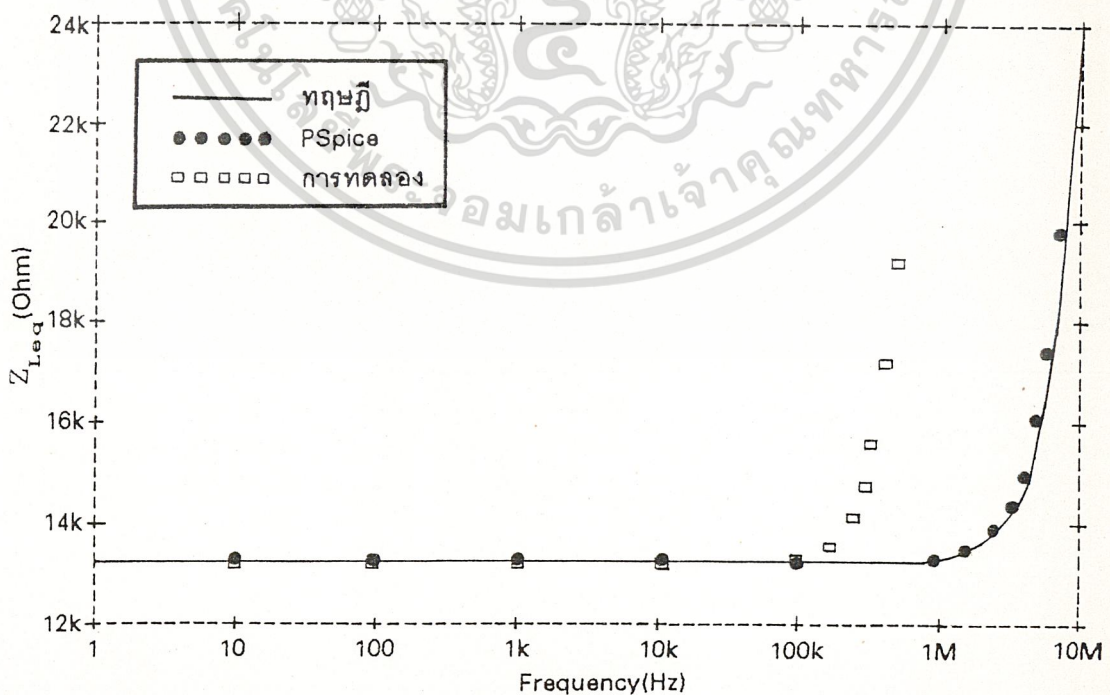
##### 4.5.3.1 การทดลองหาค่าความถี่ปฏิบัติงาน

การทดลองหาค่าความถี่ปฏิบัติงานของวงจร โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 4.7 และใช้ค่า  $Z_1=R_1=R_2=10\text{ k}\Omega$  ส่วน  $R_L=10\text{ k}\Omega$  ใช้สัญญาณไซน์ขนาด 2 V<sub>p-p</sub> วัดสัญญาณที่จุด 4 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในการใช้งานเพื่อจุดประสงค์เพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัด  
 เติมความถี่จนกระทั่งสัญญาณที่จุด 4 เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ และอ่านความถี่ได้ประมาณ 380  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

kHz ซึ่งพบว่าค่าความถี่ที่ได้นั้นต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี เนื่องจากในการต่อแบบแยกอุปกรณ์โดยใช้มอสเฟตจากไอซีเบอร์ MC14007 นั้นเราไม่สามารถใช้อุปกรณ์ทุกตัวได้ คือใช้อุปกรณ์ภายในได้เพียงสองตัวต่อไอซีหนึ่งตัว ดังนั้นจึงต้องใช้ไอซีจำนวนมากดังได้แสดงวงจรต่อใช้งานจริงในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่ามีความซับซ้อนใหญ่ทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์มากกว่าการนำไปผลิตเป็นวงจรรวมจึงเป็นผลให้เกิดการตอบสนองต่อความถี่ไม่สูงเท่ากับผลทางทฤษฎี

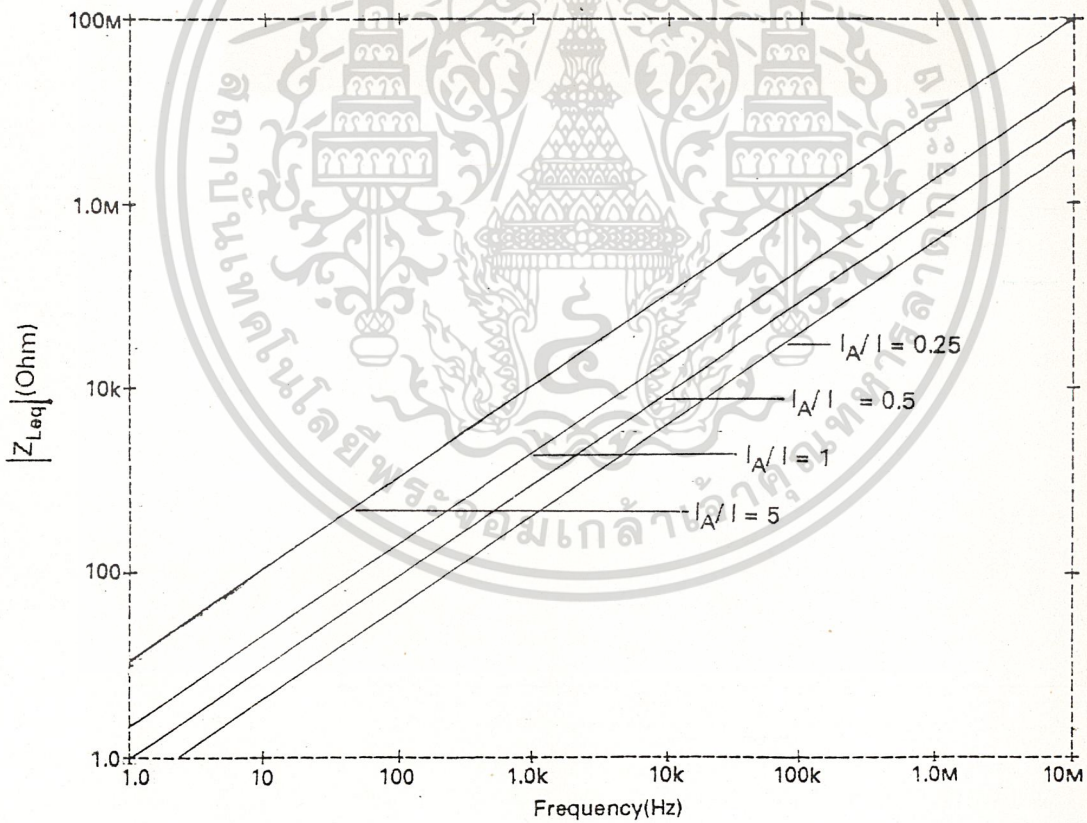
แต่อย่างไรก็ตามเพื่อยืนยันผลจากการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีจะใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบและวิเคราะห์วงจรเพื่อยืนยันผลในทางทฤษฎี โดยใช้พารามิเตอร์ของวงจรดังรูปที่ 4.7 และ กำหนดรายละเอียดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดัง โปรแกรมที่ 4.5 และผลจากการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจร วัดค่าการตอบสนองความถี่ของวงจร (โดยวัดค่า  $Z_{in}$ ) ได้ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรดังรูปที่ 4.15 จากผลที่ได้เราพบว่าได้ความถี่ที่ประมาณ 7.5 MHz ซึ่งให้ผลสอดคล้องตามการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในหัวข้อ 4.4.3 และจากรูปที่ 4.15 ได้เปรียบเทียบผลจากการทดลอง การเลียนแบบและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม PSpice กับค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการเลียนแบบและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจะให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎีมากกว่าผลที่ได้จากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.15 การตอบสนองความถี่ของวงจรขณะ  $Z_1=R_1=R_2=10\text{ k}\Omega$   
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3.2 การทดลองวัดค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ( $Z_{Leq}$ ) ที่แปรผันตามความถี่

การทดลองวัดค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ที่แปรผันตามความถี่ค่าต่าง ๆ เพื่อความสะดวกในการทดสอบ จึงใช้โปรแกรม PSpice เพื่อช่วยเลียนแบบการทำงาน และวิเคราะห์ห้วงจรเพื่อวัดค่าต่าง ๆ ตามจุดประสงค์ของหัวข้อนี้ โดยการทดลองโดยใช้วงจรตามรูปที่ 4.7 โดยกำหนดค่าตามหัวข้อ 4.5.2 และการทดลองจะเลือกค่าความเหนี่ยวนำที่ค่ากลาง ๆ โดยเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 1 \text{ nF}$  ส่วนกระแส  $I_A$  จะใช้ทดลองตั้งแต่  $250 \text{ uA}$ ,  $500 \text{ uA}$ ,  $1 \text{ mA}$ ,  $5 \text{ mA}$  เพื่อทดลองหาค่า  $Z_{Leq}$  ที่แปรผันตามความถี่ ซึ่งค่ารายละเอียดของวงจรเขียนไว้ในไฟล์ข้อมูลตั้ง โปรแกรมที่ 4.6 และจากผลการเลียนแบบและวิเคราะห์ห้วงจรสามารถหาความสัมพันธ์ของ  $Z_{Leq}$  ที่แปรผันตามความถี่และอัตราส่วนของกระแส  $I_A/I$  ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปที่ 4.16

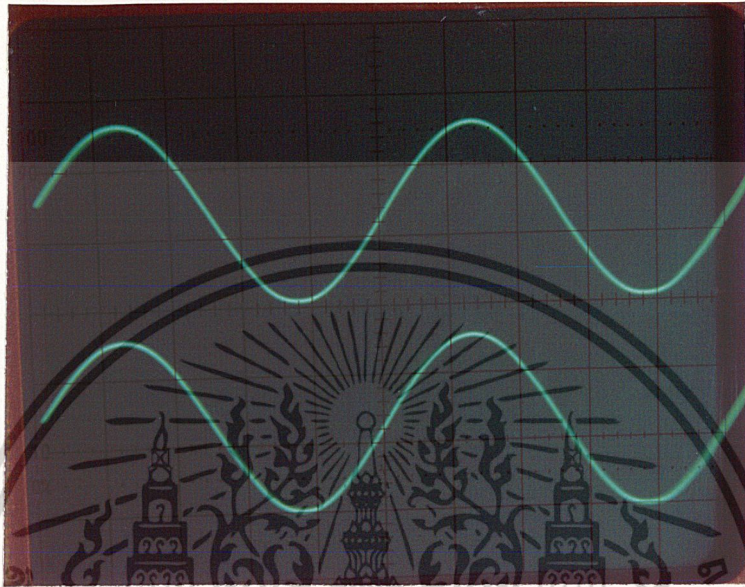


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของ  $Z_{Leq}$  ที่แปรผันตามความถี่และอัตราส่วนของกระแส  $I_A/I$

4.5.4 การทดลองหากระแสและศักดาปฏิบัติงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าระบบควรใช้ตามเงื่อนไขการใช้งาน โดยไม่ต้องแจ้งให้ทราบล่วงหน้า การทดลองเพิ่มเติม ทดลองเพิ่ม ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าศักดาอินพุทจนกระทั่งศักดาสัญญาณที่จุด 4 เกิดการผิดเพี้ยนไปจะได้ค่าศักดาปฏิบัติงานประมาณ  $13 V_{p-p}$  ดังแสดงในภาพถ่ายรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นว่าสอดคล้องตามการวิเคราะห์ผลทาง



รูปที่ 4.17 แสดงภาพถ่ายของวงจรรูปที่ 4.7 ขณะวัดศักดาปฏิบัติ

รูปบน สัญญาณที่จุด 1 ความถี่ 10 kHz ขนาด  $12.5 V_{p-p}$

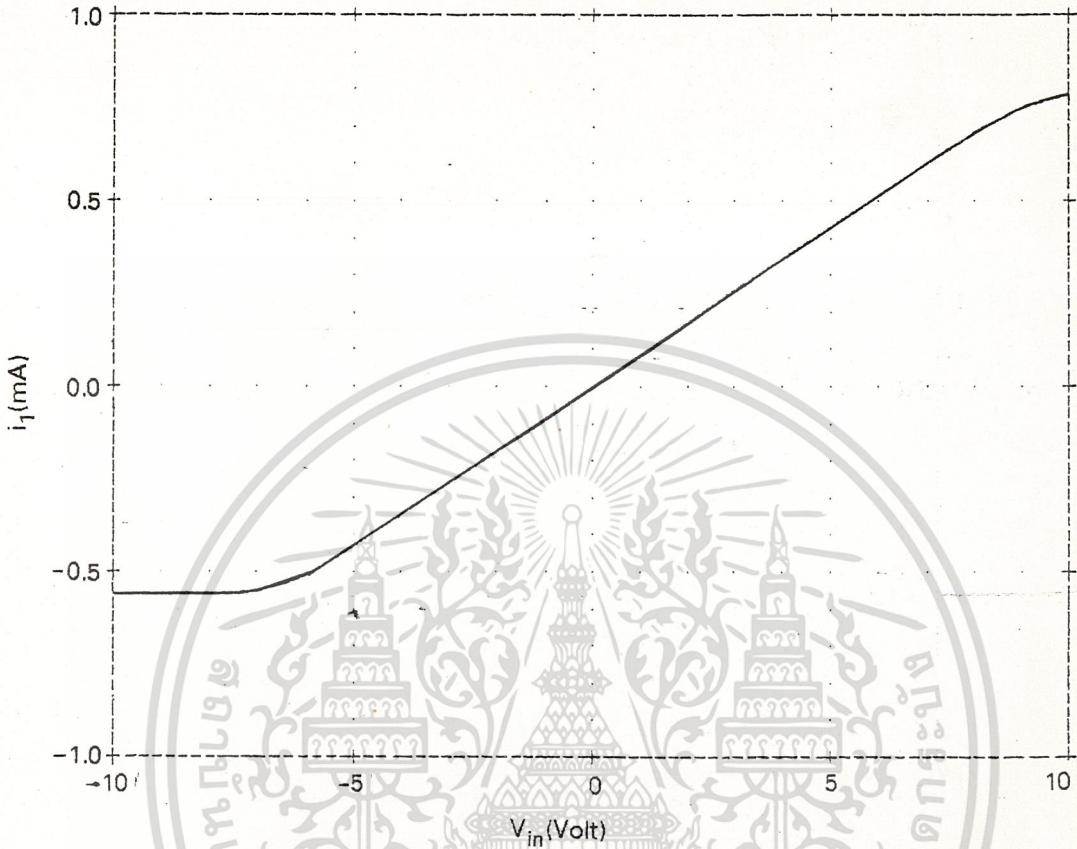
รูปล่าง สัญญาณที่จุด 4 ความถี่ 10 kHz ขนาด  $6.25 V_{p-p}$

ทฤษฎีในหัวข้อ 4.4.5 อย่างไรก็ตามยังได้ทดลอง เลียนแบบการทำงานและวิเคราะห์ผลของวงจรเพื่อหากระแสและศักดาปฏิบัติงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice โดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรรูปที่ 4.7 ไว้ในไฟล์ข้อมูล ดังโปรแกรมที่ 4.7 ไว้ในไฟล์ข้อมูล โดยทดลองให้ศักดาอินพุทเริ่มจาก  $-10V$  เพิ่มค่าครั้งละ  $1V$  จนกระทั่งถึง  $10V$  วัดกระแสที่ไหลผ่าน  $R_1$  ได้ผลการเลียนแบบและวิเคราะห์วงจรดังรูปที่ 4.18 และสุดท้ายได้แสดงภาพถ่ายวงจรจริงที่ต่อลักษณะดิสครีท แบบแผ่น PCB เพื่อใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.19

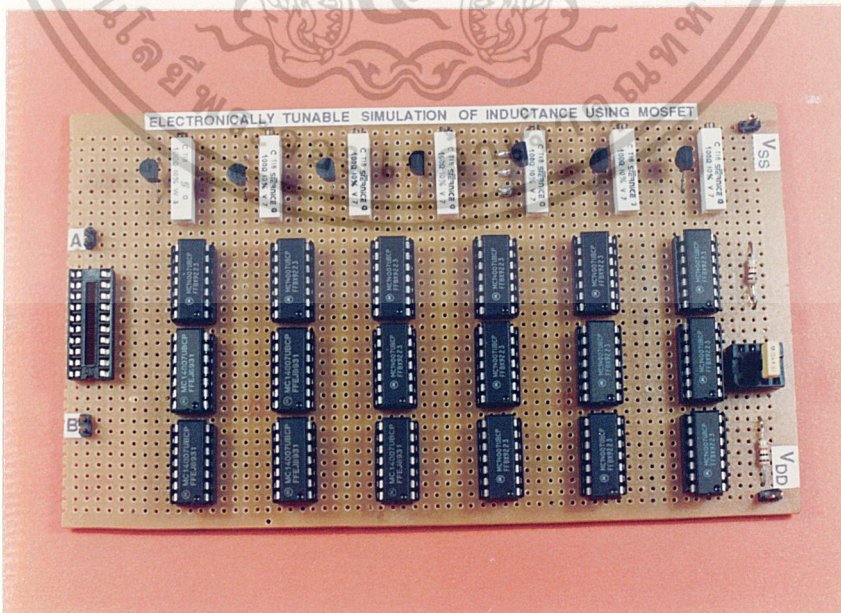
จากการทดลองทดสอบวงจรพบว่าวงจรที่นำเสนอในหัวข้อนี้ให้ผลตรงตามทฤษฎีและให้ความแม่นยำสูงมากวงจรหนึ่งและเมื่อเทียบกับวงจรที่ใช้อินทกชนิตอื่น ที่เคยปรากฏในวารสารต่าง ๆ และวงจรที่นำเสนอขึ้นมานี้มีขนาดเล็กกว่า ให้ความแม่นยำสูง และมีการตอบสนองต่อความถี่สูงกว่า ซึ่งถือได้ว่าเป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพมากวงจรหนึ่ง และถ้าหากมีการนำไปผลิตเป็นวงจรรวมจะทำให้มีขนาดเล็ก และลดต้นทุนในการผลิตได้ และจะสามารถนำไปใช้งานได้สะดวกและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.18 ผลการวัดกระแสและคักตาปฏิบัติงาน โดยใช้ โปรแกรม PSpice



รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟตแบบปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ค่าได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งต่อแบบดิสครีทบนแผ่น PCB  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\* PRO.4.1 TEST INPUT IMPEDANCE \*\*\*\*

. OPTIONS ACCT NOPAGE

. WIDTH OUT=80

. TEMP 37

. TRAN/OP 3US .5MS

VIN1 1 0 AC 1 SIN(0 1 10K)

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U  
 M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U  
 M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U  
 M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M25 36 10 19 19 MP L=10U W=100U  
 M26 37 13 20 20 MP L=10U W=100U  
 M27 4 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M28 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M29 18 18 200 200 MN L=10U W=100U  
 M30 1 18 200 200 MN L=10U W=100U  
 I1 2 200 DC 1MA  
 I2 3 200 DC 1MA  
 I3 100 4 DC 1MA  
 I4 100 19 DC 1MA  
 I5 100 20 DC 1MA  
 I6 100 1 DC 1MA  
 IA 100 11 DC 500UA  
 R1 2 3 10K  
 R2 19 20 10K  
 R 10 13 10K  
 RL 4 0 13.3K

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

.PROBE

.END

\*\*\* PRO.4.2 MEASUREMENT Zin:IA \*\*\*

.OPTIONS ACCT NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC DEC 10 1 10MEG

VIN1 1 0 AC 1

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U

M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U

M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U

M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U

M25 36 10 19 19 MP L=10U W=100U

M26 37 13 20 20 MP L=10U W=100U

M27 4 17 200 200 MN L=10U W=100U

M28 17 17 200 200 MN L=10U W=100U

M29 18 18 200 200 MN L=10U W=100U

M30 1 18 200 200 MN L=10U W=100U

I1 2 200 DC 1MA

I2 3 200 DC 1MA

I3 100 4 DC 1MA

I4 100 19 DC 1MA

I5 100 20 DC 1MA

I6 100 1 DC 1MA

IA 100 11 DC 250UA

\*IA 100 11 DC 500UA

\*IA 100 11 DC 1MA

\*IA 100 11 DC 2MA

\*IA 100 11 DC 5MA

\*IA 100 11 DC 10MA

R1 2 3 10K

R2 19 20 10K

R 10 13 10K

, MODEL MN NMOS (LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END

```



โปรแกรมที่ 4.2 แสดงโปรแกรมวิเคราะห์วงจรเพื่อหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับผู้ที่ลงทะเบียนที่การศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ที่สัมพันธ์กับ  $I_A/I$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\*\* PRO.4.3 CUTOFF FREQUENCY FOR Leq \*\*\*\*\*

. OPTIONS ACCT NOPAGE

. WIDTH OUT=80

. TEMP 37

. AC DEC 10 1 10MEG

VIN1 1 0 AC 1

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U  
 M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U  
 M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U  
 M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M25 36 10 19 19 MP L=10U W=100U  
 M26 37 13 20 20 MP L=10U W=100U  
 M27 4 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M28 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M29 18 18 200 200 MN L=10U W=100U  
 M30 1 18 200 200 MN L=10U W=100U  
 I1 2 200 DC 1MA  
 I2 3 200 DC 1MA  
 I3 100 4 DC 1MA  
 I4 100 19 DC 1MA  
 I5 100 20 DC 1MA  
 I6 100 1 DC 1MA  
 IA 100 11 DC 500UA  
 R1 2 3 10K  
 R2 19 20 10K  
 C1 10 13 1NF

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4  
 + CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)  
 .MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4  
 + CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)  
 .PROBE  
 .END

\*\*\* PRO.4.4 CUTOFF FREQUENCY FOR Leq:IA \*\*\*

.OPTIONS ACCT NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC DEC 10 1 10MEG

VIN1 1 0 AC 1 SIN(0 1 10K)

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U

M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U

M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U

M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U

M25 36 10 19 19 MP L=10U W=100U

M26 37 13 20 20 MP L=10U W=100U

M27 4 17 200 200 MN L=10U W=100U

M28 17 17 200 200 MN L=10U W=100U

M29 18 18 200 200 MN L=10U W=100U

M30 1 18 200 200 MN L=10U W=100U

I1 2 200 DC 1MA

I2 3 200 DC 1MA

I3 100 4 DC 1MA

I4 100 19 DC 1MA

I5 100 20 DC 1MA

I6 100 1 DC 1MA

IA 100 11 DC 0.25MA

\*IA 100 11 DC 0.5MA

\*IA 100 11 DC 1MA

\*IA 100 11 DC 2MA

\*IA 100 11 DC 5MA

\*IA 100 11 DC 10MA

R1 2 3 10K

R2 19 20 10K

C 10 13 100PF

\*C 10 13 1NF

\*C 10 13 10NF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

\*C 10 13 0.1UF

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*C 10 13 1UF

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

.PROBE

END



โปรแกรมที่ 4.4 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์ เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเหนี่ยวนำ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกระใช้ งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
กับตัวเก็บประจุและ  $I_A/I$   
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\* PRO.4.5 FREQUENCY RESPONSE \*\*\*\*\*

.OPTIONS ACCT NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC DEC 10 1 8MEG

VIN1 1 0 AC 1 SIN(0 1 10K)

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการติดต่อ | สิ่งนี้ไม่ใช่ทรัพย์สินของบริษัทและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U  
 M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U  
 M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U  
 M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M25 36 10 19 19 MP L=10U W=100U  
 M26 37 13 20 20 MP L=10U W=100U  
 M27 4 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M28 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M29 18 18 200 200 MN L=10U W=100U  
 M30 1 18 200 200 MN L=10U W=100U  
 I1 2 200 DC 1MA  
 I2 3 200 DC 1MA  
 I3 100 4 DC 1MA  
 I4 100 19 DC 1MA  
 I5 100 20 DC 1MA  
 I6 100 1 DC 1MA  
 IA 100 11 DC 500UA  
 R1 2 3 10K  
 R2 19 20 10K  
 R 10 13 10K  
 .MODEL MN NMOS (LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4  
 + CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)  
 .MODEL MP PMOS (LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4  
 + CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)  
 .PROBE  
 .END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 โปรแกรมที่ 4.5 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์เพื่อหาผลตอบสนองความถี่ของ Zin  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\* PRO.4.6 INDUCTIVE REACTANCE \*\*\*\*

.OPTIONS ACCT NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC DEC 10 1 8MEG

VIN1 1 0 AC 1

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U

M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U

M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U

M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U

M25 36 10 19 19 MP L=10U W=100U

M26 37 13 20 20 MP L=10U W=100U

M27 4 17 200 200 MN L=10U W=100U

M28 17 17 200 200 MN L=10U W=100U

M29 18 18 200 200 MN L=10U W=100U

M30 1 18 200 200 MN L=10U W=100U

I1 2 200 DC 1MA

I2 3 200 DC 1MA

I3 100 4 DC 1MA

I4 100 19 DC 1MA

I5 100 20 DC 1MA

I6 100 1 DC 1MA

IA 100 11 DC 0.25MA

\*IA 100 11 DC 0.5MA

\*IA 100 11 DC 1MA

\*IA 100 11 DC 2MA

\*IA 100 11 DC 5MA

R1 2 3 10K

R2 19 20 10K

C1 10 13 1NF

. MODEL MN NMOS (LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4  
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)  
.PROBE  
.END
```



โปรแกรมที่ 4.6 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์ เพื่อหาค่าอินทิกรัลที่ฟรีแอกแดนซ์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่ประสงค์แสวงหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\* PRO.4.7 DINAMIC RANGE \*\*\*\*

.OPTIONS ACCT NOPAGE

,WIDTH OUT=80

,TEMP 37

,VIN 1 0

,DC VIN -10 10 1

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่วารณใดๆ ทั้งสน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U  
 M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U  
 M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U  
 M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M25 36 10 31 31 MP L=10U W=100U  
 M26 37 13 32 32 MP L=10U W=100U  
 M27 4 36 200 200 MN L=10U W=100U  
 M28 36 36 200 200 MN L=10U W=100U  
 M29 37 37 200 200 MN L=10U W=100U  
 M30 1 37 200 200 MN L=10U W=100U  
 M31 40 40 200 200 MN L=10U W=100U  
 M32 2 40 200 200 MN L=10U W=100U  
 M33 4 42 100 100 MP L=10U W=100U  
 M34 31 42 100 100 MP L=10U W=100U  
 M35 32 42 100 100 MP L=10U W=100U  
 M36 1 42 100 100 MP L=10U W=100U  
 M37 42 42 100 100 MP L=10U W=100U  
 M38 3 40 200 200 MN L=10U W=100U  
 I1 100 40 DC 1MA  
 I2 42 200 DC 1MA  
 IA 100 11 DC 500UA  
 R1 2 3 10K  
 R2 31 32 10K  
 R 10 13 10K  
 RL 4 0 1E-15

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4  
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)  
.PROBE  
.END
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โปรแกรมที่ 4.7 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์เพื่อค่ากระแสและศักดาบัพตั้งวง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

## การประยุกต์ใช้งานวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

## 5.1 บทนำ

วงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้มอสเฟต ทั้งชนิดปรับค่าได้โดยวิธีเปลี่ยนค่าอุปกรณ์พาสซีฟ  $R_1$ ,  $R_2$  หรือ  $C_1$  และปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์  $I_A$  โดยมากจะนำไปประยุกต์เป็นวงจรกรองความถี่ (Filter Circuits) [29-30] และวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Circuits) เป็นส่วนมาก เพราะทั้งวงจรกรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์เป็นหัวใจสำคัญในงานวิศวกรรมไฟฟ้าหลายสาขา เช่น สาขาอิเล็กทรอนิกส์ และ สาขาไฟฟ้าสื่อสาร เป็นต้น โดยการประยุกต์จะมีวิธีการที่แตกต่างกันไป แต่ในบทนี้จะเป็นตัวอย่งการประยุกต์ใช้งานเพื่อเป็นการทดสอบว่าวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำในบทที่ 3 และบทที่ 4 สามารถประยุกต์ใช้งานได้จริง ดังนั้นในบทนี้ จึงแสดงตัวอย่างในการนำวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำในบทที่ 3 ไปใช้งานโดยใช้เป็น วงจรกรองความถี่อันดับหนึ่ง วงจรกรองความถี่อันดับสอง และวงจรออสซิลเลเตอร์เช่นเดียวกัน วงจรที่ออกแบบขึ้นในบทที่ 4 ได้นำไปประยุกต์ใช้เป็น วงจรกรองความถี่อันดับหนึ่ง วงจรกรองความถี่อันดับสองแบบปรับค่าความถี่ที่ออฟ ความถี่ศูนย์กลาง โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรออสซิลเลเตอร์แบบปรับค่าความถี่ออสซิลเลทได้ โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ ดังจะกล่าวรายละเอียดตามหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

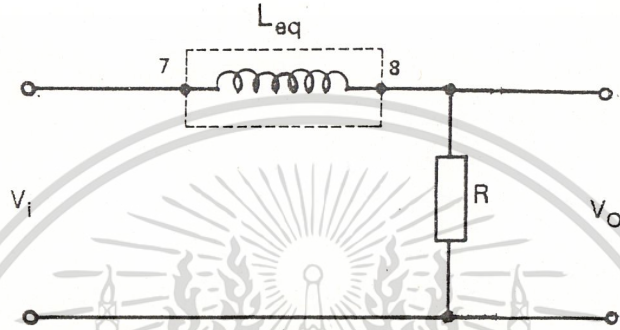
## 5.2 วงจรกรองความถี่

ในหัวข้อนี้จะนำวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำในบทที่ 3 มาใช้เป็นวงจรกรองความถี่ ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลียนแบบ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High pass filter) วงจรกรองผ่านแถบความถี่ (Bandpass - filter) และวงจรจำกัดแถบความถี่ (Band reject filter) ตามหัวข้อต่อไปนี้

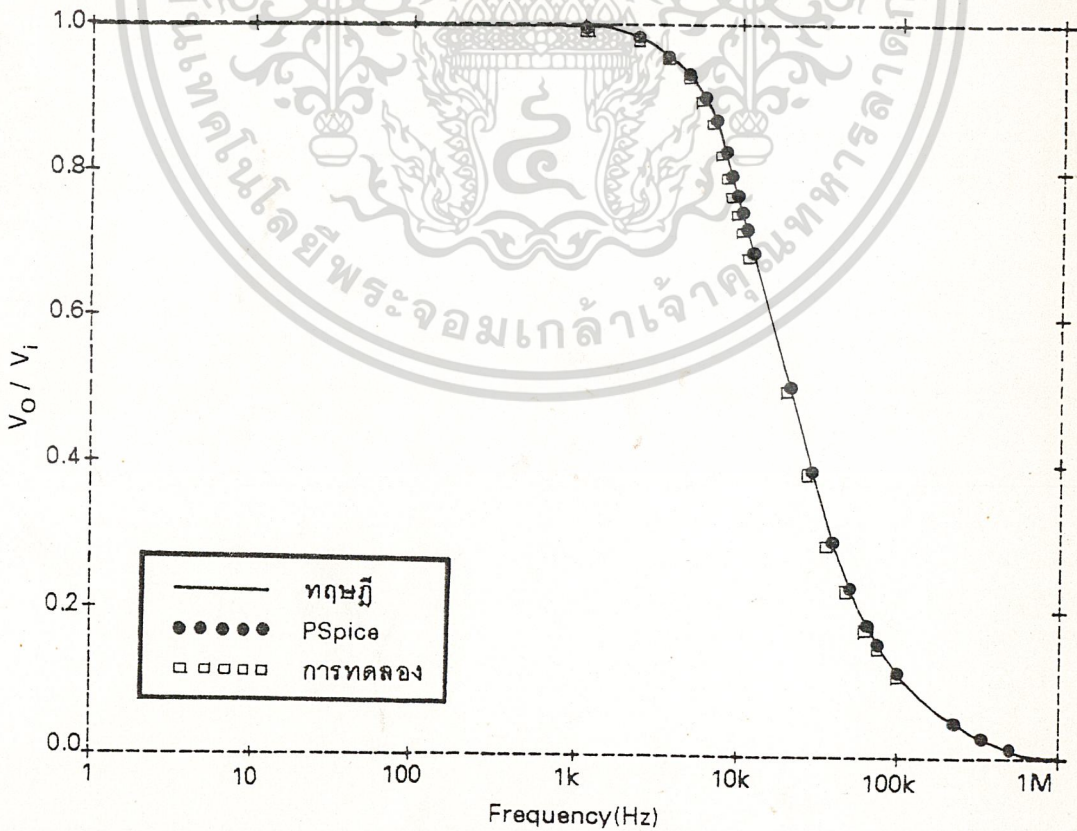
## 5.2.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง (Low pass filter)

ในหัวข้อนี้เป็นการนำวงจรขดลวดเหนี่ยวนำตามหลักการใน บทที่ 3 มาประยุกต์เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยในส่วนของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำใช้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังกระดานข่าวในการค้า  
ไม่รับ  $R_1=R_2=10\text{ k}\Omega$ ,  $C_1=1\text{ nF}$  และใช้มอสเฟตเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.5.1 จะได้ค่า  $L_{\text{eq}}=132\text{ mH}$  ใช้

ส่วนในรูปที่ 5.1 ใช้ค่า  $C_1=1$  nF และ  $R=10$  kΩ วัตต์ความถี่คutoff(Frequency cutoff) ได้ประมาณ 12 kHz ซึ่งผลการตอบสนองความถี่ของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำก็จะได้อัตราสอดคล้องตามหัวข้อ 3.4.2 และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบการทำงานของวงจรตามรูปที่ 5.1 โดยเขียนไฟล์ข้อมูลไว้ในโปรแกรม



รูปที่ 5.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง

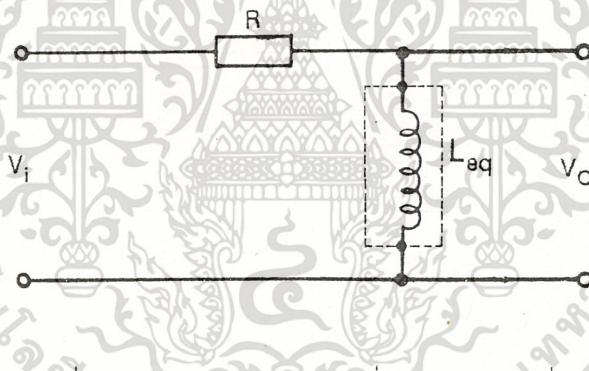


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 5.2 ผลการตอบสนองของวงจรในรูปที่ 5.1  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเนื้อหาที่แสดงเนื้อหาและข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 5.1 และจากผลการเลียนแบบ และวิเคราะห์การทำงานของวงจรจะได้ค่าความถี่ทอพอต์แสดงในรูปที่ 5.2 และเราพบว่าผลที่ได้จากการทดลองและการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSpice ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ และสอดคล้องตามคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านตามความคาดหวัง

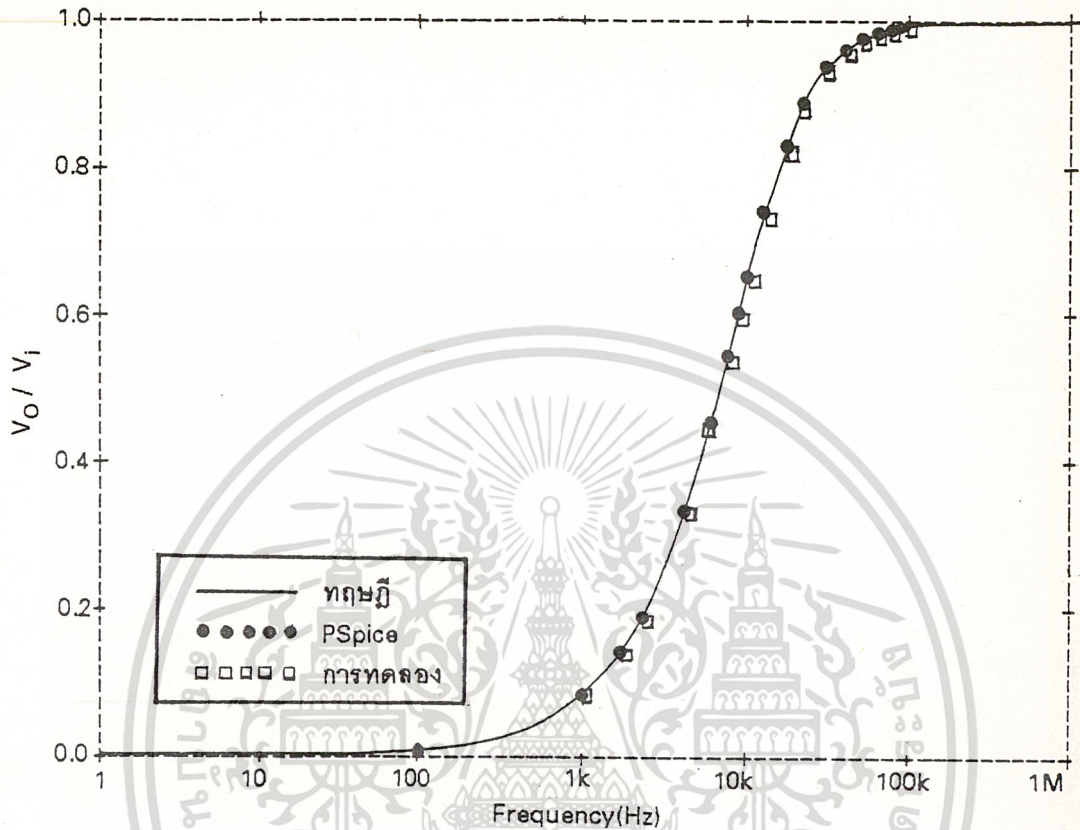
### 5.2.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง

ในหัวข้อนี้เป็นการนำวงจรขดลวดเหนี่ยวนำตามหลักการใน บทที่ 3 มาประยุกต์เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยในส่วนของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำใช้ค่าอุปกรณ์เช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 จะได้ค่า  $L_{eq} = 132 \text{ mH}$  ส่วนในรูปที่ 5.3 ใช้ค่า  $C_1 = 1 \text{ nF}$  และ  $R = 10 \text{ k}\Omega$  วัดความถี่คutoff (Frequency cutoff) ได้ประมาณ  $12 \text{ kHz}$  ซึ่งผลการ



รูปที่ 5.3 วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง

ตอบสนองความถี่ของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และคำนวณหาค่าความถี่วนำก็จะได้ค่าสอดคล้องตามหัวข้อ 3.4.2 และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบการทำงานของวงจรตามรูปที่ 5.3 เขียนไฟล์ข้อมูลไว้ในโปรแกรมที่ 5.2 และจากผลการเลียนแบบและวิเคราะห์การทำงานของวงจรจะได้ค่าความถี่ทอพอต์แสดงในรูปที่ 5.4 และเราพบว่าผลที่ได้จากการทดลองและการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSpice ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณและสอดคล้องตามคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านตามความคาดหวัง

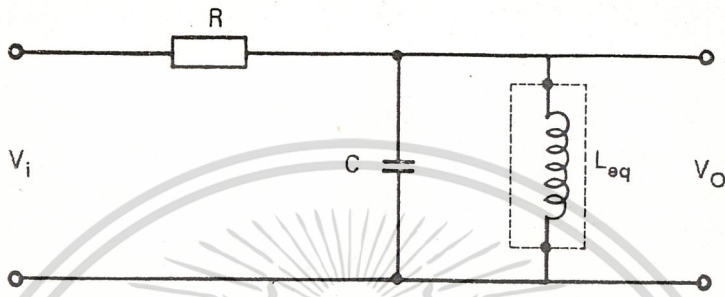


รูปที่ 5.4 ผลการตอบสนองของวงจรในรูปที่ 5.3

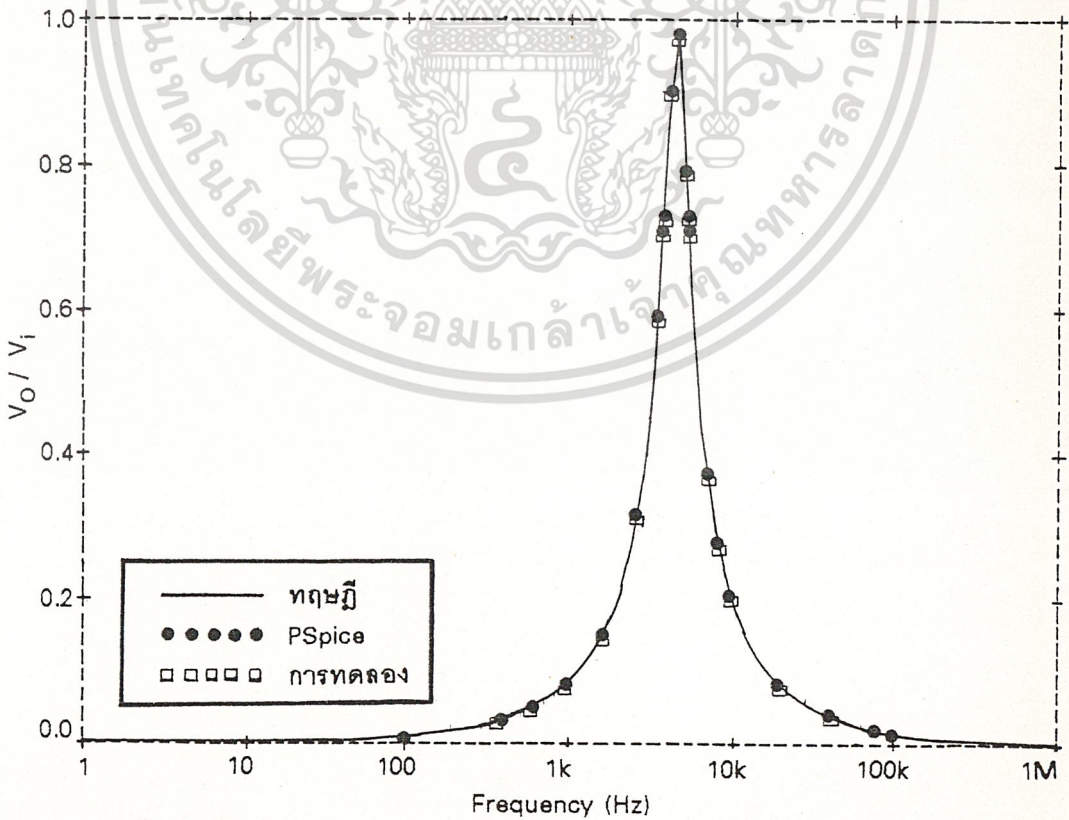
5.2.3 วงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง

ในหัวข้อนี้เป็นการนำวงจรขดลวดเหนี่ยวนำตามหลักการใน บทที่ 3 มาประยุกต์เป็น วงจรกรองผ่านแถบความถี่ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยในส่วนของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ ใช้ค่าอุปกรณ์เช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 จะได้ค่า  $L_{eq} = 132 \text{ mH}$  ส่วนในรูปที่ 5.5 ใช้ค่า  $C = 10 \text{ nF}$  และ  $R = 10 \text{ k}\Omega$  วัตความถี่ศูนย์กลาง (Center Frequency)  $f_c$  ได้ประมาณ  $4.5 \text{ kHz}$  และ ความถี่คutoffทั้งสอง กำหนดเป็น  $Lf_c$  และ  $Uf_c$  ได้ประมาณ  $3.6 \text{ kHz}$  และ  $5.25 \text{ kHz}$  ซึ่ง นำมาคำนวณค่า  $Q$  ได้ประมาณเท่ากับ  $2.7$  ซึ่งการตอบสนองความถี่ของวงจรแสดงได้ ดังรูปที่ 5.6 และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบการทำงานของวงจรตามรูป ที่ 5.5 เขียนไฟล์ข้อมูลไว้ในโปรแกรมที่ 5.3 และจากผลการเลียนแบบ และวิเคราะห์การทำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับ อนุญาต งานของวงจรจะได้ค่าความถี่ศูนย์กลาง และความถี่คutoffทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และเรา

พบว่าผลที่ได้จากการทดลองและการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSpice ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณและสอดคล้องตามคุณสมบัติของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ตามความคาดหมาย



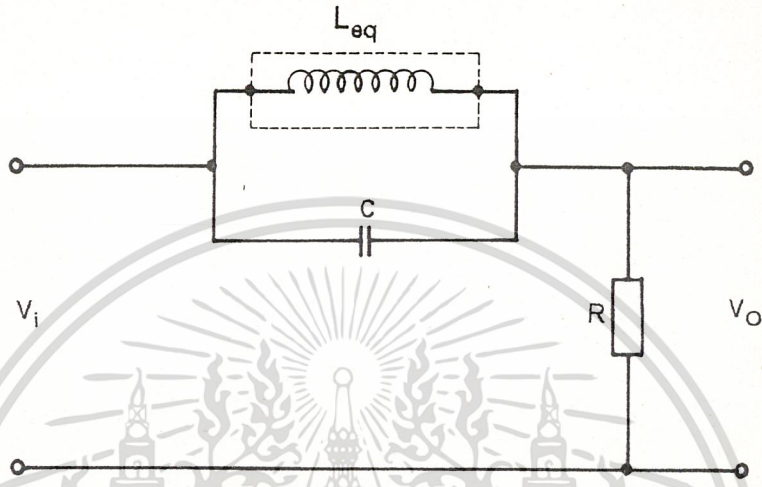
รูปที่ 5.5 วงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง



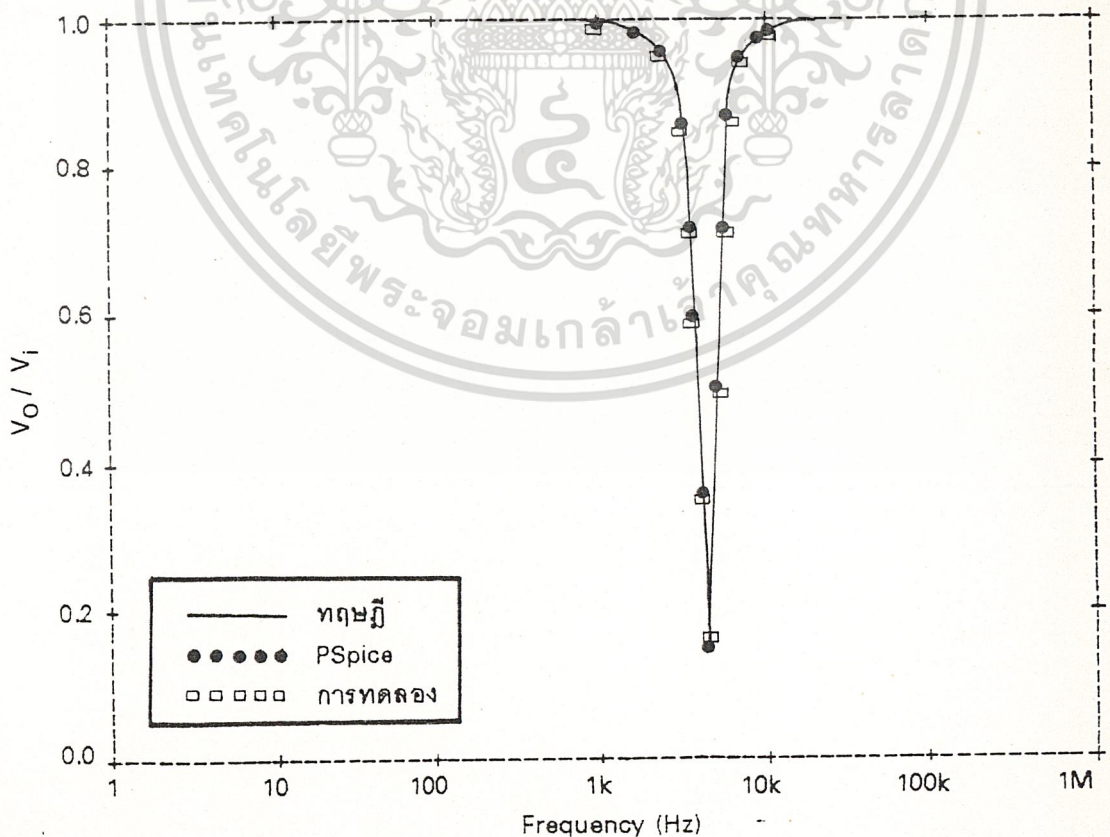
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 5.6 แสดงการตอบสนองของวงจรในรูปที่ 5.5 สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 วงจรกรองจำกัดแถบความถี่อันดับสอง

ในหัวข้อนี้เป็นการนำวงจรขดลวดเหนี่ยวนำตามหลักการใน บทที่ 3 มาประยุกต์เป็น วงจรกรองจำกัดแถบความถี่ดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยในส่วนของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.7 วงจรกรองจำกัดแถบความถี่อันดับสอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และที่ยังไม่เสร็จของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ค่าอุปกรณ์เช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.3 จะได้ค่า  $L_{\text{eq}} = 132 \text{ mH}$  ส่วนในรูปที่ 5.7 ใช้ค่า  $C = 10 \text{ nF}$  และ  $R = 10 \text{ k}\Omega$  วัดความถี่ศูนย์กลาง (Center Frequency)  $f_c$  ได้ประมาณ  $4.5 \text{ kHz}$  และความถี่คutoff ทั้งสองข้างกำหนดเป็น  $Lf_c$  และ  $Uf_c$  ได้ประมาณ  $3.6 \text{ kHz}$  และ  $5.3 \text{ kHz}$  และจากผลดังกล่าวคำนวณค่า  $Q$  ได้ประมาณเท่ากับ 2.7 ซึ่งการตอบสนองความถี่ของวงจรแสดงได้ ดังรูปที่ 5.8 และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบการทำงานของวงจรตามรูปที่ 5.7 เขียนไฟล์ข้อมูลไว้ในโปรแกรมที่ 5.4 และจากผลการเลียนแบบ และวิเคราะห์การทำงานของวงจรจะได้ค่าความถี่ศูนย์กลางและความถี่คutoff ทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และเราพบว่าผลที่ได้จากการทดลองและการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSpice ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณและสอดคล้องตามคุณสมบัติของวงจรรองรับจำกัดแถบตามความคาดหมาย

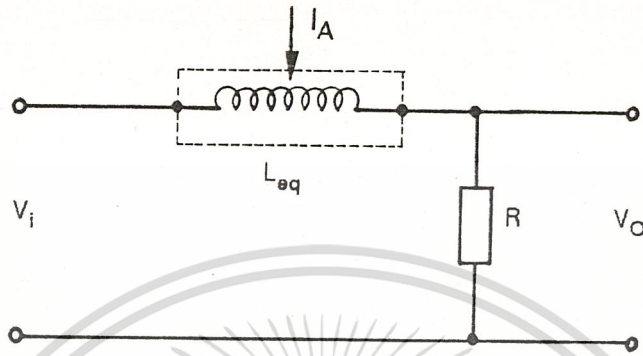
### 5.3 วงจรกรองความถี่แบบปรับค่าได้ โดยวิธีอเล็กทรอนิกส์

ในหัวข้อนี้ เป็นการทดสอบวงจรขดลวดเหนี่ยวนำแบบปรับค่า โดยวิธีอเล็กทรอนิกส์ตามหลักการที่นำเสนอในบทที่ 4 มาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกรองความถี่ โดยทำการทดสอบขณะต่อเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง วงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสองและ วงจรกรองจำกัดแถบความถี่อันดับสอง โดยวงจรกรองสองชนิดแรกสามารถเปลี่ยนค่าความถี่คutoff ได้โดยวิธีอเล็กทรอนิกส์ และวงจรกรองสองชนิดหลังสามารถเปลี่ยนความถี่ศูนย์กลาง (Center frequency) ได้ ดังจะกล่าวรายละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

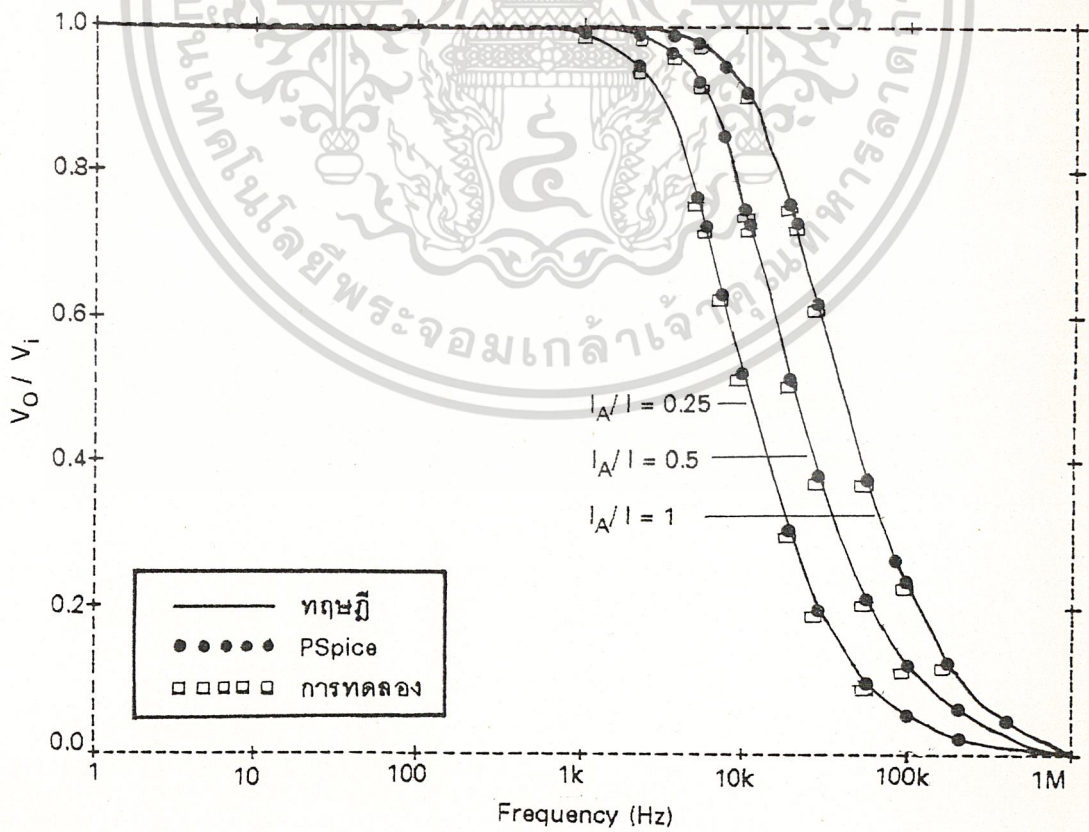
#### 5.3.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง

การทดลองใช้ขดลวดเหนี่ยวนำเสมือนตามหลักการในบทที่ 4 มาต่อเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 5.9 โดยค่าอุปกรณ์ของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำตามหลักการในบทที่ 4 โดยกำหนด  $R_1 = R_2 = R = 10 \text{ k}\Omega$  และ  $C_1 = 1 \text{ nF}$  และ  $I_A = 0.25 \text{ mA}$ ,  $0.5 \text{ mA}$  และ  $1 \text{ mA}$  ส่วนมอสเฟตใช้คุณสมบัติเดียวกับหัวข้อ 4.5.2 ซึ่งจะได้ค่า  $L_{\text{eq}}(I_A = 0.25 \text{ mA}) = 66 \text{ mH}$ ,  $L_{\text{eq}}(I_A = 0.5 \text{ mA}) = 132 \text{ mH}$  และ  $L_{\text{eq}}(I_A = 1 \text{ mA}) = 261 \text{ mH}$  ตามลำดับ วัดค่าความถี่คutoff ได้  $f_c(I_A = 0.25 \text{ mA}) = 24 \text{ kHz}$ ,  $f_c(I_A = 0.5 \text{ mA}) = 12 \text{ kHz}$  และ  $f_c(I_A = 1 \text{ mA}) = 6.1 \text{ kHz}$  โดยแสดงผลการตอบสนองความถี่ของวงจรได้ดังรูปที่ 5.10

เอกสาร และเพื่อยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีจึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบวงจรและวิเคราะห์วงจร  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม เขียนไฟล์ข้อมูลไว้ในโปรแกรมที่ 5.5 ได้ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรตามรูปที่



รูปที่ 5.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง

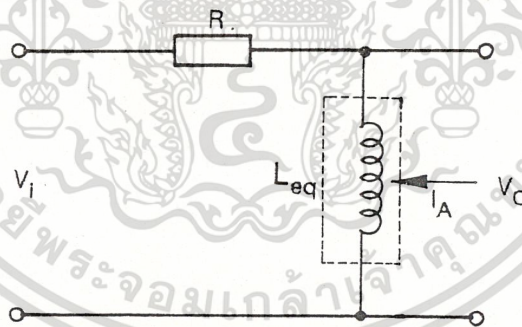


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 5.10 ผลการตอบสนองของวงจรในรูปที่ 5.9

ที่ 5.10 ซึ่งเราพบว่าค่าความถี่คัทออฟที่ได้จากการทดลองและการเลียนแบบวงจรและวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice กับการคำนวณให้ค่าใกล้เคียงกันและสอดคล้องตามคุณสมบัติของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านและสามารถเปลี่ยนค่าความถี่คัทออฟโดยไม่ต้องเปลี่ยนค่าอุปกรณ์ในวงจร

### 5.3.2 วงจรรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง

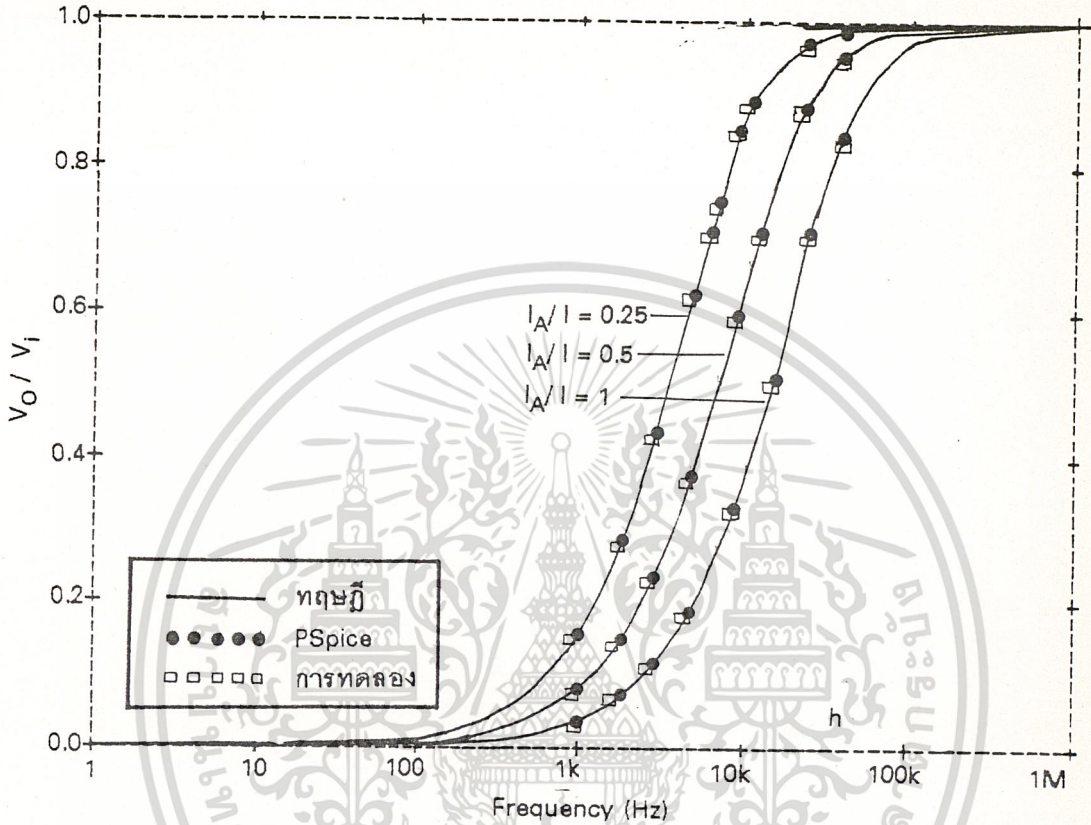
การทดลองใช้ชุดลวดเหนี่ยวนำเสมือนตามหลักการในบทที่ 4 มาต่อเป็นวงจรรองความถี่สูงผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 5.11 โดยค่าอุปกรณ์ของวงจรเลียนแบบชุดลวดเหนี่ยวนำตามหลักการในบทที่ 4 จะกำหนดค่าอุปกรณ์เช่นเดียวกับหัวข้อ 5.3.1 ซึ่งจะได้ค่า  $L_{eq}(I_A=0.25mA) = 66 \text{ mH}$  ,  $L_{eq}(I_A=0.5mA) = 132 \text{ mH}$  และ  $L_{eq}(I_A=1mA) = 261 \text{ mH}$  ตามลำดับส่วนวงจรในรูปที่ 5.11 จะใช้  $R = 10 \text{ k}$  วัตถุประสงค์ความถี่คัทออฟได้  $f_c(I_A=0.25mA) = 24 \text{ kHz}$   $f_c(I_A=0.5mA) = 12 \text{ kHz}$  และ  $f_c(I_A=1mA) = 6.1 \text{ kHz}$  โดยแสดงผลการตอบสนองความ



รูปที่ 5.11 วงจรรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง

ถี่ของวงจรได้ดังรูปที่ 5.12 และเพื่อยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีจึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบวงจรและวิเคราะห์วงจรตามรูปที่ 5.11 เขียนไฟล์ข้อมูลไว้ในโปรแกรมที่ 5.6 ได้ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรตามรูปที่ 5.12 ซึ่งเราพบว่าค่าความถี่คัทออฟที่ได้จากการทดลองและการเลียนแบบวงจรและวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice กับการคำนวณให้ค่าใกล้เคียงกันและสอดคล้องตามคุณสมบัติของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน และสามารถเปลี่ยนค่าความถี่คัทออฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยไม่ต้องเปลี่ยนค่าอุปกรณ์ในวงจรเช่นกัน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ผลการตอบสนองของวงจรในรูปที่ 5.11

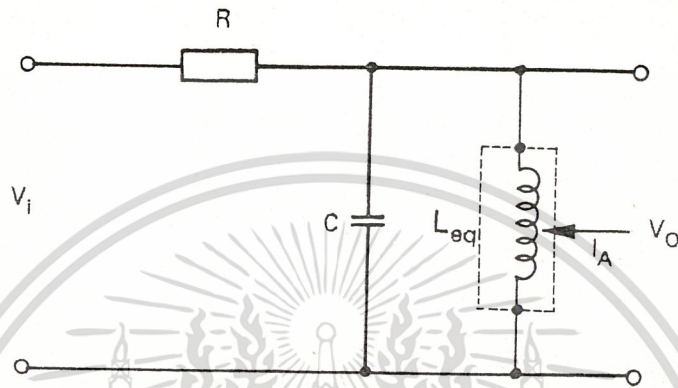
5.3.3 วงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง

การทดลองใช้ขดลวดเหนี่ยวนำเสมือนตามหลักการในบทที่ 4 ต่อเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยค่าอุปกรณ์ของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำตามหลักการในบทที่ 4 แต่จะเปลี่ยนค่าอุปกรณ์บางตัวคือ  $C_1 = 6 \text{ pF}$  และจากรูปที่ 5.13 ใช้ค่า  $C = 12.2 \text{ nF}$ ,  $R = 1.5 \text{ k}\Omega$  วัดค่าความถี่ศูนย์กลางได้  $f_c (I_A = 0.25 \text{ mA}) = 70 \text{ kHz}$ ,  $f_c (I_A = 0.5 \text{ mA}) = 49.5 \text{ kHz}$  และ  $f_c (I_A = 1 \text{ mA}) = 36.5 \text{ kHz}$  จากค่าความถี่ดังกล่าวจะได้ค่า  $L_{\text{eq}} (I_A = 0.25 \text{ mA}) = 0.42 \text{ mH}$ ,  $L_{\text{eq}} (I_A = 0.5 \text{ mA}) = 0.84 \text{ mH}$  และ  $L_{\text{eq}} (I_A = 1 \text{ mA}) = 1.55 \text{ mH}$  ตามลำดับ

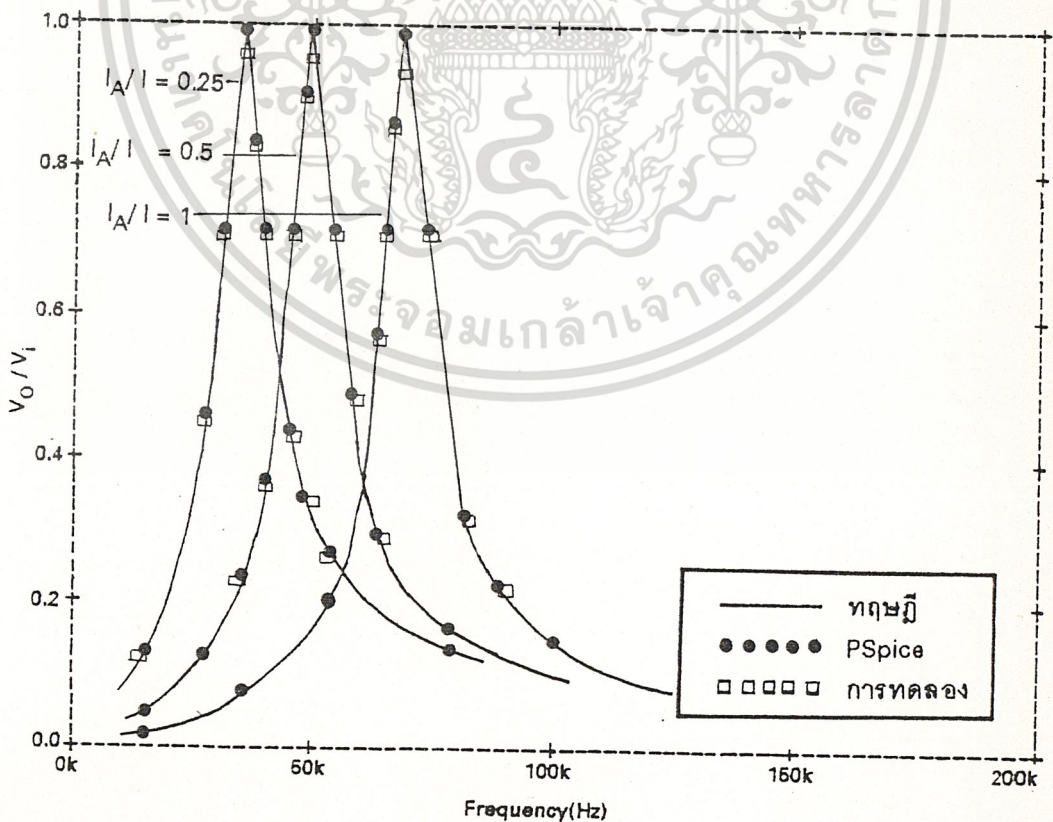
และวัดค่าความถี่คutoff ได้  $Lf_c (I_A = 0.25 \text{ mA}) = 62 \text{ kHz}$ ,  $Uf_c (I_A = 0.25 \text{ mA}) = 74 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และ  $Lf_c (I_A = 0.5 \text{ mA}) = 45 \text{ kHz}$ ,  $Uf_c (I_A = 0.5 \text{ mA}) = 55 \text{ kHz}$ ,  $Lf_c (I_A = 1 \text{ mA}) = 31 \text{ kHz}$  ไม่สามารถได้ หวังสน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

kHz และ  $Uf_c (I_A=1mA) = 40 \text{ kHz}$  โดยแสดงผลการตอบสนองความถี่ของวงจรได้ดังรูปที่ 5.14 และเพื่อยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีจึงใช้โปรแกรม PSpice เขียนแบบวงจรและวิเคราะห์วงจรตามรูปที่ 5.13 เขียนไฟล์ข้อมูลไว้ในโปรแกรมที่ 5.7 ได้ผลการตอบสนองความถี่ของวงจร



รูปที่ 5.13 วงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง

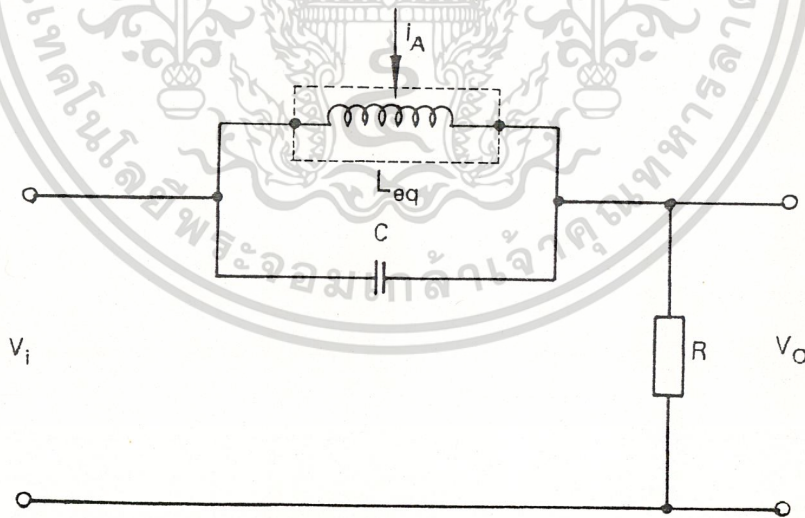


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 5.14 ผลการตอบสนองของวงจรในรูปที่ 5.13  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 5.14 ซึ่งเราพบว่าค่าความถี่ศูนย์กลาง และความถี่คutoffที่ได้จากการทดลองและการ  
 เลียนแบบวงจรและวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice กับการคำนวณให้ค่าใกล้เคียงกัน  
 และสอดคล้องตามคุณสมบัติของวงจรกรองผ่านแถบ และสามารถเปลี่ยนค่าความถี่ศูนย์กลางได้  
 โดยไม่ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ในวงจร

#### 5.3.4 วงจรกรองจำกัดแถบความถี่อันดับสอง

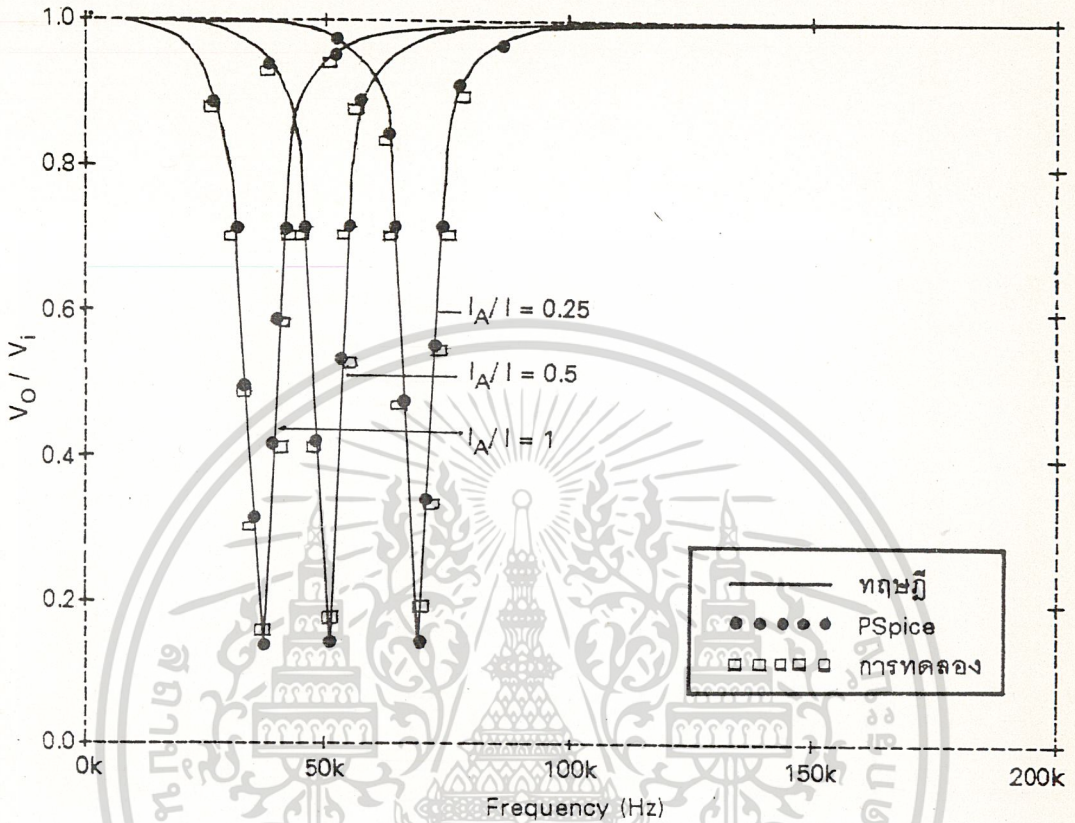
การทดลอง ใช้ชุดลวดเหนี่ยวนำเสมือนตามหลักการในบทที่ 4 มาต่อเป็นวงจรกรอง  
 จำกัดแถบความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 5.15 โดยค่าอุปกรณ์ของวงจรเลียนแบบชุดลวดเหนี่ยวนำตาม  
 หลักการในบทที่ 4 จะกำหนดค่าอุปกรณ์เช่นเดียวกับหัวข้อ 5.3.3 และวัดค่าความถี่ศูนย์กลางได้  
 $f_c (I_A=0.25\text{mA}) = 69.5 \text{ kHz}$  ,  $f_c (I_A=0.5\text{mA}) = 49.5 \text{ kHz}$  และ  $f_c (I_A=1\text{mA}) =$   
 $36.5 \text{ kHz}$  จากค่าความถี่ดังกล่าวจะได้ค่า  $L_{eq} (I_A=0.25\text{mA}) = 0.43 \text{ mH}$ ,  $L_{eq} (I_A=0.5\text{mA})$   
 $= 0.84 \text{ mH}$  และ  $L_{eq} (I_A=1\text{mA}) = 1.55 \text{ mH}$  ตามลำดับ และวัดค่าความถี่คutoffได้



รูปที่ 5.15 วงจรกรองจำกัดแถบความถี่อันดับสอง

$Lf_c (I_A=0.25\text{mA}) = 62 \text{ kHz}$  ,  $Uf_c (I_A=0.25\text{mA}) = 74 \text{ kHz}$  และ  $Lf_c (I_A=0.5\text{mA}) =$   
 $45 \text{ kHz}$  ,  $Uf_c (I_A=0.5\text{mA}) = 55 \text{ kHz}$  ,  $Lf_c (I_A=1\text{mA}) = 31 \text{ kHz}$  และ  $Uf_c (I_A=1\text{mA})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 = 40 kHz โดยแสดงผลการตอบสนองความถี่ของวงจรได้ดังรูปที่ 5.16 และเพื่อยืนยันความ  
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ผลการตอบสนองของวงจรในรูปที่ 5.15

ถูกต้องของทฤษฎี จึงใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบวงจรและวิเคราะห์ห้วงจรตามรูปที่ 5.15 เขียนไฟล์ข้อมูลไว้ในโปรแกรมที่ 5.8 ได้ผลการตอบสนองความถี่ของวงจร ตามรูปที่ 5.16 ซึ่งเราพบว่าค่าความถี่ศูนย์กลาง และความถี่คutoff ได้จากการทดลองและการเลียนแบบวงจรและวิเคราะห์ห้วงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice กับการคำนวณให้ค่าใกล้เคียงกันและสอดคล้องตามคุณสมบัติของวงจรกรองจำกัดแถบความถี่ และสามารถเปลี่ยนค่าความถี่ศูนย์กลางได้ และแบนด์วิดท์คงที่โดยไม่ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ในวงจร

#### 5.4 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator)

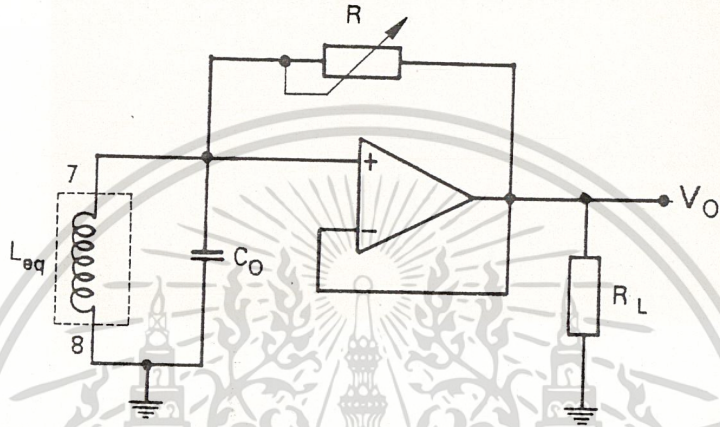
หัวข้อนี้เป็นการทดสอบเลียนแบบชุดลวดเหนียวนำตามหลักการที่นำเสนอในบทที่ 3 มา

ประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.17 โดยมีความถี่ตามสมการที่ (5.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

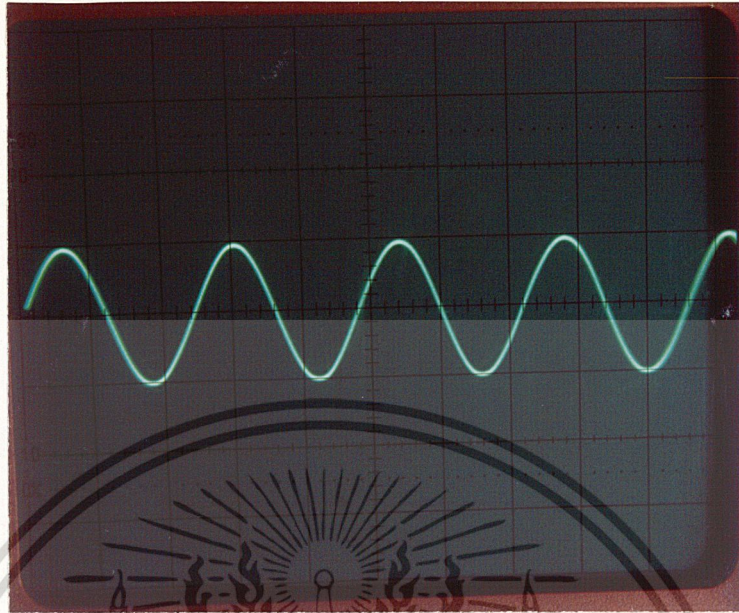
$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{eq} C_o}} \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.17 วงจร LC ออสซิลเลเตอร์

ค่าอุปกรณ์ของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำจะกำหนด ตามหัวข้อ 3.5.1 โดยใช้ตัวเก็บประจุ  $C_1 = 1 \text{ nF}$  เพื่อให้ได้  $L_{eq} = 132 \text{ mH}$  ส่วนในวงจรรูปที่ 5.17 เนื่องจากต้องการออกแบบให้ออสซิลเลทที่มีความถี่  $4.4 \text{ kHz}$  ดังนั้นจึงเลือกใช้  $C_o = 10 \text{ nF}$  ส่วน  $R$  ใช้ความต้านทานแบบปรับค่าได้  $10 \text{ k}\Omega$  และ  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$  วัดความถี่ที่เอาท์พุท  $V_o$  ได้ความถี่ประมาณ  $4.4 \text{ kHz}$  ซึ่งจะเห็นว่าให้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณและได้แสดงภาพถ่ายสัญญาณเอาท์พุทดังรูปที่ 5.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



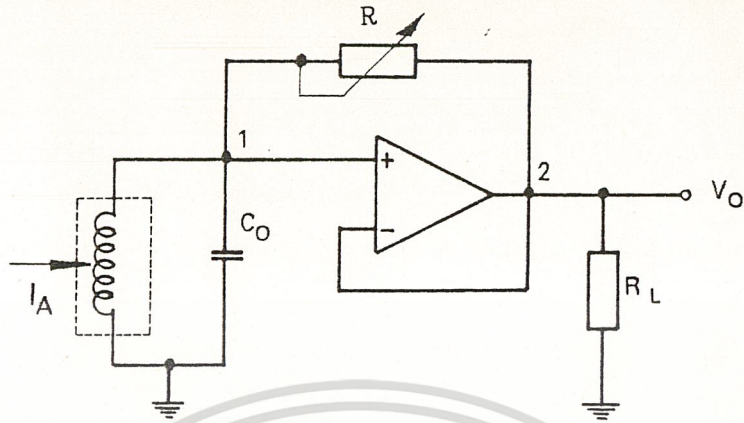
รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรอสซิลเลเตอร์ตามรูปที่ 5.17  
สัญญาณที่จุด  $V_o$  ความถี่ 4.4 kHz ขนาด 4 V<sub>p-p</sub>

### 5.5 วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบเปลี่ยนค่าความถี่ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ (Electronically Tunable Oscillator)

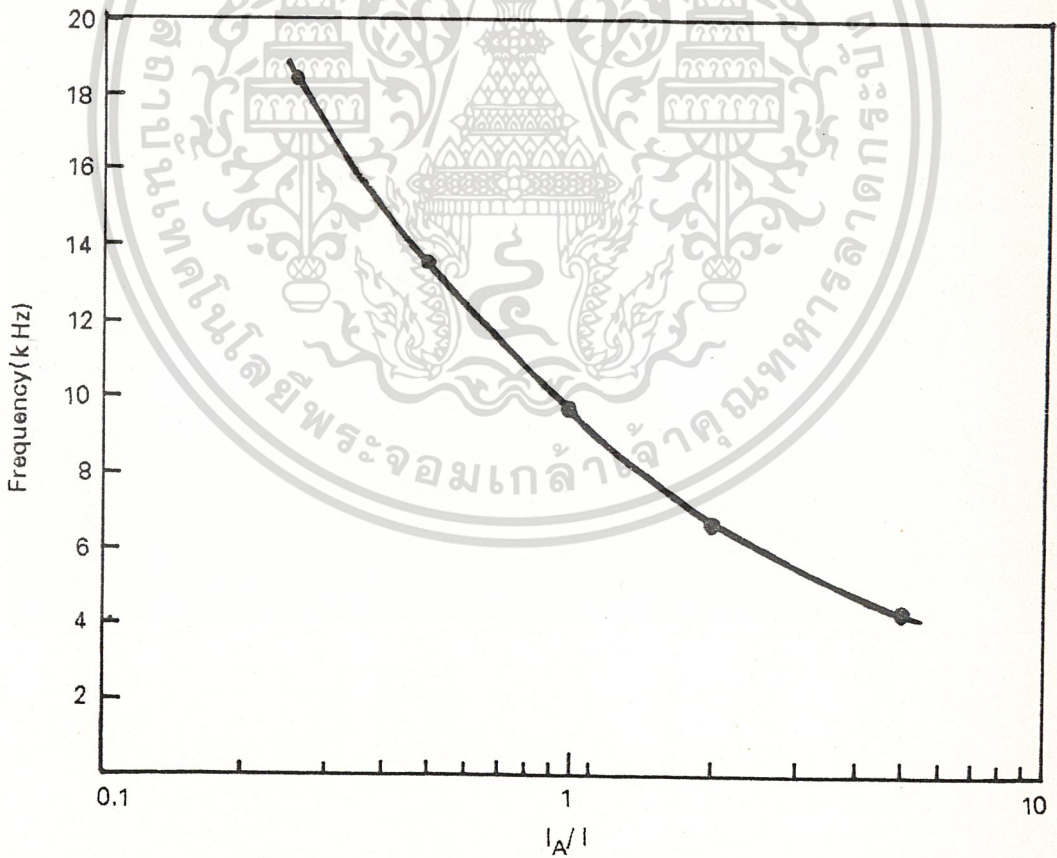
หัวข้อนี้เป็นการทดสอบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ แบบปรับค่าโดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ตามหลักการที่นำเสนอในบทที่ 4 มาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบเปลี่ยนค่าความถี่ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ดังวงจรรูปที่ 5.19 โดยในส่วนของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำใช้อุปกรณ์ตามหัวข้อ 4.5 แต่ใช้  $C_1 = 100$  pF ส่วนวงจรในรูปที่ 5.19 ใช้  $C_o = 10$  nF ใช้  $I_A = 500$   $\mu$ A จะได้ความถี่ออสซิลเลเตอร์ ( $f_o$ ) เท่ากับ 13 kHz และทดสอบโดยเปลี่ยนกระแส  $I_A$  ปรากฏว่าความถี่ของเอาต์พุตแปรผันตรงกับกระแส  $I_A$  และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความถี่ออสซิลเลเตอร์ กับกระแส  $I_A/I$  ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.20 ซึ่งจะเห็นว่าผลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณใกล้เคียงกัน และเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.2

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{L_{eq} C_o}} \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 วงจร LC ออสซิลเลเตอร์แบบเปลี่ยนความถี่โดยวิธีอิล็กทรอนิกส์



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของความถี่ออสซิลเลตกับกระแส  $I_A/I$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\* PRO.5.1 LOW PASS FILTER 1ST \*\*\*

```
. OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE
.WIDTH OUT=80
,TEMP 37
.AC DEC 20 1 1MEG
M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U
M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U
M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U
M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U
R1 1 2 10K
R2 3 4 10K
C3 6 5 1NF
RL 8 0 10K
I1 100 3 DC 1MA
I2 100 5 DC 1MA
I3 100 6 DC 1MA
I4 100 4 DC 1MA
I5 7 200 DC 1MA
I6 1 200 DC 1MA
I7 2 200 DC 1MA
I8 8 200 DC 1MA
VDD 100 0 DC +10
VSS 200 0 DC -10
VIN1 7 0 AC 1
.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END

```



### โปรแกรมที่ 5.1 แสดงโปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่อาจารย์ผู้สอนได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 วงจรรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\* PRO.5.2 HIGHT PASS FILTER 1STDR \*\*\*

.OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC DEC 20 1 1MEG

M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U

M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U

M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U

M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U

R1 1 2 10K

R2 3 4 10K

C3 6 5 1NF

RL 8 0 1E-9

R 10 7 10K

I1 100 3 DC 1MA

I2 100 5 DC 1MA

I3 100 6 DC 1MA

I4 100 4 DC 1MA

I5 7 200 DC 1MA

I6 1 200 DC 1MA

I7 2 200 DC 1MA

I8 8 200 DC 1MA

VDD 100 0 DC +10

VSS 200 0 DC -10

VIN1 10 0 AC 1

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END

```



โปรแกรมที่ 5.2 แสดงโปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 วงจรหรือความถี่สูงผ่านเน็ตบหนึ่ง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\* PRO. 5.3 BAND PASS FILTER 2ND \*\*\*

.OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U

M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U

M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U

M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U

R1 1 2 10K

R2 3 4 10K

C1 6 5 1NF

RL 8 0 1E-15

R 10 7 10K

C 7 0 10NF

I1 100 3 DC 1MA

I2 100 5 DC 1MA

I3 100 6 DC 1MA

I4 100 4 DC 1MA

I5 7 200 DC 1MA

I6 1 200 DC 1MA

I7 2 200 DC 1MA

I8 8 200 DC 1MA

VDD 100 0 DC +10V

VSS 200 0 DC -10V

VIN1 10 0 AC 1 SIN(0 1 10K)

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.AC DEC 20 1 1MEG
.PROBE
.END

```



### โปรแกรมที่ 5.3 แสดงโปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 วงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก้นำไปใช้

\*\*\* PRO.5.4 BAND REJECT FILTER 2ND \*\*\*

.OPTIONS ACCT ABSTOL=10N VNTOL=10N NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC DEC 20 1 1MEG

M1 5 7 1 1 MN L=10U W=100U

M2 6 8 2 2 MN L=10U W=100U

M3 7 6 3 3 MP L=10U W=100U

M4 8 5 4 4 MP L=10U W=100U

R1 1 2 10K

R2 3 4 10K

C3 6 5 1NF

RL 8 0 10K

C 7 8 10NF

I1 100 3 DC 1MA

I2 100 5 DC 1MA

I3 100 6 DC 1MA

I4 100 4 DC 1MA

I5 7 200 DC 1MA

I6 1 200 DC 1MA

I7 2 200 DC 1MA

I8 8 200 DC 1MA

VDD 100 0 DC +10

VSS 200 0 DC -10

VIN1 7 0 AC 1

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END
```



โปรแกรมที่ 5.4 แสดงโปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองความถี่  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
วงจรรองจำกัดแถบความถี่อันดับสอง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\* PRO.5.5 ELECTRONIC TUNABLE LPF. 1ST \*\*\*

. OPTIONS ACCT NOPAGE

. WIDTH OUT=80

. TEMP 37

. AC DEC 10 1 1MEG

VIN1 1 0 AC 1 SIN(0 1 10K)

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U  
 M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U  
 M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U  
 M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M25 36 10 19 19 MP L=10U W=100U  
 M26 37 13 20 20 MP L=10U W=100U  
 M27 4 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M28 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M29 18 18 200 200 MN L=10U W=100U  
 M30 1 18 200 200 MN L=10U W=100U  
 I1 2 200 DC 1MA  
 I2 3 200 DC 1MA  
 I3 100 4 DC 1MA  
 I4 100 19 DC 1MA  
 I5 100 20 DC 1MA  
 I6 100 1 DC 1MA  
 IA 100 11 DC 0.25MA  
 \*IA 100 11 DC 0.5MA  
 \*IA 100 11 DC 1MA  
 R1 2 3 10K  
 R2 19 20 10K  
 C1 10 13 1NF  
 R 4 0 10K  
 . MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4  
 + CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END

```



โปรแกรมที่ 5.5 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองความถี่  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 วงจรรองความถี่ผ่านอันดับหนึ่ง  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\* PRO.5.6 ELECTRONICS TUNABLE HPF. 1ST \*\*\*

.OPTIONS ACCT NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC DEC 10 1 1MEG

VIN1 50 0 AC 1

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U

M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U

M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U

M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U

M25 36 10 31 31 MP L=10U W=100U

M26 37 13 32 32 MP L=10U W=100U

M27 4 36 200 200 MN L=10U W=100U

M28 36 36 200 200 MN L=10U W=100U

M29 37 37 200 200 MN L=10U W=100U

M30 1 37 200 200 MN L=10U W=100U

I1 2 200 DC 1MA

I2 3 200 DC 1MA

I3 100 4 DC 1MA

I4 100 31 DC 1MA

I5 100 32 DC 1MA

I6 100 1 DC 1MA

IA 100 11 DC 0.25MA

\*IA 100 11 DC 0.5MA

\*IA 100 11 DC 1MA

R1 2 3 10K

R2 31 32 10K

RX 4 0 1E-15

C 10 13 1NF

R 50 1 10K

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END

```



โปรแกรมที่ 5.6 แสดงโปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองความถี่  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 วงจรกรองความถี่ผ่านอันดับหนึ่ง  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้

\*\*\* PRO.5.7 ELECTRONICS TUNABLE BPF. 2ND \*\*\*

.OPTIONS ACCT NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC LIN 40 10K 150K

VIN1 50 0 AC 1

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U

M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U

M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U

M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U

M25 36 10 19 19 MP L=10U W=100U

M26 37 13 20 20 MP L=10U W=100U

M27 4 17 200 200 MN L=10U W=100U

M28 17 17 200 200 MN L=10U W=100U

M29 18 18 200 200 MN L=10U W=100U

M30 1 18 200 200 MN L=10U W=100U

I1 2 200 DC 1MA

I2 3 200 DC 1MA

I3 100 4 DC 1MA

I4 100 19 DC 1MA

I5 100 20 DC 1MA

I6 100 1 DC 1MA

IA 100 11 DC 0.25MA

\*IA 100 11 DC 0.5MA

\*IA 100 11 DC 1MA

R1 2 3 10K

R2 19 20 10K

C 10 13 6PF

RL 4 0 1E-15

R 50 1 1.5K

CO 1 0 12.24NF

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END

```



### โปรแกรมที่ 5.7 แสดงโปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 วจจรกรองแถบความถี่ผ่านอันดับสอง  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\* PRO.5.8 ELECTRONICS TUNABLE BRF. 2ND \*\*\*

.OPTIONS ACCT NOPAGE

.WIDTH OUT=80

.TEMP 37

.AC LIN 30 10K 200K

VIN1 1 0 AC 1 SIN(0 1 10K)

VDD 100 0 DC 10

VSS 200 0 DC -10

M1 5 1 2 2 MN L=10U W=100U

M2 6 4 3 3 MN L=10U W=100U

M3 5 5 100 100 MP L=10U W=100U

M4 7 5 100 100 MP L=10U W=100U

M5 6 6 100 100 MP L=10U W=100U

M6 8 6 100 100 MP L=10U W=100U

M7 9 9 100 100 MP L=10U W=100U

M8 10 9 100 100 MP L=10U W=100U

M9 9 11 7 7 MN L=10U W=100U

M10 7 7 200 200 MN L=10U W=100U

M11 9 7 200 200 MN L=10U W=100U

M12 10 14 200 200 MN L=10U W=100U

M13 12 9 100 100 MP L=10U W=100U

M14 12 12 200 200 MN L=10U W=100U

M15 13 12 200 200 MN L=10U W=100U

M16 13 15 100 100 MP L=10U W=100U

M17 14 15 100 100 MP L=10U W=100U

M18 14 14 200 200 MN L=10U W=100U

M19 15 8 200 200 MN L=10U W=100U

M20 8 8 200 200 MN L=10U W=100U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M21 15 11 8 8 MN L=10U W=100U  
 M22 15 15 100 100 MP L=10U W=100U  
 M23 11 11 17 17 MN L=10U W=100U  
 M24 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M25 36 10 19 19 MP L=10U W=100U  
 M26 37 13 20 20 MP L=10U W=100U  
 M27 4 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M28 17 17 200 200 MN L=10U W=100U  
 M29 18 18 200 200 MN L=10U W=100U  
 M30 1 18 200 200 MN L=10U W=100U

I1 2 200 DC 1MA  
 I2 3 200 DC 1MA  
 I3 100 4 DC 1MA  
 I4 100 19 DC 1MA  
 I5 100 20 DC 1MA  
 I6 100 1 DC 1MA  
 IA 100 11 DC 0.25MA  
 \*IA 100 11 DC .5MA  
 \*IA 100 11 DC 1MA

R1 2 3 10K

R2 19 20 10K

C 10 13 6PF

RL 4 0 1.5K

CO 1 4 12.24NF

.MODEL MN NMOS(LEVEL=2 VTO=+2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4

+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.MODEL MP PMOS(LEVEL=2 VTO=-2.0 KP=1.0E-4 GAMMA=0.4
+ CGDO=10PF CGSO=50NF PHI=0.65 LAMBDA=1.0E-5)
.PROBE
.END
```



โปรแกรมที่ 5.8 แสดง โปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองความถี่  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 วงจรกรองจำกัดแถบความถี่อันดับสอง  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

## บทสรุป

บทที่ 1 เป็นการกล่าวอย่างกว้าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเนื้อหาส่วนใหญ่จะเน้นเพื่อให้ทราบถึงจุดประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นการเสนอการออกแบบของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟตและการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้มอสเฟต แบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต โดยสังเขปโดยจะกล่าวถึงโครงสร้างการทำงาน ลักษณะ และคุณสมบัติที่สำคัญของมอสเฟต โดยเน้นที่ เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงหลักการเบื้องต้น ของวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ การออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยจะ เน้นการใช้วิธีตัดาควคุมซึ่งอาศัยวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส โดยเลือกใช้วงจรขยายความแตกต่างศักดาซึ่ง ใช้อุปกรณ์จำนวนน้อย และมีค่าทรานคอนดักแตนซ์แม่นยำเท่ากับ  $1/\epsilon [L/2KW)(1/I+i + 1/I-i) + 1/R_1]$  และคุณสมบัติของวงจรที่ออกแบบวงจรมีค่าความเหนี่ยวนำที่แปรผันตรงกับตัวเก็บประจุ ( $C_1$ ) และแปรผันตรงกับความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ทำให้การกำหนดค่าขดลวดเหนี่ยวนำทำได้อย่างสะดวกและค่าขดลวดเหนี่ยวนำสามารถให้ค่าในพิสัยที่กว้าง และยังมีค่าความถี่ปฏิบัติงานในทางทฤษฎีกว้างประมาณ 20 MHz และยังมีช่วงศักดาปฏิบัติงานกว้างประมาณ 7 Vp-p และได้ทำการวิเคราะห์ค่าคิวแพกเตอร์ (Q) ที่เกิดจากค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุ ซึ่งพบว่าถ้าเลือกใช้ตัวเก็บประจุคุณภาพสูงจะได้ค่าคิวแพกเตอร์มีค่าสูงเช่นกัน และได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทำงานของวงจร ซึ่งใช้ทั้งการทดลองโดยต่อวงจรแบบตีสคริปบนแผ่น PCB และโดยการใช้โปรแกรม PSpice ปรากฏผลจากการทดลองโดยต่อวงจรจริงและโดยการใช้โปรแกรม PSpice ปรากฏผลจากการทดลองทั้งสองวิธี ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี ซึ่งได้ผลตรงตามที่คาดหมายไว้ และจากผลการทดสอบและทดลองวงจรพบว่าวงจรที่นำเสนอขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนที่วารสารศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ตั้งกล่าวนั้น ให้ความเที่ยงตรงสูง โดยมีค่าผิดพลาดประมาณ 1.30% และยังมีขนาดเล็กดังนั้นจึง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน และถ้าหากมีการนำไปประดิษฐ์เป็นวงจรรวมจะทำให้มีความสะดวกในการประยุกต์ใช้งานมากยิ่งขึ้น

**บทที่ 4** เป็นการออกแบบวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ โดยในการออกแบบใช้วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสเช่นเดียวกับบทที่ 3 เพียงแต่เพิ่มวงจรสะท้อนกระแส และวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็ก เพื่อออกแบบวงจรให้สามารถปรับค่าขดลวดเหนี่ยวนำได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ ได้โดยการเปลี่ยนค่ากระแส  $I_A$  โดยวงจรที่ออกแบบในบทนี้สามารถเปลี่ยนค่ากระแสได้ในนิสัยกว้าง เพราะค่าอัตราขยายกระแสของวงจรสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 250uA ถึง 10mA ซึ่งทำให้ได้พิสัยค่าขดลวดเหนี่ยวนำที่กว้างและได้วิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎี เช่น การวิเคราะห์หาอินพุทอิมพีแดนซ์ การวิเคราะห์หาค่าอินดักทีฟรีแอ็กแตนซ์ และค่าขดลวดเหนี่ยวนำค่าความถี่ปฏิบัติงานซึ่งมีการตอบสนองของวงจรวงกว้างประมาณ 8 MHz ค่ากระแสและศักดาปฏิบัติงานสูงประมาณ 1mA และ 14 Vp-p ตามลำดับ พร้อมทั้งได้วิเคราะห์หาค่า Q ของขดลวดเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติซึ่งพบว่ามีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุที่เกิดจากสารไดอิเล็กตริกซึ่งถ้าตัวเก็บประจุที่มีคุณภาพสูงมาก ๆ ค่าความต้านทานแฝงจะมีค่าสูงมาก (10M $\Omega$  - 1000M $\Omega$ ) ดังนั้นทำให้ค่า Q ของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูงและยังทำการทดลองโดยต่อวงจรจริงเพื่อทดสอบคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำ และได้ทดสอบโดยการเลียนแบบโดยโปรแกรม PSpice ปรากฏให้ผลใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณ โดยผิดพลาดประมาณ 1.32% แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองการวัดค่าความถี่ปฏิบัติงานโดยวงจรจริง จะมีค่าน้อยกว่าผลจากการใช้โปรแกรม PSpice เลียนแบบการทำงานและวิเคราะห์วงจร ทั้งนี้เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าสแตย์ ที่เกิดจากสายต่อวงจรและลายทองแดงของแผ่น PCB ดังนั้นค่าที่ได้จากการวัดจึงมีความคลาดเคลื่อนบ้างแต่ถ้าหากนำวงจรที่ได้เสนอตามหลักการในบทนี้ ไปสร้างเป็นวงจรรวมแล้วน่าจะทำให้ค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่เที่ยงตรงมากยิ่งขึ้นแต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองทั้งสองวิธี สามารถยืนยันได้ว่าวงจรที่ได้ออกแบบเป็นวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้โดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ตามหลักการที่เสนอนั้น มีคุณสมบัติของวงจรเป็นไปตามที่ได้คาดหมายไว้

**บทที่ 5** เป็นการแสดงตัวอย่างการนำวงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ ที่ได้ออกแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าตามบทที่ 3 และบทที่ 4 ไปประยุกต์ใช้งาน โดยการนำไปใช้เป็น วงจรรองความถี่ต่ำผ่านอันดับไม่วารกรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่ง วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง วงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง วงจรกรองจำกัด  
 แถบความถี่อันดับสอง โดยถ้าใช้ชดลวดเหนียวหน้าที่ได้จากบทที่ 4 ก็จะทำให้วงจรต่างๆ ดังกล่าว  
 สามารถเปลี่ยนค่าความถี่คutoff และความถี่ศูนย์กลางได้โดยการเปลี่ยนค่ากระแส  $I_A$  พร้อมทั้ง  
 ได้นำไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยถ้าใช้ชดลวดเหนียวหน้าที่ได้จากบทที่ 4 ก็  
 ได้วงจรออสซิลเลเตอร์แบบปรับค่าความถี่ได้ โดยการเปลี่ยนค่ากระแส  $I_A$  โดยได้ทดลองและใช้  
 โปรแกรม PSpice เลียนแบบการทำงานปรากฏให้ผลใกล้เคียงกับค่าในการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Phillip E. Allen, " CMOS Analog Circuit Design," New York, Holt, Rinehart and Winston, Chs.2 and 3 ,1978
- [2] A.Sedra and KC.Smich, " Microelectronic Circuit," New York, Holt, Rinehart and Winston, Chs.5,1991
- [3] R.H.S.Riordan, "Simulated Inductors Using Differential Amplifiers," Electron. Lett., Vol.3, No.4, pp.50-51, February 1991
- [4] H.J. Orchard, "Inductorless Bandpass Filters," IEEE J. Solid-State Circuit, Vol.SC-5, pp.108-118, March 1970
- [5] C. Afuso and S. Ishikawa, "A Temperature-Insensitive Voltage Controlled Variable Inductor," IEEE J. SOLID-STATE circuit, Vol.SC-10, No.6, PP.340-542, 1975
- [6] H. O. Voorman and A. Bicsheuvcl, "An Electronic Gyrator," IEEE J. Solid state Circuit, Vol.SC-7, No.6, PP.469-474, 1972
- [7] D. Kahag and M.M. Atolla, "Silicon-Silicon Dioxide Field Indued Device," Solid-State Device Research Conference, Pittsburgh, 1960
- [8] D.G.Ong, " Modern Mos Technology," New York, Mc Graw-Hill, PP. 1-9, 1986
- [9] P.R.Gray and R.G.Meyer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuit," Wiley, New York, 1977
- [10] C.T. Sah, "Characteristic of Metal-Oxide-Semiconductor Transistor," IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-11, PP. 325, July 1964
- [11] H. Shichman and D. Hodges, " Modelling and Simulation of Insulated-Gate Field-Effect Transistor Switching Circuit," IEE. J. Solid-State Circuit, Vol.sc-3 No.3, PP.285-289, Sep.1968

- [12] Randall L. Geiger and Phillip E. Allen, "VLSI Design Techniques for Analog and Digital Circuits," New York, Mc Graw-Hill, pp. 240-246, 1990
- [13] PSpice, Microsim Corp., Laguna Hills, CA 92653, U.S.A., May 1980
- [14] Muhammad H. Rashid, "PSpice for Circuits and Electronics Using PSpice," Prentice-Hall, U.S.A., 1990
- [15] M.E. Van Valkenburg, "Analog Filter Design," New York, Holt Rinchart and Winston, Chs. 15, 1982
- [16] P. Bowron and F.W. Stepheuson, "Active filters for Communications and Instrumentation," England, McGraw-Hill, PP. 107-123, 1979
- [17] S. Rolf M.S. Ghausi and R. Laker, "Design of Analog Filters Passive Active RC and Switched Capacitor," New Jersey, Prentice-Hall, PP. 228-241, 1990
- [18] R. Nanoi, "Lossless Inductor Simulation Novel Configurations Using DVCCS," Electron Lett., Vol 17 No. 15, PP. 549-551, July 1981
- [19] R. Nandi, "Lossless Inductor Simulation Novel Configurations Using DVCCS," Electron Lett., Vol. 16 No. 17, PP. 666-667, August 1980
- [20] A.M. Soliman, "New Active Gyrator Circuit Using a Single Current Converyor," IEEE Proc., 66, PP. 1580-1581, 1978
- [21] U. Tietze and Ch. Scheuk, "Advanced Electronic Circuits," New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, PP. 224-226, 1978
- [22] Robert Spence, "Linear Active Networks," U.S.A., John Wiley & Sons, PP. 153-165, 1970
- [23] W.H. Holmes, W.E. Heinlein and S. Grutzmann, "Sharp Cutoff Low Pass Filter Using Floating Gytrators," IEEE. J. Solid State Circuits, Vol. sc-4, No. 1, PP. 38-50, 1969
- [24] H.O. Voorman and A. Biesheuvel, "An Electronic Gyrator," IEEE.

- [25] Roubk Gre Gorian and Gaborc , "Analog MOS Integrated Circuit For Signal Processing, " Canada, John Wiley & Son., Chs.1 and Chs.2, 1986
- [26] Sidney Soclof, "Analog Integrated Circuit," NEW Jersey, Prentice-Hall Inc., PP.227-228, 1985
- [27] K. Bult and H. Wallinga, "Class of Analog CMOS Circuits Based on the Square-Law Characteristic of a MOS Transistor in Saturation, "IEEE J. Solid State Circuits, Vol. SC-22, no.3, PP.357-364, June 1987
- [28] W. Surakamponorn and K. Kumwachara, "CMOS-Based Electronically Tunable Current Conveyer," Electron. Lett., Vol.28, no. 14, PP.1316-1317, July 1992
- [29] Tan, M.A., and Schaumann, "Simulating general parameter LC-ladder Filter for Monolithic Realisations with only Transconductance Elements and Grounded Capacitors," IEEE Transaction on Circuits and Systems, Vol. 36, PP. 299-307, 1989
- [30] S. K. Biwas, "Very-high-Q Inductor Simulation for Active Tuned Filters," Int. J. Electron., Vol. 58, PP. 1019-1023, 1985

## ภาคผนวก

## ผลงานที่พิมพ์ในบทความการประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน

- [1] วัลลภ สุระกำพลธร และ กิตติพงศ์ มะโน "การเลียนแบบขดลวดเหนียวนำโดยใช้มอสเฟต, "การประชุมวิชาการครั้งที่ 14, (5-43)-(5-48), วันที่ 7-8 พฤศจิกายน 2534
- [2] วัลลภ สุระกำพลธร และ กิตติพงศ์ มะโน "การเลียนแบบขดลวดเหนียวนำแบบปรับค่าด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้มอสเฟต, "การประชุมวิชาการครั้งที่ 15, (3-6)-(3-9), วันที่ 3-4 ธันวาคม 2535



S5881