

วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDDDA

INDUCTANCE SIMULATOIN USING VDDDA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิสุตรปริญญาครุศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-ED-M-231-006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INDUCTANCE SIMULATION USING VDDDA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN INSDUSTRIAL EDUCATION
IN ELECTRICAL COMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF INDUTRIAL EDUCATION AND TECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-ED-M-231-006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION AND TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDDDA
ชื่อนักศึกษา	นายคุณากร พิเชฐไพศาล
รหัสนักศึกษา	60603007
ปริญญา	ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วินัย ใจกล้า
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.สุรพงษ์ สิริพงษ์ดี

บทคัดย่อ

วงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำที่ถูกนำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว คือวงจรถ่ายผลต่างแรงดันเอาต์พุต (Voltage Differencing Differential Difference Amplifier : VDDDA) นำมาต่อร่วมกับตัวต้านทานจำนวน 1 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวโดยไม่ต้องการเงื่อนไขความเข้ากันของอุปกรณ์ (Matching Condition) ทั้งอุปกรณ์พาสซีฟและอุปกรณ์แอกทีฟ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำสามารถปรับได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ จากการปรับค่าของกระแสไบอัส สมรรถนะของวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำจะถูกทดสอบจากการจำลองการทำงานใน PSPICE และต่อวงจรจริง โดยในการทดสอบสมรรถนะของวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำจะใช้วงจรรวม (Integrated Circuit : IC) เบอร์ LT1228 และ AD830 เพื่อสร้างเป็น VDDDA ใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 5 V ผลจากการทดสอบสมรรถนะของวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีโดยค่าความเหนี่ยวนำที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปประมาณ 2.07% ช่วงความถี่ใช้งานอยู่ระหว่าง 3 kHz – 400 kHz (ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำขนาด 1 mH) และเมื่อนำวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรกรองกัจัดแถบความถี่อันดับที่สองได้ออกแบบไว้ พบว่าผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองความถี่ที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้

Thesis Title	Inductance Simulation Using VDDDA
Student	Kunakorn Pichetpaisan
Student ID.	60603007
Degree	Master of Science in Industrial Education
Program	Electrical Communication Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Winai Jaikla
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Surapong Siripongdee

ABSTRACT

The inductance simulation is proposed in this thesis. This circuit employs single active device, Voltage Differencing Differential Difference Amplifier (VDDDA), one resistor and one capacitor. The proposed circuit does not require any active and passive component matching condition. The tune of inductance value can be done electronically by bias current. The performance of proposed circuit is verified by PSPICE simulation and experiment. The VDDDA is constructed from commercially available ICs, LT1228 and AD830 with ± 5 V power supplies. The results of the performance test are agree with the theory, where the error of inductance value is about 2.07%. The operating frequency range is about 3 kHz to 400 kHz at 1 mH inductance value. The second order band stop filter is designed to be an applied circuit in this thesis. The performance of second band stop filter is verified by PSPICE simulation and experiment. The result of the performance test is agree with the theoretical analysis.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งการศึกษาในหลักสูตรปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.วินัย ใจกล้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สิริพงษ์ดี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้สละเวลามาให้คำปรึกษา ความรู้และคำแนะนำในเรื่องต่างๆ ตลอดจนช่วยตรวจทานความถูกต้องในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาที่ให้คำปรึกษา ความรู้ และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มารดาและครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ รวมถึงเพื่อนร่วมห้องทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วม จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์



คุณากร พิเชฐไพศาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีตัวเหนี่ยวนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรขยายผลต่างแรงดันเอด์พุต.....	10
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.1 การสังเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDDDA.....	40
3.2 การวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ กรณีทำงานเป็นอุดมคติ.....	43
3.3 การวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ กรณีทำงานไม่เป็นอุดมคติ.....	45
3.4 วงจรกรองความถี่อันดับที่สอง.....	51
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล.....	53
4.1 การทดสอบสมรรถนะผ่านโปรแกรม PSPICE.....	53
4.2 การทดสอบสมรรถนะเมื่อต่อวงจรจริง.....	60
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	64
5.2 อภิปรายผลงานวิจัย.....	64
5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	68
บรรณานุกรม.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ IV ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความซาบซึมของแกนแต่ละชนิด	5
2.2 สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำจากรูปที่ 2.11	18
2.3 สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำจากรูปที่ 2.15	22
2.4 สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำจากรูปที่ 2.16	23
2.5 สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำจากรูปที่ 2.31	38
4.1 ค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA	53
4.2 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ	53
4.3 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเมื่อเปลี่ยนค่า I_B	55
4.4 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรอกำจัดแถบความถี่	57
4.5 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรอกำจัดแถบความถี่เมื่อปรับค่า R_S	58
4.6 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรอกำจัดแถบความถี่เมื่อเปลี่ยนค่า I_B	59
4.7 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรกรณีต้องวงจรจริง	60
4.8 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรอกำจัดแถบความถี่โดยการต่อวงจรจริง	61
5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	3
2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ.....	6
2.2 หลักการเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ.....	7
2.3 โครงสร้างวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	9
2.4 สัญลักษณ์ของวงจร VDDDA.....	10
2.5 โครงสร้างของวงจร VDDDA.....	10
2.6 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	12
2.7 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VCDO-CF และ VCVF เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	13
2.8 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CCII เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	14
2.9 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	15
2.10 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ OTRA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	16
2.11 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ FDCCII เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	17
2.12 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CDBA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	18
2.13 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFOA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	19
2.14 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ PFTFN เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	20
2.15 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DXCCII เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	21
2.16 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DXCCII เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	23
2.17 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DVCC เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	24
2.18 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ OTRA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	25
2.19 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ MDO-DDCC เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	26
2.20 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ OTRA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	27
2.21 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CC-CFA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	28
2.22 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DVCCCTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	29
2.23 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VD-DIBA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	30
2.24 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DDCC เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	31
2.25 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFOA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	32
2.26 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFOA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	33
2.27 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDBA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	34
2.28 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ OTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	35
2.29 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DO-CCCI และ OTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	36
2.30 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFOA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	37
2.31 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CCI เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	38
2.32 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ.....	39
3.1 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	40
3.2 วงจรอินทิเกรเตอร์ในกรอบความคิดเทียบกับวงจรอินทิเกรเตอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.3 วงจรรวมสัญญาณในกรอบความคิดเทียบกับวงจรรวมสัญญาณที่สังเคราะห์ขึ้น	41
3.4 วงจรแปรผันแรงดันเป็นกระแสในกรอบความคิดเทียบกับวงจรที่ได้จากการสังเคราะห์	42
3.5 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ VDDDA ต่อร่วมกับ R และ C.....	42
3.6 ค่าของความต้านทานและค่าของความจุแฝงในขั้วของอุปกรณ์ VDDDA.....	45
3.7 ค่าของความต้านทานแฝงรวมของอุปกรณ์ VDDDA.....	45
3.8 การทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวในกรณีไม่เป็นอุดมคติ	48
3.9 ตัวเหนี่ยวนำเลียนแบบเมื่อคำนึงความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดัน	50
3.10 กรอบแนวคิดวงจรรอกำจัดแถบความถี่อันดับที่ 2	51
3.11 วงจรประยุกต์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ	51
4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ	54
4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนค่า I_B	55
4.3 เปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการจำลอง	56
4.4 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรอกำจัดแถบความถี่.....	57
4.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรอกำจัดแถบความถี่เมื่อเปลี่ยนค่า R_S	58
4.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันรอกำจัดแถบความถี่เมื่อเปลี่ยนค่า I_B	59
4.7 โครงสร้างของวงจรที่ใช้เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	60
4.8 ผลตอบสนองของวงจรที่ใช้เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ	61
4.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรอกำจัดแถบความถี่เมื่อต่อวงจรจริง	62
4.10 ผลการตอบสนองสัญญาณที่จุด V_{in} และ V_o เมื่อเปลี่ยนความถี่	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกนำไปใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ตัวเหนี่ยวนำที่ถูกนำไปเป็นส่วนประกอบของวงจรกรองความถี่ในเครื่องวิทยุ หรือขดลวดเหนี่ยวนำที่นำไปสร้างเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนประกอบหลักของตัวเหนี่ยวนำคือขดลวดและแกน โดยจำนวนรอบการพันขดลวดรอบแกน ชนิดของแกน ความยาวของแกน รวมถึงพื้นที่หน้าตัดของแกนทั้งหมดนี้มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่และตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ที่ถูกสร้างมาจากขดลวดจะไม่นิยมใส่ลงไปในวงจรอื่น ๆ เนื่องจากมีขนาดใหญ่ ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ในปัจจุบันจะใช้การหมุนสกรูเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของขดลวดเพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามต้องการ แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่ปรับได้ไม่ตรงกับที่ต้องการ จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำถูกคิดและนำเสนอออกมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวในเรื่องขนาดและการปรับค่าความเหนี่ยวนำ

วงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต หรือ Voltage Differencing Differential Difference Amplifier (VDDDA) (Herencsar, et. al. 2013 : 17-20) มีโครงสร้างจากวงจรขยายผลต่างแรงดันหรือ Voltage Differencing Differential Difference Unit (VDDDU) ต่อร่วมกับวงจรขยายความนำถ่ายโอนหรือ Operational Transconductance Amplifier (OTA) จากโครงสร้างของ OTA ทำให้อุปกรณ์สามารถปรับค่าความนำถ่ายโอน (g_m) ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการควบคุมกระแสไบอัสจากภายนอก (I_B) อุปกรณ์แอกทีฟชนิดนี้มี 6 ขั้วแบ่งเป็นขั้วอินพุต 4 ขั้วและขั้วเอาต์พุต 2 ขั้ว ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้อุปกรณ์แอกทีฟชนิดนี้คือ นำอุปกรณ์ VDDDA มาใช้เพื่อสังเคราะห์วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ (สุรศักดิ์ สังข์แย้ม : 2559 ; Tuntrakool, et. al. : 2017 : 324-332 ; Koton, et. al. : 2014 : 53-60 ; Sangyaem, et. al. : 2016 : 274-277), นำอุปกรณ์ VDDDA มาใช้เพื่อสังเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวต้านทานขนานกับตัวเหนี่ยวนำ (Autthaphut : 2015 : 93-103), นำอุปกรณ์ VDDDA มาใช้เพื่อสังเคราะห์วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับที่สอง (Siripongdee and Jaikla : 2015 : 39-42)

จากการศึกษาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งอาศัยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น Current Amplifier (CA) (Psychalinos and Spanidou : 2006 : 168 – 171) Voltage Controlled Dual Output Current Follower (VCDO-CF) (Alpaslan and Yuce, 2016 : 511-516) Current Feedback Op-Amps (CFOA) (Alpaslan and Yuce : 2015 : 3081-3100 ; Said, et. al. : 2015 ; Bhaskar and Senani : 2013 : 381-383) Current Conveyors (CCII) (Ferri, et. al. : 2007 : 440-443) Current Follower Transconductance Amplifier (CFTA) (Herencsar, et. al. 2010 : 24-27) Fully Differential Current Conveyor (FDCCII) (Kaçar, 2010 : 109-113) Dual-X Current Conveyor (DXCCII) (Kacar and Yesil, 2010 : 632-638 ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Myderrizi, et. al. 2011 : 1074–1081) Operational Transresistance Amplifier (OTRA) (Ghosh and Paul, 2014 : 381-390 ; Pandey, et. al. 2012 : 1069-1079 ; Gupta, et. al. 2012 : 489–499) Fourterminal-Floating-Nullor (FTFN) (Kumar and Senani, 2010 : 105–112) Current Differencing Buffered Amplifier (CDBA) (Pathak, et. al. 2015 : 1-13) Differential Difference Current Conveyor (DDCC) (Ibrahim, et. al. 2011 : 261-264) Differential Voltage Current Conveyor (DVCC) (Horng, 2010 : 407-413) Voltage Differencing Buffered Amplifier (VDBA) (Channumsin, et. al. : 2015 : 114-117) Operational Transconductance Amplifier (OTA) (Koomgaew, et. al. : 2009 : 857-860 ; Sagbas, et. al. : 2009 : 857-860) First Generation Current-Conveyor (CCI) (Arslan, et. al. : 2012 : 21-26) Current Feedback Amplifiers (CFA) (Bandyopadhyay, et. al. : 2005 : 689-692) พบว่า

(ก) มีการใช้อุปกรณ์แอกทีฟมากกว่า 1 ตัว (Psychalinos and Spanidou, 2006 : 168 – 171 ; Alpaslan and Yuce, 2016 : 511-516 ; Ferri, et. al. 2007 : 440-443 ; Herencsar, et. al. 2010 : 24-27 ; Horng, 2010 : 407-413 ; Gupta, et. al. 2012 : 489–499 ; Bandyopadhyay, et. al. : 2005 : 689-692 ; Arslan, et. al. : 2012 : 21-26 ; Said, et. al. : 2015 : Channumsin, et. al. : 2015 : 114-117 ; Koomgaew, et. al. : 2009 : 857-860 ; Sagbas, et. al. : 2009 : 857-860 ; Arslan, et. al. : 2012 : 21-26)

(ข) ปรับค่าความเหนี่ยวนำแบบอิเล็กทรอนิกส์ไม่ได้ (Alpaslan and Yuce, 2016 : 511-516 ; Ferri, et. al. 2007 : 440-443 ; Kaçar, 2010 : 109-113 ; Ghosh and Paul, 2014 : 381-390 ; Kumar and Senani, 2010 : 105-112 ; Pathak, et. al. 2015 : 1-13 ; Kacar and Yesil, 2010 : 632-638 ; Alpaslan and Yuce : 2015 : 3081-3100 ; Myderrizi, et. al. 2011 : 1074-1081 ; Pandey, et. al. 2012 : 1069-1079 ; Ibrahim, et. al. 2011 : 261-264 ; Horng, 2010 : 407-413 ; Gupta, et. al. 2012 : 489–499 ; Bandyopadhyay, et. al. : 2005 : 689-692 ; Arslan, et. al. : 2012 : 21-26 ; Said, et. al. : 2015 ; Bhaskar and Senani : 2013 : 381-383 ; Arslan, et. al. : 2012 : 21-26)

(ค) ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ (Matching Condition) (Kacar and Yesil, 2010 : 632-638 ; Pandey, et. al. 2012 : 1069-1079 ; Ibrahim, et. al. 2011 : 261-264 ; Gupta, et. al. 2012 : 489–499 ; Arslan, et. al. : 2012 : 21-26)

(ง) ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว (Alpaslan and Yuce, 2016 : 511-516 ; Ferri, et. al. 2007 : 440-443 ; Kaçar, 2010 : 109-113 ; Ghosh and Paul, 2014 : 381-390 ; Kumar and Senani, 2010 : 105-112 ; Pathak, et. al. 2015 : 1-13 ; Kacar and Yesil, 2010 : 632-638 ; Alpaslan and Yuce, 2015 : 3081-3100 ; Myderrizi, et. al. 2011 : 1074-1081 ; Pandey, et. al. 2012 : 1069-1079 ; Ibrahim, et. al. 2011 : 261-264 ; Horng, 2010 : 407-413 ; Gupta, et. al. 2012 : 489–499 ; Bandyopadhyay, et. al. : 2005 : 689-692 ; Arslan, et. al. : 2012 : 21-26 ; Said, et. al. : 2015 ; Bhaskar and Senani : 2013 : 381-383 ; Arslan, et. al. : 2012 : 21-26)

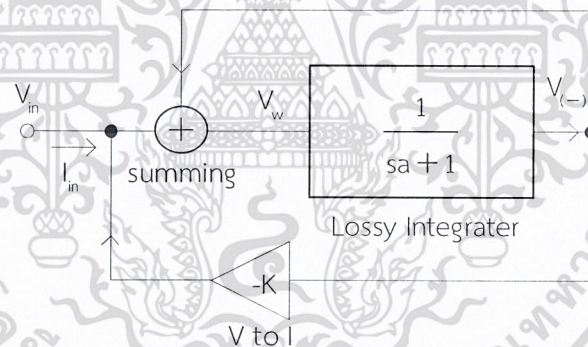
จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้นวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์วงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำที่สามารถปรับค่าได้แบบอิเล็กทรอนิกส์ ใช้จำนวนอุปกรณ์แอกทีฟเพียงตัวเดียวร่วมกับตัวต้านทานหนึ่งตัวและตัวเก็บประจุหนึ่งตัว โดยไม่มีความต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDDDA
2. เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้สังเคราะห์
3. เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไว้ในทางทฤษฎีด้วยการจำลองจากโปรแกรม PSPICE และต่อวงจรจริง

1.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย

แนวคิดในการสังเคราะห์วงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำประกอบด้วย วงจรรวมสัญญาณ (Summing Circuit) วงจรอินทิเกรเตอร์ที่มีการสูญเสีย (Lossy Integrator) ในโหมดแรงดัน และ วงจรแปรผันจากแรงดันไปเป็นกระแส (Voltage to Current Converter : V to I) ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำ

จากภาพที่ 1.1 จะได้สมการของ Z_{in} ดังสมการ

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{sa}{K} \quad (1.1)$$

จะพบว่าวงจรทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำต่อลงกราวด์โดยค่าความเหนี่ยวนำเสมือนได้ดังสมการ

$$L_{eq} = \frac{a}{K} \quad (1.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ a คือ ค่าคงที่ทางเวลาของวงจรอินทิเกรเตอร์

K คือ อัตราขยายของวงจรแปรผันจากแรงดันไปเป็นกระแส จากสมการที่ (1.2) พบว่าสามารถออกแบบให้วงจรมีค่าความเหนี่ยวนำตามต้องการได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ a และ k

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่สังเคราะห์ที่ใช้ไอซีเบอร์ LT1228 และ AD830 ต่อเป็นโครงสร้างของ VDDDA
2. วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่สังเคราะห์สามารถควบคุมค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์
3. วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่สังเคราะห์ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 2 ตัว
4. วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่สังเคราะห์ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์พาสซีฟ
5. ทดสอบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่สังเคราะห์จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE และต่อวงจรจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอีกหนึ่งชนิดที่จำเป็นในส่วนประกอบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ แต่ตัวเหนี่ยวนำเดิมใช้ขดลวดและแกนในการสร้างเป็นตัวเหนี่ยวนำซึ่งตัวเหนี่ยวนำมีข้อเสียเช่น ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่ ปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ยาก เนื่องจากค่าของความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับจำนวนรอบการพันขดลวดรอบแกน ชนิดของแกน ความยาวของแกน รวมถึงพื้นที่หน้าตัดของแกน ในปัจจุบันมีการพัฒนาตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้แต่ก็ยังมีข้อเสียเนื่องจากการปรับค่าตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้นั้นจำเป็นต้องทำด้วยการหมุนสกรูเพื่อปรับจำนวนรอบของขดลวดซึ่งสกรูมีการเสื่อมตามอายุการใช้งาน จากปัญหาข้างต้นส่งผลให้เกิดการค้นคว้าเพื่อสร้างวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่สามารถควบคุมค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

2.1 ทฤษฎีตัวเหนี่ยวนำ

2.1.1 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำถูกสร้างมาจากขดลวดที่ถูกนำมาพันรอบแกน โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดเมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะส่งผลให้ความเหนี่ยวนำเกิดขึ้น หน่วยของความเหนี่ยวนำจะมีค่าเป็น เฮนรี่ (Henry) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ (เอกชัย แสงอินทร์ : 2554) ได้แก่

1. จำนวนรอบการพันขดลวดรอบแกน (N) ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวดกล่าวคือ เมื่อจำนวนรอบของพันขดลวดรอบแกนมากขึ้นค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย
2. ชนิดของแกน (μ) ชนิดของแกนมีหลากหลายชนิดเช่น อากาศ นิกเกิล โคบอล เหล็ก เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างคุณสมบัติที่ช่วยเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่า ความซาบซึม (Permeability) ที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความซาบซึมของแกนแต่ละชนิด

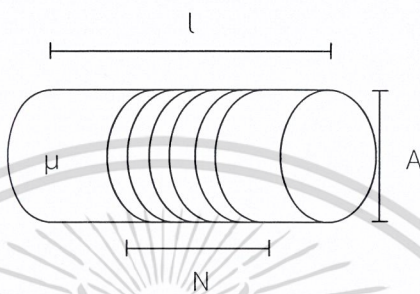
ชนิดของแกน	ค่าความซาบซึม
อากาศ หรือ สูญญากาศ	1.26×10^{-5}
นิกเกิล	6.28×10^{-5}
โคบอล	7.56×10^{-5}
เหล็กหล่อ	1.10×10^{-4}
เหล็กแท่ง	5.56×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความยาวของแกน (l) ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันตรงกับความยาวของแกน กล่าวคือ เมื่อความยาวของแกนมากขึ้นค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ก็จะมีค่าลดลง

4. พื้นที่หน้าตัดของแกน (A) ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับความยาวของแกน กล่าวคือ เมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนมีค่ามากขึ้นค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ก็จะ มากขึ้นตามไปด้วย

จากปัจจัยทั้ง 4 ข้อที่กล่าวมาจะได้ดังภาพที่ (2.1)



ภาพที่ 2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำจะเป็นดังสมการที่ (2.1)

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.1)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบการพันขดลวดรอบแกน

μ คือ ค่าความซาบซึมของแกน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน

l คือ ความยาวของแกน

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามความสามารถในการปรับค่าความเหนี่ยวนำ

1. ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductance) ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ถูกสร้างขึ้นจากขดลวดและแกนโดยมีลวดยื่นออกมาทั้ง 2 ข้าง เช่น ตัวเหนี่ยวนำแบบแถบสี่
2. ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductance) ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ถูกสร้างขึ้นจากขดลวดและแกนโดยตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้สามารถหมุนสกรูเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของขดลวดเพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามที่ต้องการเช่น ที่ปรับคลื่นวิทยุ

2.1.2 หลักการการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

หลักการทำงานทั่วไปของตัวเหนี่ยวนำเริ่มเมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะส่งผลให้เกิดพลังงานสนามแม่เหล็กและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดแรงดัน

ซึ่งแรงดันที่เกิดขึ้นจะมีค่าแปรผันตรงระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสเทียบกับเวลาตามสมการที่ (2.2)

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.2)$$

โดยที่ V_L คือ แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดตัวเหนี่ยวนำ
 I_L คือ กระแสที่ไหลเข้าขดลวดตัวเหนี่ยวนำ
 L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

จากหลักการการทำงานของตัวเหนี่ยวนำในสมการที่ (2.2) สามารถสร้างวงเวียนแบบตัวเหนี่ยวนำได้โดยใช้วงจรที่มี 2 ขั้วซึ่งขั้วด้านที่ 1 ต้องการอินพุตอิมพีแดนซ์เป็นค่าความเหนี่ยวนำและขั้วที่ 2 ต่อเข้ากับตัวเก็บประจุดังภาพที่ 2.1 (สมคิด แซ่โจ้ว : 2546)



ภาพที่ 2.2 หลักการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

จากภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้ว 1 และ 2 มีค่าตามนี้

$$V_1 = L \frac{dI_1}{dt} \quad (2.3)$$

และ

$$I_2 = -C \frac{dV_2}{dt} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.3) และ สมการที่ (2.4) จะได้

$$V_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2 \quad (2.5)$$

และ

$$V_2 = R_{21}I_1 + R_{22}I_2 \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ R_{11} คือความต้านทานของอินพุตเมื่อเปิดวงจรที่เอาต์พุต
 R_{21} คือความต้านทานการส่งผ่านเมื่อเปิดวงจรที่เอาต์พุต
 R_{12} คือความต้านทานการส่งผ่านเมื่อเปิดวงจรที่อินพุต
 R_{22} คือความต้านทานของเอาต์พุตเมื่อเปิดวงจรที่อินพุต

นำสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.6) แทนลงในสมการที่ (2.5) จะได้ว่า

$$V_1 = R_{11}I_1 - CR_{12}R_{21} \frac{dI_1}{dt} - CR_{12}R_{22} \frac{dI_2}{dt} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.5) และ สมการที่ (2.7) พบว่า

$$R_{11} = R_{22} = 0 \quad (2.8)$$

จะได้

$$R_{12}R_{21} = -\frac{L}{C} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) ค่าบวกของอินพุตอิมพีแดนซ์จะได้เงื่อนไขดังนี้

$$R_1 = -R_{12}, R_2 = R_{21} \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.5) สมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.10) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{V_1}{-R_1} = I_2 = F(V_1) \quad (2.11)$$

และ

$$\frac{V_2}{-R_2} = I_2 = G(V_2) \quad (2.12)$$

โดยที่ F และ G เป็นตัวแปรผันแรงดันเป็นกระแส (Voltage to Current Converter : V to I) สมการดังนี้

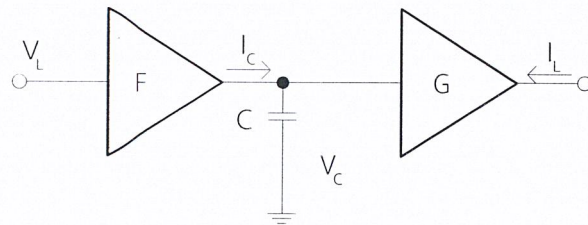
$$I_C = F(V_C) \quad (2.13)$$

และ

$$I_L = G(V_C) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) จะได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

จากสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) สามารถหาอนุพันธ์ได้ว่า

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{dG(V_C)}{dt} \cdot \frac{dV_C}{dt} \quad (2.15)$$

แทนค่า $\frac{dV_C}{dt} = \frac{I_C}{C}$ ลงในสมการที่ (2.15) จะได้ว่า

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{dG(V_C)}{dV_C} \cdot \frac{F(V_L)}{C} \quad (2.16)$$

ถ้ากำหนดให้ G คือ ฟังก์ชันเชิงเส้นจะได้

$$I_L = G(V_L) \equiv G_{m2} V_C \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.16) จะได้ F เป็นฟังก์ชันของ V_L

$$I_C = F(V_L) = \left(\frac{C}{LG_{m2}} \right) V_L \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) ฟังก์ชัน F มีความสัมพันธ์กับ I_C และ V_L แบบเชิงเส้น สามารถสร้างฟังก์ชัน F ได้โดยทรานคอนดักเตอร์

$$I_C \equiv G_{m1} V_L \quad (2.19)$$

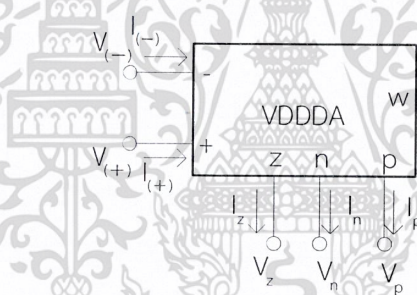
จากสมการที่ (2.18) และสมการที่ (2.19) จะได้

$$L = \frac{C}{G_{m1} G_{m2}} \quad (2.20)$$

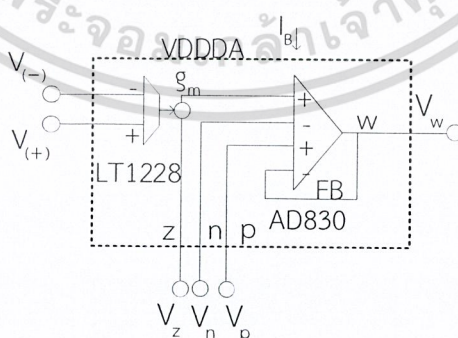
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต

วงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต (Voltage Differencing Differential Difference Amplifier : VDDDA) มีโครงสร้างจากวงจรขยายผลต่างแรงดัน (Voltage Differencing Differential Difference Unit : VDDDU) ต่อกับวงจรถ่ายความนำถ่ายโอน (Operational Transconductance Amplifier : OTA) โดยภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์แอกทีฟชนิดนี้มี 6 ขั้วแบ่งเป็นขั้วอินพุต 4 และขั้วเอาต์พุต 2 โดยขั้วอินพุตคือ $V_{(+)}$, $V_{(-)}$, P , N มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ขั้วเอาต์พุตคือ W มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำและ Z มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ในภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์โดยเลือกใช้ IC หมายเลข AD830 เป็นวงจรถ่ายผลต่างแรงดันและ LT1228 เป็นวงจรถ่ายความนำถ่ายโอนซึ่งสามารถปรับค่าความนำถ่ายโอน (g_m) ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการควบคุมผ่านกระแสไบอัสจากภายนอก (I_b) และสามารถประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) หรือไมโครโพรเซสเซอร์ (microprocessor) เพื่อควบคุมได้อีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้อุปกรณ์แอกทีฟชนิดนี้สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของ VDDDA จะแสดงอยู่ในสมการที่ (2.21)



ภาพที่ 2.4 สัญลักษณ์ของวงจร VDDDA



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของวงจร VDDDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} I_{(+)} \\ I_{(-)} \\ I_z \\ I_n \\ I_p \\ V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_m & -g_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_1 & -\beta_2 & \beta_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{(+)} \\ V_{(-)} \\ V_z \\ V_n \\ V_p \\ I_w \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

ค่าความนำถ่ายไอออนของ LT1228 เป็นดังสมการที่ (2.22)

$$g_m = 10I_B \quad (2.22)$$

จากภาพที่ 2.5 และสมการที่ (2.21) จะได้ค่าความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของ LT1228 เป็นดังสมการที่ (2.23)

$$I_z = g_m (V_{(+)} - V_{(-)}) \quad (2.23)$$

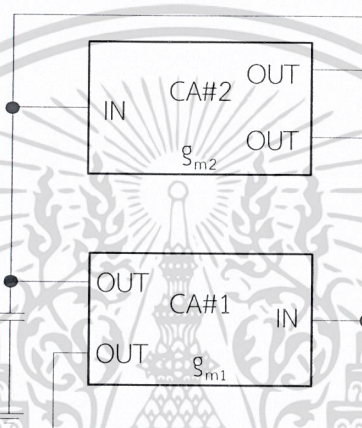
จากภาพที่ 2.5 และสมการที่ (2.21) จะได้ความสัมพันธ์ทางแรงดันทางไฟฟ้าของ AD830 ดังสมการที่ (2.24)

$$V_w = \beta_1 V_z - \beta_2 V_n + \beta_3 V_p \quad (2.24)$$

เมื่อ $\beta_i = 1 - \epsilon_{vi}$ สำหรับค่า $i = 1, 2, 3$ เมื่อ β_i คือความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA และ ϵ_{vi} คือค่าความผิดพลาดในการทำงานภายในโครงสร้างของวงจร VDDDA โดยในกรณีอุดมคติ $\epsilon_{vi} = 0$ ส่งผลให้ $\beta_i = 1$

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 Psychalinos and Spanidou (2006 : 168 – 171) ได้นำเสนอวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นวงจรขยายสัญญาณกระแส (Current Amplifiers : CA) จำนวน 2 ตัวต่อร่วมกับตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวดังภาพที่ 2.6 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในทดสอบ กำลังงานมีค่า 2.7 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.5 V จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.6 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.6 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.25)

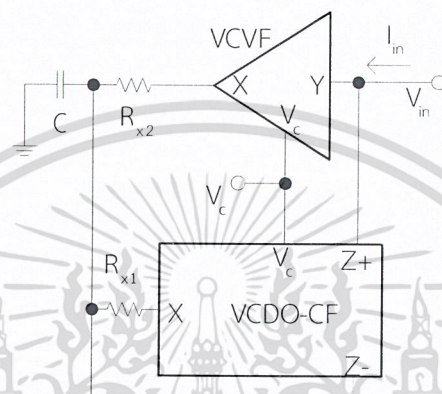
$$Z_{in} = \frac{sC}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.25) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.26)

$$L_{eq} = \frac{C}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.26)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 1 ตัวและไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว

2.3.2 Alpaslan and Yuce (2016 : 511-516) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Voltage Controlled Dual Output - Current Follower (VCDO-CF) และ Voltage Controlled - Voltage Follower (VCVF) ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ 1 ตัว และตัวต้านทานอีก 2 ตัวดังภาพที่ 2.7 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรถ่ายที่ใช้ทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.25 V จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.7 วงจรถ่ายตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VCDO-CF และ VCVF เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.7 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.27)

$$Z_{in} = sCR_{x1}R_{x2} + R_{x1} - R_{x2} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.27) เมื่อแทนค่า $R_x \cong \frac{1}{g_{MP}}$ และกำหนดให้ $R_{x1} = R_{x2} = R_x$ จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.28)

$$L_{eq} = \frac{C}{g_{MP}^2} \quad (2.28)$$

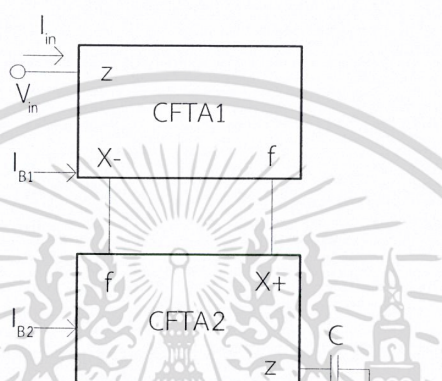
จากการศึกษางานวิจัยนี้พบว่า ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว

2.3.3 Ferri, et. al. (2007 : 440-443) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นวงจรถ่ายพานกระแสรุ่นที่สอง (Second Generation Current-Conveyor : CCII) จำนวน 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ 1 ตัวและตัวต้านทานอีก 2 ตัวดังภาพที่ 2.8 โดยใช้ AD844 เป็นโครงสร้างของวงจรถ่ายที่ใช้ทดสอบ จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 0.1 Hz – 1 kHz จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริง



จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว และไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

2.3.4 Herencsar, et. al. (2010 : 24-27) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Current Follower Transconductance Amplier (CFTA) จำนวน 2 ตัวนำต่อร่วมกับตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวดังภาพที่ 2.9 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบ กำลังงานมีค่า 10.6 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.85 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 20 kHz – 10 MHz งานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.9 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFTA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.9 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.31)

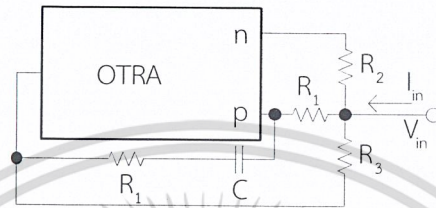
$$Z_{in} = \frac{sC}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.31) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.32)

$$L_{eq} = \frac{C}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.32)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 1 ตัว และไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว

2.3.5 Ghosh and Paul (2014 : 381-390) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายโอนแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นวงจรรอบเปอเรชันแนลทรานส์รีซิสแตนซ์แอมพลิไฟเออร์ (Operational Transresistance Amplifier : OTRA) จำนวน 1 ตัว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ 1 ตัวและตัวต้านทานอีก 4 ตัวดังภาพที่ 2.10 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรถ่ายโอนที่ใส่ทดสอบ กำลังงานมีค่า 12 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรถ่ายโอนเป็น ± 1.5 V จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรถ่ายโอนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 100 Hz – 400 kHz และมีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.10 วงจรถ่ายโอนตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ OTRA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.10 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.33)

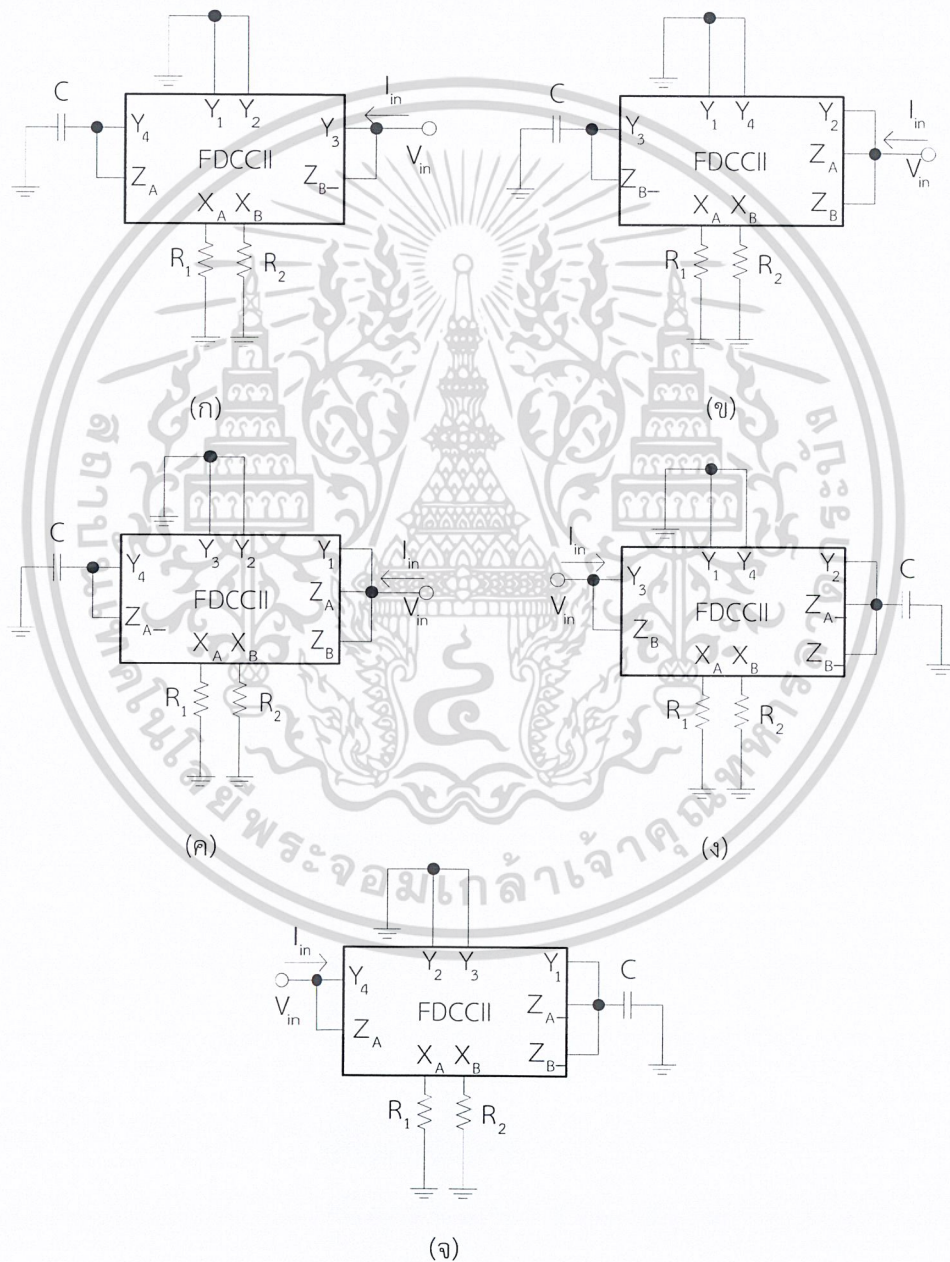
$$Z_m = G_1 + G_2 + G_3 + \frac{G_1 G_3}{G_4} - \frac{G_2 G_3}{G_4} + \frac{G_1 G_3}{sC} - \frac{G_2 G_3}{sC} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) เมื่อกำหนดให้ $G_1 + G_2 + G_3 = \frac{G_3}{G_4} G_2 - G_1$ จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.34)

$$L_{eq} = \frac{CR_1 R_2 R_3}{R_2 - R_1} \quad (2.34)$$

จากการศึกษาค้นคว้าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ และใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว

2.3.6 Kaçar (2010 : 109-113) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ 5 วงจรโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Fully Differential Second-Generation Current Conveyor (FDCCII) จำนวน 1 ตัวต่อร่วมกับตัวต้านทาน 2 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวดังภาพที่ 2.11 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบ และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.5 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 1 kHz – 10 MHz งานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.11 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ FDCCII เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

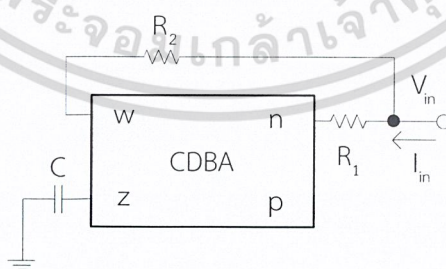
จากภาพที่ 2.11 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำจากภาพที่ 2.11

วงจร	Matching	Z_{eq}	L_{eq}
ก	non	$Z_{eq} = sCR_1R_2$	$L_{eq} = CR_1R_2$
ข	$R_1 = R_2 = R$	$Z_{eq} = \frac{sCR_1R_2}{1 + sC(R_2 - R_1)}$	$L_{eq} = CR^2$
ค	$R_1 = R_2 = R$	$Z_{eq} = \frac{sCR_1R_2}{1 + sC(R_1 - R_2)}$	$L_{eq} = CR^2$
ง	$R_1 = R_2 = R$	$Z_{eq} = sCR_1R_2 + R_1 - R_2$	$L_{eq} = CR^2$
จ	$R_1 = R_2 = R$	$Z_{eq} = sCR_1R_2 + R_2 - R_1$	$L_{eq} = CR^2$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ วงจร ก ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ และใช้อุปกรณ์แอคทีฟ 1 ตัว แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว วงจร ข,ค,ง,จ ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

2.3.7 Pathak, et. al. (2015 : 1-13) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ อุปกรณ์แอคทีฟเป็น current differencing buffered amplifier (CDBA) จำนวน 1 ตัว ต่อเข้ากับ ตัวต้านทาน 2 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวดังภาพที่ 2.12 โดยใช้ AD844 เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบ และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 12 V จากการศึกษพบว่างานวิจัยนี้มีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.12 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CDBA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ

จากภาพที่ 2.12 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.35)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

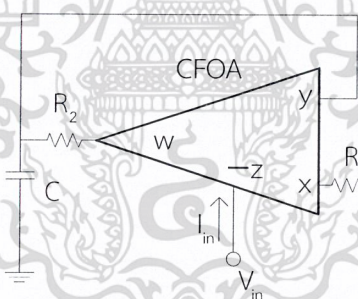
$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} + \frac{1}{sCR_1 R_2} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.35) แสดงให้เห็นว่าวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำนี้ไม่สามารถเป็นตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวได้ต้องเป็นตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมกับตัวต้านทานเท่านั้นดังสมการที่ (2.36)

$$L_{eq} = CR_1 R_2, R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.36)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว และไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ไม่สามารถเป็นตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียวได้ ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว

2.3.8 Alpaslan and Yuce (2015 : 3081-3100) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นออปแอมป์ชนิดป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier : CFOA) จำนวน 1 ตัวต่อเข้ากับตัวต้านทาน 2 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวดังภาพที่ 2.13 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบ กำลังงานมีค่า 0.89 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 0.75 V จากการศึกษพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรถ่ายเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 300 kHz – 30 MHz และมีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.13 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFOA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.13 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.37)

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{sCR_1 R_2} \quad (2.37)$$

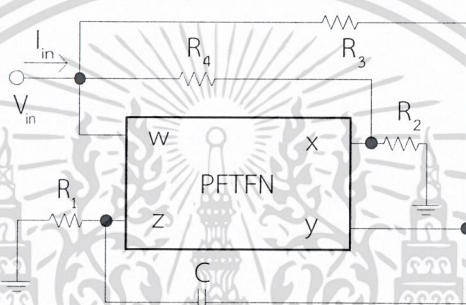
จากสมการที่ (2.37) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.38)

$$L_{eq} = CR_1 R_2 \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว และไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว และไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

2.3.9 Kumar and Senani (2010 : 105–112) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Positive Four Terminal-Floating-Nullor (PFTFN) จำนวน 1 ตัวต่อเข้ากับตัวต้านทาน 4 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวดังภาพที่ 2.14 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบ จากการศึกษพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 100 kHz – 1 MHz และงานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.14 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ PFTFN เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.14 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.39)

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{1}{R_2 + R_4} \left(1 + 2 \frac{R_4}{R_3} - \frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{1}{sCR_1R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_4} \right) \quad (2.39)$$

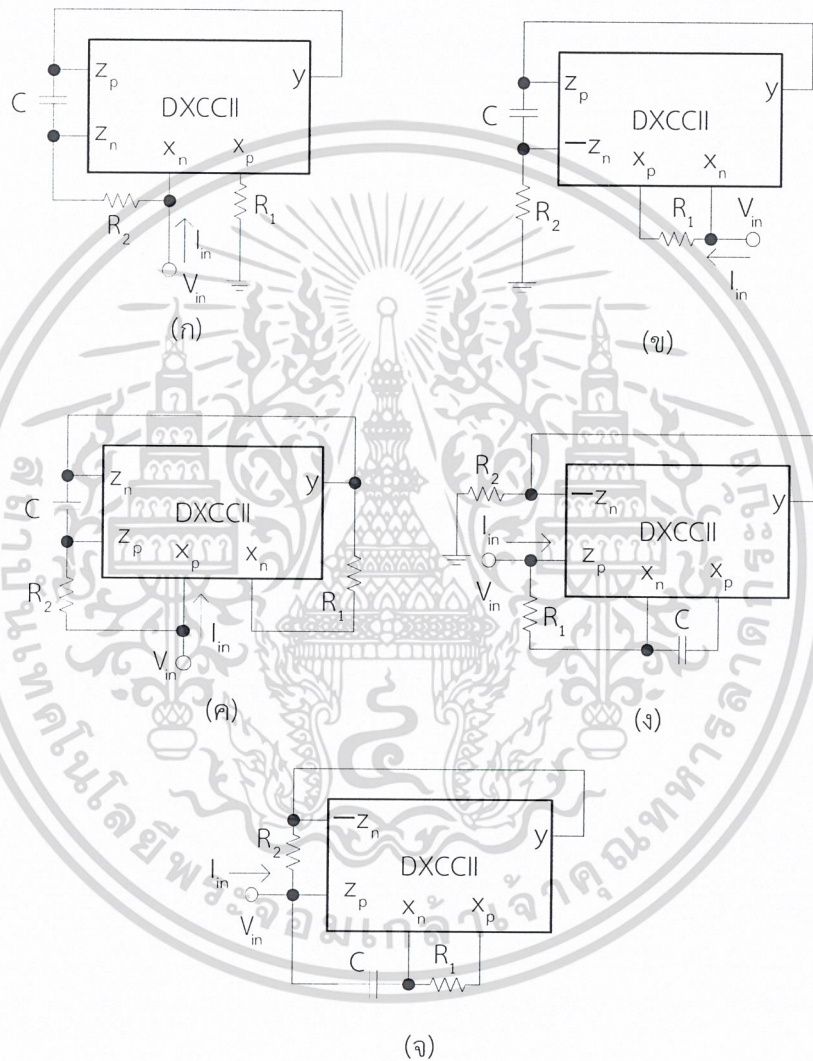
จากสมการที่ (2.39) เมื่อกำหนดให้ $1 + 2 \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$ จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.40)

$$L_{eq} = CR_1R_3 \left(1 + \frac{R_2}{R_4} \right) \quad (2.40)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ และใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.10 Kacar and Yesil (2010 : 632-638) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายโอนแบบตัวเหนี่ยวนำ 5 วงจรโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Dual-X Current Conveyor (DXCCII) จำนวน 1 ตัว ต่อเข้ากับตัวต้านทาน 2 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวดังภาพที่ 2.15 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.5 V จากการศึกษพบว่างานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.15 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DXCCII เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.15 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

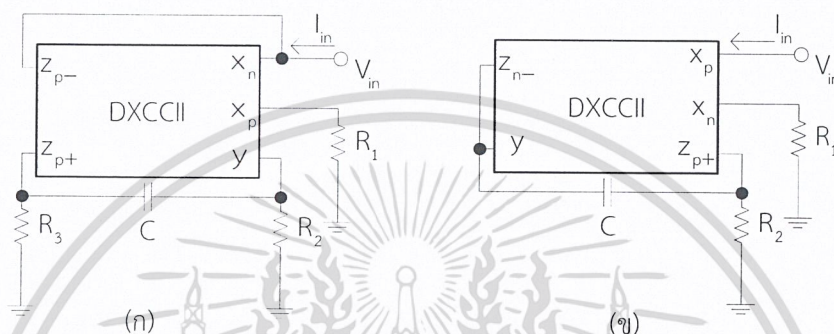
ตารางที่ 2.3 สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำจากภาพที่ 2.15

วงจร	Matching	Z_{eq}	L_{eq}	R_{eq}
ก	$R_2 = 4R_1 = R$	$-\frac{2}{sCR_1R_2} + \frac{4R_1 - R_2}{R_1R_2}$	$-\frac{sCRR}{8}$	non
ข	$R_1 = 4R_2 = 4R$	$\frac{2}{sCR_1R_2} - \frac{R_1 - 4R_2}{R_1R_2}$	$2sCRR$	non
ข*	$R_1 = 8R_2 = 8R$	$\frac{2}{sCR_1R_2} - \frac{R_1 - 4R_2}{R_1R_2}$	$4sCRR$	$-2R$
ค	non	$-\frac{4}{R_1} + \frac{8}{sCR_1R_2}$	$-\frac{sCR_1R_2}{8}$	$\frac{R_1}{4}$
ง	$R_1 = R_2 = R$	$-\frac{1}{-R_1 + R_2 + 2sCR_1R_2} + \frac{4sCR_2}{-R_1 + R_2 + 2sCR_1R_2}$	$-2sCRR$	$\frac{R}{2}$
จ	$R_1 = 2R_2 = 2R$	$-\frac{4}{-R_1 + 2R_2 + sCR_1R_2} + \frac{4sCR_2}{-R_1 + 2R_2 + sCR_1R_2}$	$\frac{sCRR}{2}$	$\frac{R}{2}$

ข* ใช้โครงสร้างภาพเดียวกับ ข แต่ค่าของอุปกรณ์พาสซีฟต่างกัน

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ วงจร ค ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ และใช้อุปกรณ์แอคทีฟ 1 ตัว อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และวงจร ก, ข, ข*, ง, จ ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์

2.3.11 Myderrizi, et. al. (2011 : 1074-1081) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายโอนแบบตัวเหนี่ยวนำ 2 วงจรโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Dual-X Current Conveyor (DXCCII) จำนวน 1 ตัว ดังภาพที่ 2.16 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรถ่ายโอนกำลังงานมีค่า 4.46 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.65 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรถ่ายโอนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 30 kHz - 30 MHz และงานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.16 วงจรถ่ายโอนตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DXCCII เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

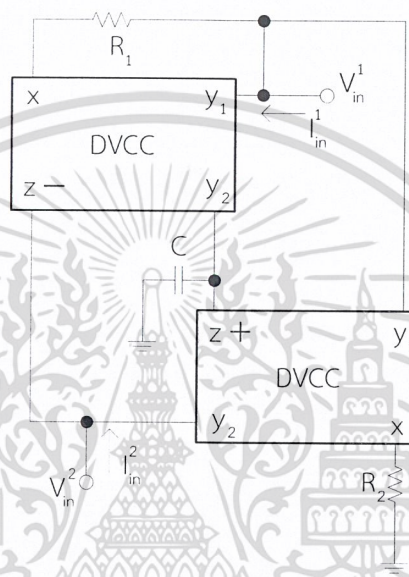
จากภาพที่ 2.16 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำจากภาพที่ 2.16

วงจร	Z_{in}	Matching	L_{eq}
ก	$Z_{in} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_1} + sCR_2R_3$	$R_1 = R_2 \parallel R_3$	$L_{eq} = CR_2R_3$
ข	$Z_{in} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + sCR_1R_2$	$R_1 = R_2 = R$	$L_{eq} = CR^2$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ และใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว

2.3.12 Horng (2010 : 407-413) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Differential Voltage Current Conveyor (DVCC) จำนวน 2 ตัวต่อร่วมกับ ตัวต้านทาน 2 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวดังภาพที่ 2.17 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจร ที่ใช้ทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.25 V จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้ไม่มีผล การทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการ ทดสอบจริง



ภาพที่ 2.17 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DVCC เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.17 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.41)

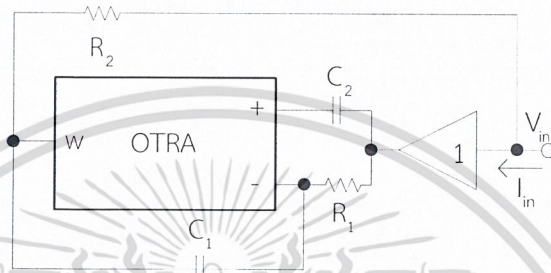
$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{G_1 G_2}{sC} \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.41) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.42)

$$L_{eq} = CR_1 R_2 \quad (2.42)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ ได้วงจรตัวเหนี่ยวนำ แบบลอย อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ มากกว่า 2 ตัว และไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

2.3.13 Gupta, et. al. (2012 : 489–499) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นวงจรออปเปอร์เรชันแนลทรานส์รีซิสแตนซ์แอมพลิไฟเออร์ (Operational Transresistance Amplifier : OTRA) จำนวน 1 ตัวและวงจรตามแรงดัน (Voltage Follower : Buffer) ต่อเข้ากับตัวต้านทาน 2 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 2 ตัวดังภาพที่ 2.18 โดยใช้ AD844 เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น $\pm 5\text{ V}$ จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้มีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.18 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ OTRA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.18 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.43)

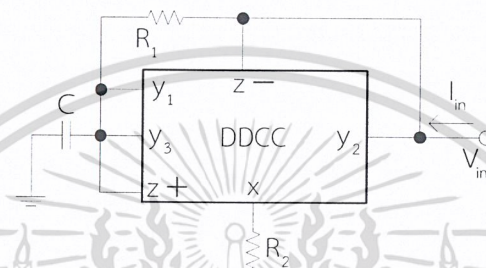
$$Z_{in} = R_2 \left(1 - \frac{C_2}{C_1} \right) + sC_1R_1R_2 \quad (2.43)$$

จากสมการที่ (2.43) เมื่อกำหนดให้ $C_1 = C_2$ จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.44)

$$L_{eq} = C_1R_1R_2 \quad (2.44)$$

จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว และต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์

2.3.14 Ibrahim, et. al. (2011 : 261-264) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรวจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟที่เป็นวงจรรีบแต่งสายพานกระแสแบบผลต่างแรงดัน (Modified Dual-Output Differential Difference Current Conveyor : MDO-DDCC) จำนวน 1 ตัวต่อเข้ากับตัวต้านทาน 2 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวดังภาพที่ 2.19 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรถูกทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.5 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรวจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 9 kHz – 60 MHz และไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.19 วงจรวจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ MDO-DDCC เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.19 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.45)

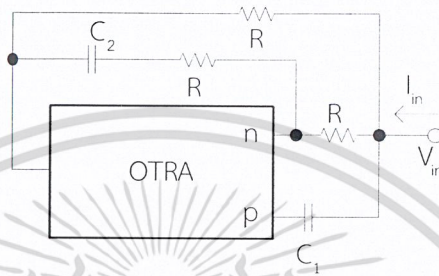
$$Z_{in} = \frac{(sC_1R_1R_2 - R_1 + R_2)R_1R_2}{4.5R_1R_2 - 2R_1^2 - 2R_2^2 + sC_1R_1^2R_2 - sC_1R_1R_2^2} \quad (2.45)$$

จากสมการที่ (2.45) เมื่อกำหนดให้ $R_1 = R_2$ จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.46)

$$L_{eq} = 2CR^2 \quad (2.46)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ และไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

2.3.15 Pandey, et. al. (2012 : 1069-1079) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นวงจรออปเปอเรชันแนลทรานส์รีซิสแตนซ์แอมพลิไฟเออร์ (Operational Transresistance Amplifier : OTRA) จำนวน 1 ตัวต่อเข้ากับตัวต้านทาน 3 ตัวและตัวเก็บประจุอีก 2 ตัวดังภาพที่ 2.20 โดยใช้ AD844 เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบ กำลังงานมีค่า 260 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 5 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 200 Hz – 2.5 MHz และมีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.20 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ OTRA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.20 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.47)

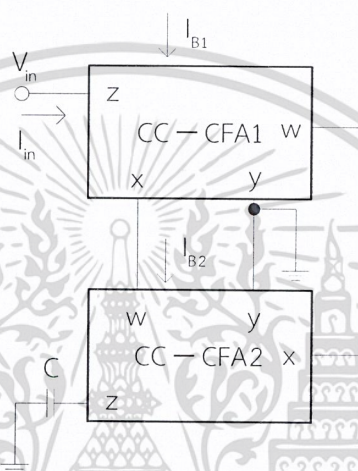
$$Z_{in} = \left(3R - \frac{RC_1}{C_2} \right) + sC_2R^2 \quad (2.47)$$

จากสมการที่ (2.47) เมื่อกำหนดให้ $C_1 = 3C_2$ จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.48)

$$L_{eq} = C_2R^2 \quad (2.48)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว อย่างไรก็ตามวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์

2.3.16 Jaikla and Siripruchyanun (2006 : 701-704) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายแบบ ตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Current Controlled Current Feedback Amplifiers (CC-CFA) จำนวน 2 ตัว ต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ 1 ตัวดังภาพที่ 2.21 โดยใช้ BJT เป็นโครงสร้างของ วงจรที่ใช้ทดสอบ กำลังงานมีค่า 0.356 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรถ่ายเป็น ± 1.5 V จากการศึกษพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 100 Hz – 1 MHz และ งานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น BJT ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิป เพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.21 วงจรถ่ายตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CC-CFA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.21 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.49)

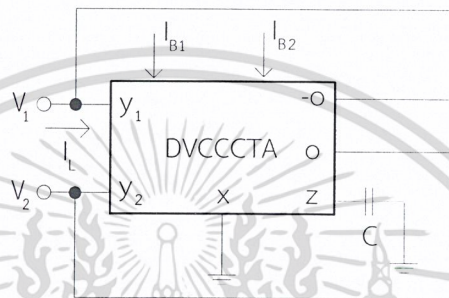
$$Z_{in} = sCR_{x1}R_{x2} \quad (2.49)$$

จากสมการที่ (2.49) เมื่อแทนค่า $R_x = \frac{V_T}{I_B}$ จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.50)

$$L_{eq} = \frac{CV_T^2}{I_{B1}I_{B2}} \quad (2.50)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 1 ตัว ไม่ต้องการความเข้ากัน ของอุปกรณ์ สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว

2.3.17 Jantakun and Siripruchyanun (2010 : 231-235) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Differential Voltage Current-Controlled Conveyor Transconductance Amplifier (DVCCCTA) จำนวน 1 ตัว ต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ 1 ตัว ดังภาพที่ 2.22 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบ กำลังงานมีค่า 1.48 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.5 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 8 kHz – 1 MHz และงานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างเป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.22 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DVCCCTA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.22 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.51)

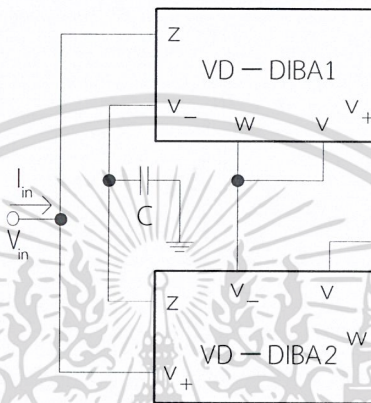
$$Z_{in} = \frac{sCR_x}{g_m} \quad (2.51)$$

จากสมการที่ (2.51) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.52)

$$L_{eq} = \frac{CR_x}{g_m} \quad (2.52)$$

จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้ได้ตัวเหนี่ยวนำแบบลอย ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 1 ตัว

2.3.18 Prasad, et. al. (2011 : 1-8) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Voltage Differencing Differential Input Buffered Amplifier (VD-DIBA) จำนวน 2 ตัว ต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ 1 ตัว ดังภาพที่ 2.23 โดยใช้ CMOS และ AD844 เป็นโครงสร้างของวงจรถ่ายที่ใช้ทดสอบ กำลังงานมีค่า 62.5 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 12 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 1 Hz – 1 MHz และไม่มีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.23 วงจรถ่ายตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VD-DIBA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.23 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.53)

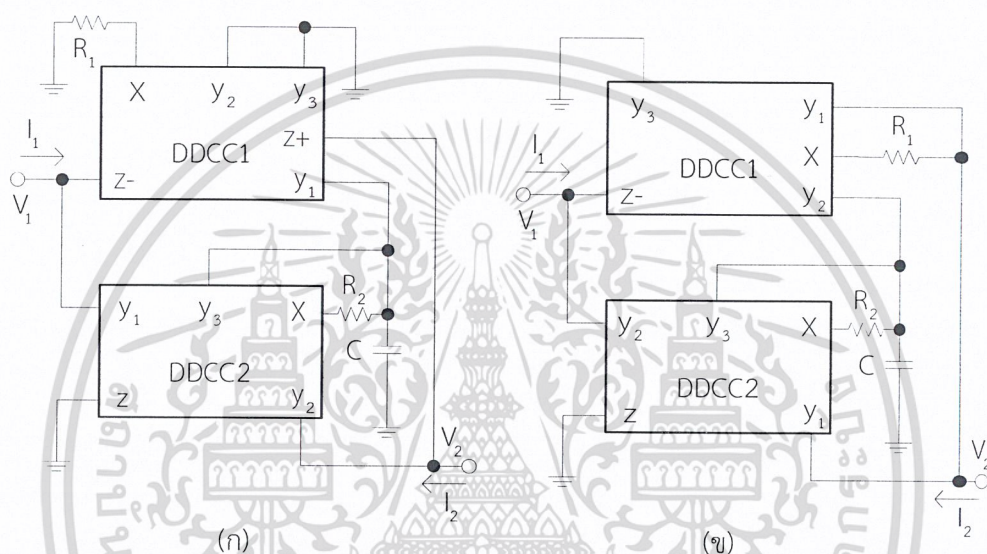
$$Z_{in} = \frac{s4C}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.53)$$

จากสมการที่ (2.53) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.54)

$$L_{eq} = \frac{4C}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.54)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 1 ตัว ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว

2.3.19 Yuce, et. al. (2015 : 2138-2149) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำจำนวน 2 วงจร โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Differential Difference Current Conveyor (DDCC) จำนวน 2 ตัวนำมาต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ 1 ตัวและตัวต้านทานอีก 2 ตัว ดังภาพที่ 2.24 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบ กำลังงานมีค่า 6.9 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 0.75 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 100 Hz – 50 kHz และงานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.24 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DDCC เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.24 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.55)

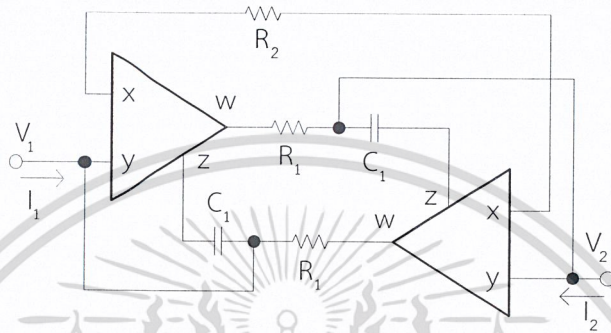
$$Z_{in} = sCR_1R_2 \quad (2.55)$$

จากสมการที่ (2.55) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.56)

$$L_{eq} = CR_1R_2 \quad (2.56)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ได้ตัวเหนี่ยวนำแบบลอย และไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว

2.3.20 Senani and Bhaskar (2012 : 981-987) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายแบบ ตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Current Feedback Op-Amps (CFOA) จำนวน 2 ตัวและ นำมาต่อเข้ากับตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัวและตัวต้านทานอีก 3 ตัว ดังภาพที่ 2.25 โดยใช้ AD844 เป็นโครงสร้างของวงจรถ่ายที่ใช้ทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรถ่ายเป็น ± 15 V จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยนี้มีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.25 วงจรถ่ายตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFOA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.25 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.57)

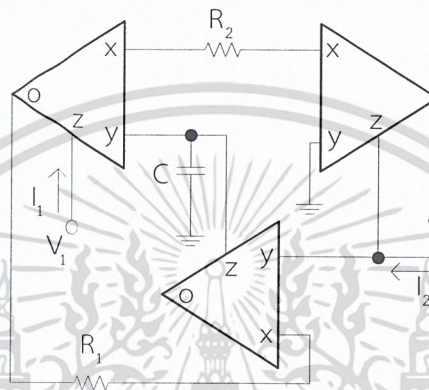
$$\frac{1}{Z_{in}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \frac{1}{sC_1 R_1 R_2} \quad (2.57)$$

จากสมการที่ (2.57) เมื่อแทนค่า $R_1 = R_2 = R_0$ จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.58)

$$L_{eq} = C_1 R_0^2 \quad (2.58)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ได้ตัวเหนี่ยวนำแบบลอย แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว และไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทาง อิเล็กทรอนิกส์

2.3.21 Said, et. al. (2015) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Current Feedback Op-Amps (CFOA) จำนวน 3 ตัวและนำมาต่อเข้ากับตัวเก็บประจุจำนวน 1 ตัวและตัวต้านทานอีก 2 ตัว ดังภาพที่ 2.26 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบ กำลังงานมีค่า 8.42 mW และใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.5 V จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.26 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFOA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.26 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.59)

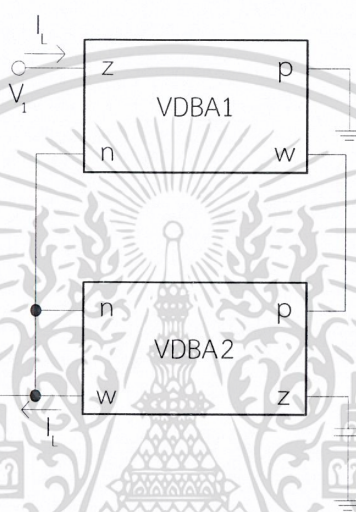
$$Z_{in} = sCR_1R_2 \quad (2.59)$$

จากสมการที่ (2.59) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.60)

$$L_{eq} = CR_1R_2 \quad (2.60)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ได้ตัวเหนี่ยวนำแบบลอย และไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 3 ตัว

2.3.22 Channumsin, et. al. (2015 : 114-117) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรวจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟ Voltage Differencing Buffered Amplifier (VDBA) จำนวน 2 ตัว นำมาต่อเข้ากับตัวเก็บประจุจำนวน 1 ตัว ดังภาพที่ 2.27 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรถูกทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรถูกเป็น ± 1 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานวงจรวจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 2 kHz – 100 kHz จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.27 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDBA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.27 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.61)

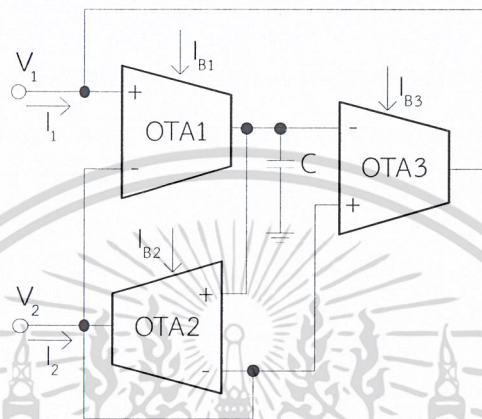
$$Z_{in} = \frac{sC}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.61)$$

จากสมการที่ (2.61) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.62)

$$L_{eq} = \frac{C}{g_{m1}g_{m2}} \quad (2.62)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ได้ตัวเหนี่ยวนำแบบลอย ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 1 ตัว สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว

2.3.23 Koomgaew, et. al. (2009 : 857-860) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายโอนแบบ ตัวเหนี่ยวนำจำนวน 2 วงจรโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นวงจรถ่ายโอนความนำถ่ายโอน (Operational Transconductance Amplifier : OTA) จำนวน 3 ตัว นำมาต่อเข้ากับตัวเก็บประจุจำนวน 1 ตัว ดังภาพที่ 2.28 โดยใช้ CA3280 เป็นโครงสร้างของวงจรถ่ายโอนที่ใช้ทดสอบ จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้มีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.28 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ OTA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.27 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.63)

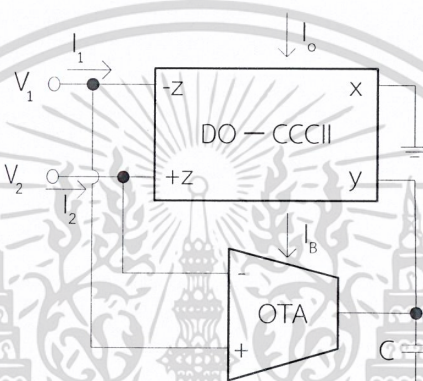
$$Z_{in} = \frac{s4V_T^2 C}{I_{B1} I_{B2}} \quad (2.63)$$

จากสมการที่ (2.63) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.64)

$$L_{eq} = \frac{4V_T^2 C}{I_{B1} I_{B2}} \quad (2.64)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ได้ตัวเหนี่ยวนำแบบลอย ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 1 ตัว สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว

2.3.24 Sagbas, et. al. (2009 : 857-860) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำจำนวน 2 วงจรโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Dual-Output Current-Controlled Current Conveyor (DO-CCCI) จำนวน 1 ตัว และ วงจรขยายความนำถ่ายโอน (Operational Transconductance Amplifier : OTA) จำนวน 1 ตัว นำมาต่อเข้ากับตัวเก็บประจุจำนวน 1 ตัว ดังภาพที่ 2.29 โดยใช้ BJT เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 2.5 V จากการศึกษาพบว่าช่วงความถี่ใช้งานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่าง 10 kHz – 300 kHz และงานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น BJT ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.29 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ DO-CCCI และ OTA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.29 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.65)

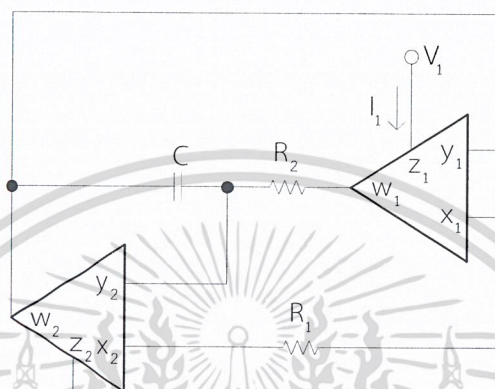
$$Z_{in} = \frac{sCV_T^2}{I_{oB}} \quad (2.65)$$

จากสมการที่ (2.65) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.66)

$$L_{eq} = \frac{CV_T^2}{I_{oB}} \quad (2.66)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ได้ตัวเหนี่ยวนำแบบลอย ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 1 ตัว แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว

2.3.25 Bhaskar and Senani (2013 : 381-383) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำจำนวน 2 วงจรโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็นออปแอมป์ชนิดป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier : CFOA) จำนวน 2 ตัว นำมาต่อเข้ากับตัวเก็บประจุจำนวน 1 ตัวและตัวต้านทานอีก 2 ตัว ดังภาพที่ 2.30 โดยใช้ AD844 เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบจากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้มีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.30 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFOA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.30 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.67)

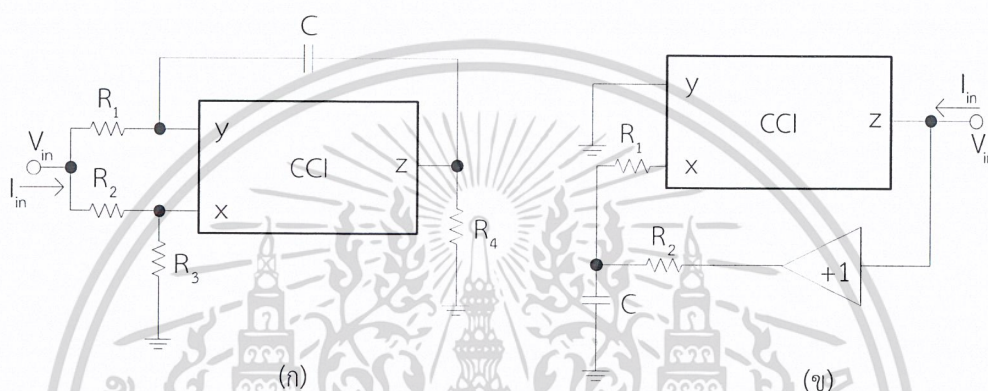
$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{R_1 + sCR_1R_2} \quad (2.67)$$

จากสมการที่ (2.67) แสดงให้เห็นว่าวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำนี้ไม่สามารถเป็นตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวได้ต้องเป็นตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมกับตัวต้านทานเท่านั้นดังสมการที่ (2.68)

$$L_{eq} = CR_1R_2, R_{eq} = R_1 \quad (2.68)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ ได้ตัวเหนี่ยวนำแบบลอย แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว ไม่สามารถเป็นตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียวได้ ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำแบบอิเล็กทรอนิกส์ได้ และใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว

2.3.26 Arslan, et. al. (2012 : 21-26) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำจำนวน 2 วงจรโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟเป็นวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง (First Generation Current-Conveyor : CCI) จำนวน 1 ตัว ต่อกับตัวเก็บประจุจำนวน 1 ตัว ตัวต้านทาน 4 ตัว และตัวเก็บประจุจำนวน 1 ตัว ตัวต้านทานอีก 2 ตัว ดังภาพที่ 2.31 โดยใช้ CMOS เป็นโครงสร้างของวงจรที่ใช้ทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 1.65 V จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้ไม่มีผลการทดลองจริงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็น CMOS ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อต้องสร้างชิปเพื่อใช้ในการทดสอบจริง



ภาพที่ 2.31 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CCI เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ

จากภาพที่ 2.31 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำดังตารางที่ 2.5

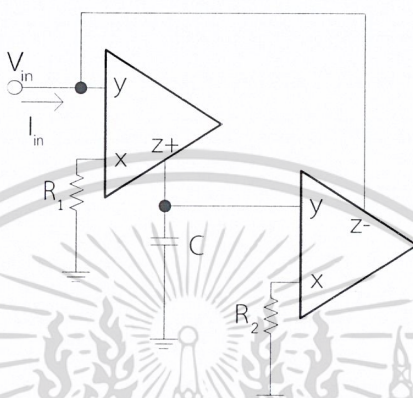
ตารางที่ 2.5 สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำและสมการค่าความเหนี่ยวนำจากภาพที่ 2.31

วงจร	Z_{in}	Matching	L_{eq}
ก	$Z_{in} = \frac{sCR^2}{10}$	$R_1 = \frac{R}{3}, R_2 = R_4 = \frac{R}{2}, R_3 = R$	$L_{eq} = \frac{CR^2}{10}$
ข	$Z_{in} = R_1 + R_2 + sCR_1R_2$	non	$L_{eq} = CR_1R_2$ $R_{eq} = R_1 + R_2$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ได้ตัวเหนี่ยวนำแบบลอย แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอคทีฟ 2 ตัว ไม่สามารถเป็นตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียวได้ ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำแบบอิเล็กทรอนิกส์ได้ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว วงจร ก ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ และในวงจร ข ไม่สามารถเป็นตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวได้ต้องเป็นตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมกับตัวต้านทานเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.27 Bandyopadhyay, et. al. (2005 : 689-692) ได้นำเสนองานวิจัยวงจรถ่ายแบบ ตัวเหนี่ยวนำจำนวน 2 วงจรโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเป็น Current Feedback Amplifiers (CFA) จำนวน 2 ตัว ต่อกับตัวเก็บประจุจำนวน 1 ตัวและตัวต้านทานอีก 2 ตัว ดังภาพที่ 2.32 โดยใช้ AD844 เป็นโครงสร้างของวงจรถ่ายที่ใช้ทดสอบและใช้แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 10 V จากการศึกษาพบว่างานวิจัยนี้มีผลการทดลองจริง



ภาพที่ 2.32 วงจรตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ CFA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ

จากภาพที่ 2.32 จะได้สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.69)

$$Z_{in} = sCR_1R_2 \quad (2.69)$$

จากสมการที่ (2.69) จะได้สมการค่าความเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.70)

$$L_{eq} = CR_1R_2 \quad (2.70)$$

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของงานวิจัยนี้คือ ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 2 ตัว อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว ไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำแบบอิเล็กทรอนิกส์ได้

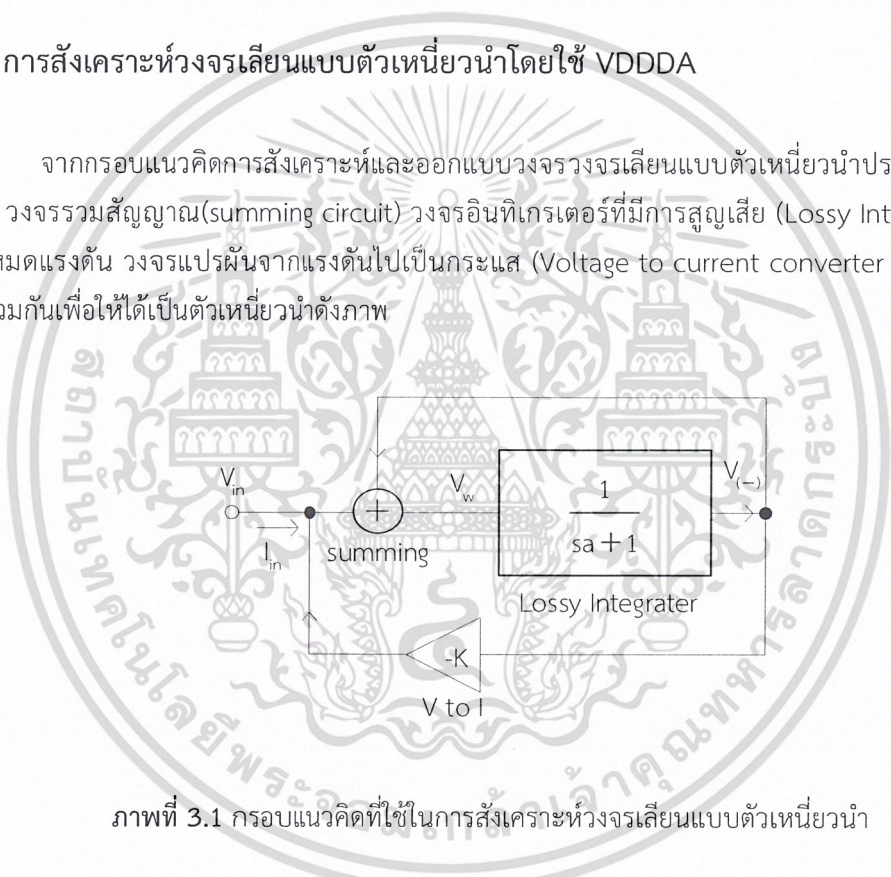
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสังเคราะห์และวิเคราะห์วงจรวอร์เลนแบบตัวเหนี่ยวนำใช้อุปกรณ์แอคทีฟเป็น VDDDA โดยใช้กรอบแนวคิดในบทที่ 1 เป็นหลัก มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างวงจรวอร์เลนแบบตัวเหนี่ยวนำที่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้จำนวนอุปกรณ์พาสซีฟน้อย และนำเสนอวงจรประยุกต์

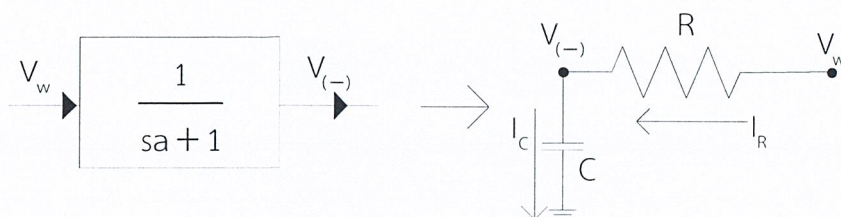
3.1 การสังเคราะห์วงจรวอร์เลนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDDDA

จากกรอบแนวคิดการสังเคราะห์และออกแบบวงจรวอร์เลนแบบตัวเหนี่ยวนำประกอบไปด้วย วงจรรวมสัญญาณ(summing circuit) วงจรอินทิเกรเตอร์ที่มีการสูญเสีย (Lossy Integrator) ในโหมดแรงดัน วงจรแปรผันจากแรงดันไปเป็นกระแส (Voltage to current converter : V to I) ต่อรวมกันเพื่อให้ได้เป็นตัวเหนี่ยวนำดังกล่าว



ภาพที่ 3.1 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจรวอร์เลนแบบตัวเหนี่ยวนำ

จากภาพที่ 3.1 เมื่อพิจารณาในส่วนของวงจรวอร์เลนอินทิเกรเตอร์จะได้



ภาพที่ 3.2 วงจรวอร์เลนอินทิเกรเตอร์ในกรอบความคิดเทียบกับวงจรวอร์เลนอินทิเกรเตอร์ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรอินทิเกรเตอร์ในกรอบแนวคิดสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$V_{(-)} = \frac{1}{sa + 1} V_w \quad (3.1)$$

จากภาพที่ 3.2 สามารถวิเคราะห์สมการจากวงจรอินทิเกรเตอร์ที่สร้างขึ้นได้ว่า

$$I_R = I_C \quad (3.2)$$

จะได้

$$\frac{V_w - V_{(-)}}{R} = \frac{V_{(-)} - 0}{\frac{1}{sC}} \quad (3.3)$$

เปลี่ยนภาพสมการให้อยู่ในภาพของ $V_{(-)}$

$$V_{(-)} = \frac{V_w}{sCR + 1} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.4) จะได้

$$a = CR \quad (3.5)$$

จากภาพที่ 3.1 เมื่อพิจารณาในส่วนของวงจรรวมสัญญาณจะได้



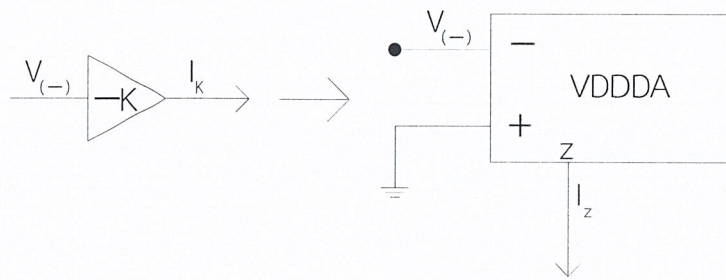
ภาพที่ 3.3 วงจรรวมสัญญาณในกรอบความคิดเทียบกับวงจรรวมสัญญาณโดยใช้ VDDDA

จากภาพที่ 3.3 สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$V_w = V_{in} + V_{(-)} \quad (3.6)$$

จากภาพที่ 3.1 เมื่อพิจารณาในส่วนของวงจรแปรผันจากแรงดันไปเป็นกระแสจะได้ดังภาพที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 วงจรแปรผันจากแรงดันไปเป็นกระแสในกรอบความคิดเทียบกับวงจรแปรผันจากแรงดันไปเป็นกระแสโดยใช้ VDDDA

จากภาพที่ 3.4 จะได้สมการที่เกิดจากวงจรแปรผันจากแรงดันไปเป็นกระแสในกรอบความคิด

$$\frac{I_k}{V_{(-)}} = -K \tag{3.7}$$

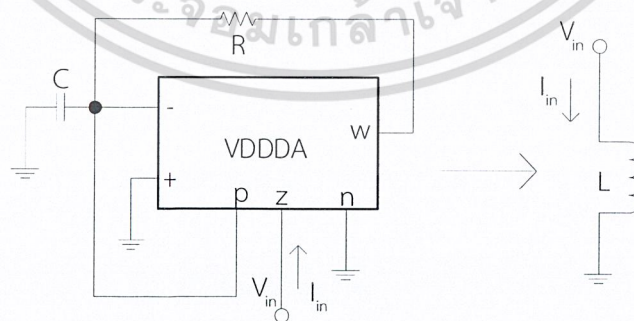
จากสมการ $I_z = g_m (V_{(+)} - V_{(-)})$ กำหนดให้ I_z คือ I_k จะได้สมการ

$$\frac{I_k}{V_{(-)}} = -g_m \tag{3.8}$$

จากสมการที่ (3.7) และสมการที่ (3.8) จะได้

$$g_m = k \tag{3.9}$$

เมื่อนำส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วนของวงจรที่ออกแบบเปรียบเทียบกับกรอบแนวคิดการสังเคราะห์จะได้โครงสร้างของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดย VDDDA ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDDDA ต่อร่วมกับ R และ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDDDA กรณีทำงานเป็นอูตมคติ

จากภาพที่ 3.5 เมื่อพิจารณาที่โหนด V_{in} จะได้สมการ

$$I_{in} + I_z = 0 \quad (3.10)$$

จากสมการ $I_z = g_m(V_{(+)} - V_{(-)})$ เมื่อพิจารณาร่วมกับภาพที่ 3.5 จะได้สมการใหม่คือ

$$I_z = -g_m V_{(-)} \quad (3.11)$$

จากภาพที่ 3.5 เมื่อพิจารณาที่โหนด $V_{(-)}$ จะได้สมการ

$$I_c + I_p + I_{(-)} + I_R = 0 \quad (3.12)$$

แทน $I_p = 0, I_{(-)} = 0$ และค่าของ I_c, I_R จากสมการที่ (3.3) ลงในสมการที่ (3.12) จะได้

$$\frac{V_{(-)} - V_w}{R} + \frac{V_{(-)}}{sC} = 0 \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) จะสามารถหาค่าของ $V_{(-)}$ ได้โดย

$$V_{(-)} = \frac{V_w}{sCR + 1} \quad (3.14)$$

จากภาพที่ 3.5 เมื่อพิจารณาที่วงจรวจร VDDDA จะได้สมการ

$$V_w = V_{in} + V_{(-)} \quad (3.15)$$

นำสมการที่ (3.15) แทนลงในสมการที่ (3.14) จะได้

$$V_{(-)} = \frac{V_{in} + V_{(-)}}{sCR + 1} \quad (3.16)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{(-)} = \frac{V_{in}}{sCR} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ (3.11) แทนค่า $V_{(-)}$ ด้วยสมการที่ (3.17)

$$I_z = -g_m \frac{V_{in}}{sCR} \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (3.18) แทนลงในสมการที่ (3.10)

$$I_{in} - \frac{g_m V_{in}}{sCR_T} = 0 \quad (3.19)$$

จะได้สมการความต้านทานอินพุตของวงจรถัดสมการที่ (3.20)

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{sCR}{g_m} \quad (3.20)$$

สมการความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ คือ

$$X_L = \frac{V_{in}}{I_{in}} = sL \quad (3.21)$$

จากการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (3.20) กับสมการที่ (3.21) พบว่า

$$L = \frac{CR}{g_m} \quad (3.22)$$

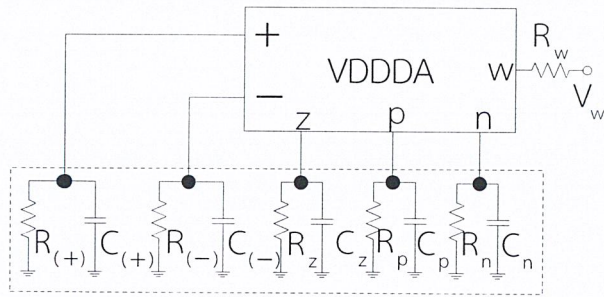
จากสมการที่ (3.22) พบว่าค่า L มีผลมาจาก C, R และ g_m เมื่อ $g_m = 10I_B$ ทำให้พบว่าสามารถปรับค่า L ได้จาก I_B โดยที่ I_B คือค่าของกระแสไบอัส

$$L = \frac{CR}{10I_B} \quad (3.23)$$

3.3 การวิเคราะห์ห้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDDDA กรณีทำงานไม่เป็นอุดมคติ

3.3.1 กรณีค่าของความต้านทานและค่าของความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA

ค่าของความต้านทานและค่าของความจุแฝงสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกขั้วของอุปกรณ์ ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อการทำของวงจรถัดไปไม่เป็นไปตามอุดมคติดังภาพที่ 3.6 โดยในภาพที่ 3.6 จะแสดงความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA จากโครงสร้างของวงจรถัดไปภาพที่ 3.5 พบว่าขั้ว + , n ถูกต่อลงกราวด์ดังนั้นความต้านทานและความจุแฝงของขั้วเหล่านี้จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรถัดไปและเนื่องจากขั้ว z เป็นขั้วอินพุตของวงจรถัดไปจึงเกิดความต้านทานและความจุแฝงแยกกับขั้วอื่นๆดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.6 ค่าของความต้านทานและค่าของความจุแฝงในขั้วของอุปกรณ์ VDDDA

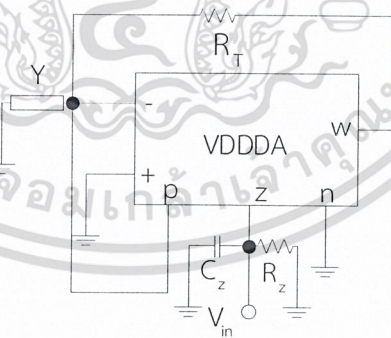
โดยกำหนดค่าให้ Y เป็นส่วนกลับของค่าอิมพีแดนซ์รวมที่เกิดจากความต้านทานแฝงและความจุของตัวเก็บประจุแฝงซึ่งมีรายละเอียดดังสมการที่ (3.24) และสมการที่ (3.25)

$$Y = s(C + C_p + C_{(-)}) + G_p + G_{(-)} \quad (3.24)$$

และ

$$R_T = R + R_w \quad (3.25)$$

ผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ต้องจลื่นแบบตัวเหนี่ยวนำจะแสดงอยู่ในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ค่าของความต้านทานแฝงรวมของอุปกรณ์ VDDDA

จากภาพที่ 3.7 พิจารณาที่โหนด $V_{(-)}$ จะได้สมการ

$$I_Y + I_p + I_{(-)} + I_{R_T} = 0 \quad (3.26)$$

แทน $I_p = 0$ และ $I_{(-)} = 0$ ลงในสมการที่ (3.26) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{(-)} - V_w}{R_T} + V_{(-)}Y = 0 \quad (3.27)$$

จากสมการด้านบนสามารถหาค่าของ V_w ได้โดย

$$V_{(-)} = \frac{V_w}{(YR_T + 1)} \quad (3.28)$$

จากภาพที่ 3.7 เมื่อพิจารณาที่วงจร VDDDA จะได้สมการ

$$V_w = V_{in} + V_{(-)} \quad (3.29)$$

นำสมการที่ (3.29) แทนลงในสมการที่ (3.28) จะได้

$$V_{(-)} = \frac{V_{in} + V_{(-)}}{YR_T + 1} \quad (3.30)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{(-)} = \frac{V_{in}}{YR_T} \quad (3.31)$$

จากสมการ $I_z = g_m(V_{(+)} - V_{(-)})$ เมื่อพิจารณาร่วมกับภาพที่ 3.7 จะได้สมการใหม่คือ

$$I_z = -g_m V_{(-)} \quad (3.32)$$

จากสมการที่ (3.32) แทนค่า $V_{(-)}$ ด้วยสมการที่ (3.31)

$$I_z = -g_m \frac{V_{in}}{YR_T} \quad (3.33)$$

จากภาพที่ 3.7 เมื่อพิจารณาที่โหนด V_{in} จะได้สมการ

$$I_{in} + I_z = 0 \quad (3.34)$$

นำสมการที่ (3.33) แทนลงในสมการที่ (3.34)

$$I_{in} - \frac{g_m V_{in}}{YR_T} = 0 \quad (3.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$\frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{YR_T}{g_m} \quad (3.36)$$

นำสมการที่ (3.24) มาแทนลงในสมการที่ (3.36) จะได้

$$\frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{\left[s(C + C_p + C_{(-)}) + G_p + G_{(-)} \right] R_T}{g_m} \quad (3.37)$$

จากสมการที่ (3.37) เมื่อจัดสมการใหม่จะได้

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{s(C + C_p + C_{(-)})R_T}{g_m} + \frac{(G_p + G_{(-)})R_T}{g_m} \quad (3.38)$$

จากสมการที่ (3.38) เมื่อเทียบกับภาพที่ 3.7 พบว่าที่ขั้วอินพุต z มีค่าความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ขนานอยู่ ดังนั้นสมการความต้านทานที่ขั้วอินพุตจะเป็นดังสมการที่ (3.39)

$$Z_{in} = \frac{s(C + C_p + C_{(-)})R_T}{g_m} + \frac{(G_p + G_{(-)})R_T}{g_m} \parallel C_z \parallel R_z \quad (3.39)$$

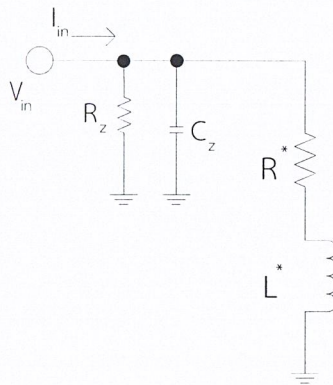
จากสมการที่ (3.39) จะได้ค่าของ L_{eq}^* และ R_{eq}^* ดังสมการที่ (3.40) และสมการที่ (3.41) ตามลำดับ

$$L_{eq}^* = \frac{R_T (C + C_p + C_{(-)})}{10I_B} \quad (3.40)$$

และ

$$R_{eq}^* = \frac{R_T (G_p + G_{(-)})}{10I_B} \quad (3.41)$$

จากสมการที่ (3.39) จะได้ว่าจริงเทียบเคียงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในกรณีไม่เป็น
อุดมคติ

จากภาพที่ 3.8 แสดงให้เห็นว่าวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้สังเคราะห์ขึ้นมาได้รับผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA โดยในสมการที่ (3.40) แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของค่าความเหนี่ยวนำเมื่อเทียบกับสมการที่ (3.23) ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในอุดมคติ และในช่วงความถี่ต่ำค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำควรมีค่าลดลงเมื่อความถี่ลดลง แต่จากผลกระทบของความต้านทานแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ที่แสดงไว้ดังสมการที่ (3.39) จะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่โดยเฉพาะค่าของ R_{eq}^* จะส่งผลกระทบมาก ในขณะที่ช่วงความถี่สูงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำควรมีค่ามากขึ้นตามความถี่ แต่เพราะความจุแฝงของขั้ว z หรือ C_z ที่แสดงไว้ในสมการที่ (3.39) จะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

3.3.2 กรณีความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดันอินพุตไปยังเอาต์พุต

สมการแรงดันไฟฟ้าของ VDDDA ในกรณีที่คิดถึงความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA คือ

$$v_w = \beta_1 v_z - \beta_2 v_n + \beta_3 v_p \quad (3.42)$$

เมื่อ β_1 คือ ความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA จากขั้ว v_z ไปที่ขั้ว v_w

β_2 คือ ความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA จากขั้ว v_n ไปที่ขั้ว v_w

β_3 คือ ความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA จากขั้ว v_p ไปที่ขั้ว v_w

จากภาพที่ 3.5 พบว่าขั้ว n ไม่ถูกใช้งานและ $v_p = v_{(-)}$ จะได้สมการเป็น

$$v_w = \beta_1 v_z + \beta_3 v_{(-)} \quad (3.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.5 เมื่อพิจารณาที่โหนด $V_{(-)}$ จะได้สมการ

$$I_c + I_p + I_{(-)} + I_R = 0 \quad (3.44)$$

แทน $I_p = 0$ และ $I_{(-)} = 0$ ลงในสมการที่ (3.44) จะได้

$$\frac{V_{(-)} - V_w}{R} + \frac{V_{(-)}}{sC} = 0 \quad (3.45)$$

จากสมการที่ (3.45) จะสามารถหาค่าของ $V_{(-)}$ ได้โดย

$$V_{(-)} = \frac{V_w}{(sCR + 1)} \quad (3.46)$$

นำสมการที่ (3.43) แทนลงในสมการที่ (3.46) จะได้

$$V_{(-)} = \frac{\beta_1 V_{in} + \beta_3 V_{(-)}}{(sCR + 1)} \quad (3.47)$$

จะได้

$$V_{(-)} = \frac{\beta_1 V_{in}}{sCR + 1 - \beta_3} \quad (3.48)$$

จากสมการ $I_z = g_m (V_{(+)} - V_{(-)})$ เมื่อพิจารณาร่วมกับภาพที่ 3.5 จะได้สมการใหม่ คือ

$$I_z = -g_m V_{(-)} \quad (3.49)$$

นำสมการที่ (3.48) แทนลงในสมการที่ (3.49)

$$I_z = -g_m \left(\frac{\beta_1 V_{in}}{sCR + 1 - \beta_3} \right) \quad (3.50)$$

จากภาพที่ 3.5 เมื่อพิจารณาที่โหนด V_{in} จะได้สมการที่ (3.51)

$$I_{in} + I_z = 0 \quad (3.51)$$

นำสมการที่ (3.50) แทนลงในสมการที่ (3.51)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{in} - g_m \left(\frac{\beta_1 V_{in}}{sCR + 1 - \beta_3} \right) = 0 \quad (3.52)$$

จะได้

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{sCR + 1 - \beta_3}{\beta_1 g_m} \quad (3.53)$$

หรือ

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{sCR + 1 - \beta_3}{10I_B \beta_1} \quad (3.54)$$

สมการที่ (3.54) คือสมการผลกระทบที่เกิดจากความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดัน

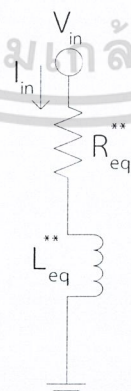
จากสมการที่ (3.54) พบว่ามีค่าของ L_{eq}^{**} ต่อกันกับ R_{eq}^{**} ดังสมการ

$$L_{eq}^{**} = \frac{sCR}{10I_B \beta_1} \quad (3.55)$$

และ

$$R_{eq}^{**} = \frac{1 - \beta_3}{10I_B \beta_1} \quad (3.56)$$

จากสมการที่ (3.55) และสมการที่ (3.56) จะได้ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 วงจรเทียบเคียงเมื่อคำนึงความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่าวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้สังเคราะห์จะได้รับผลกระทบจากความผิดพลาดของอัตรากระแสผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA จากสมการที่ (3.55) พบว่าค่าความเหนี่ยวนำของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากสมการที่ (2.32) ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในอุดมคติ

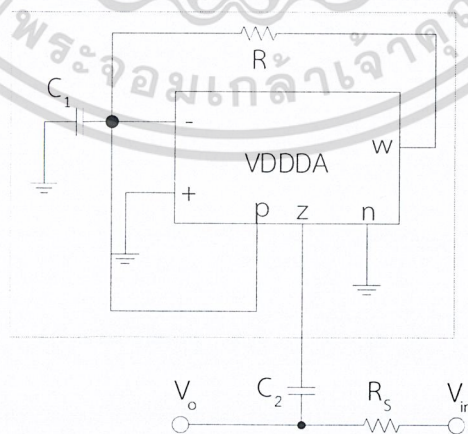
3.4 วงจรกรองกำจัดแถบความถี่อันดับที่สองที่ออกแบบมาจากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

วงจรกรองกำจัดแถบความถี่อันดับที่สอง (second order band reject filter) เป็นวงจรที่ใช้เพื่อเป็นตัวอย่างวงจรประยุกต์ในบนี้ กรอบแนวคิดการสังเคราะห์และออกแบบของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ใช้ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และตัวเหนี่ยวนำ (L) ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 กรอบแนวคิดวงจรถองกำจัดแถบความถี่อันดับที่ 2

จากภาพที่ 3.10 เมื่อนำวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำมาแทนตัวเหนี่ยวนำจะได้ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 วงจรประยุกต์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.11 จะได้ฟังก์ชันส่งผ่าน (transfer function) ดังสมการที่ (3.57)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{s^2 + \frac{1}{C_2 L_{eq}}}{s^2 + s \frac{R_s}{L_{eq}} + \frac{1}{C_2 L_{eq}}} \quad (3.57)$$

จากภาพที่ 3.11 เมื่อแทนค่า $L = \frac{C_1 R}{10I_B}$ ลงในสมการที่ (3.57) จะได้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{s^2 + \frac{10I_B}{C_1 C_2 R}}{s^2 + s \frac{R_s 10I_B}{C_1 R} + \frac{10I_B}{C_1 C_2 R}} \quad (3.58)$$

จากสมการที่ (3.58) สามารถหาค่าของความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency : ω_0) และปัจจัยคุณภาพ (Quality factor : Q) ดังสมการ

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{10I_B}{C_1 C_2 R}} \quad (3.59)$$

และ

$$Q = \frac{1}{R_s} \sqrt{\frac{C_1 R}{10I_B C_2}} \quad (3.60)$$

จากสมการที่ (3.59) และสมการที่ (3.60) พบว่าวงจรกรองก่่าจัดแถบความถี่สามารถปรับค่าความถี่ธรรมชาติและปัจจัยคุณภาพได้ด้วยการปรับกระแสไบอัสที่วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ และจากสมการที่ (3.60) พบว่าสามารถปรับค่าของปัจจัยคุณภาพโดยไม่ส่งผลต่อค่าของความถี่ธรรมชาติได้ โดยการปรับค่า R_s

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 3 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรจะถูกจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE และการต่อวงจรจริงในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรจะใช้ IC จำนวน 2 ตัว เป็นโครงสร้างของวงจร VDDDA ได้แก่ AD830 และ LT1228

4.1 การทดสอบสมรรถนะวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยการจำลองผ่านโปรแกรม PSPICE

ในการหาค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ตามภาพที่ 3.6 จะทดสอบหาค่าด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้กระแสไบอัส (I_B) เป็น 100 μ A และแหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจรเป็น ± 5 V จะได้ค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA

ขั้วของอุปกรณ์	ค่าความต้านทานแฝง	ค่าความจุแฝง
Z	383.009 k Ω	7.14725 pF
P	382.846 k Ω	1.99998 pF
N	384.261 k Ω	1.44183 pF
W	7.8168 m Ω	-

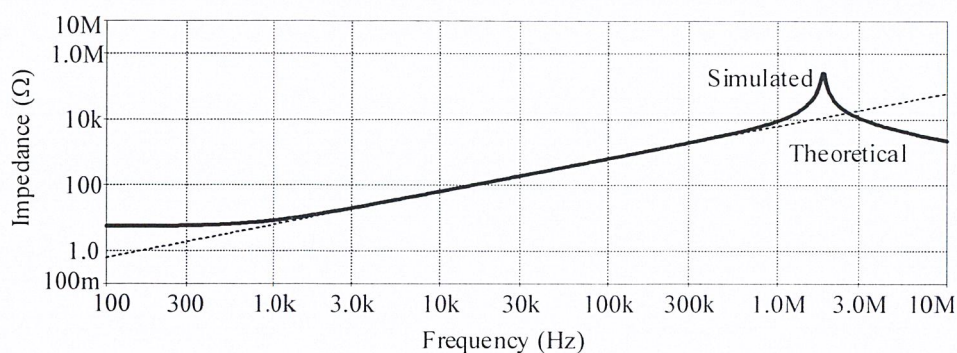
4.1.1 ผลการทดสอบสมรรถนะวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

ในการทดสอบสมรรถนะวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม PSPICE จะใช้โครงสร้างของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำจากในภาพที่ 3.5 และค่าของอุปกรณ์ในตารางที่ 4.2 จะได้ผลการทดสอบสมรรถนะวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเทียบกับตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติขนาด 1 mH ที่ได้จากคำนวณจากสมการที่ (3.23)

ตารางที่ 4.2 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

อุปกรณ์	ค่าของอุปกรณ์
ตัวเก็บประจุ (C)	1 nF
ตัวต้านทาน (R)	1 k Ω
แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจร	± 5 V
กระแสไบอัส (I_B)	100 μ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำในทางอุดมคติ

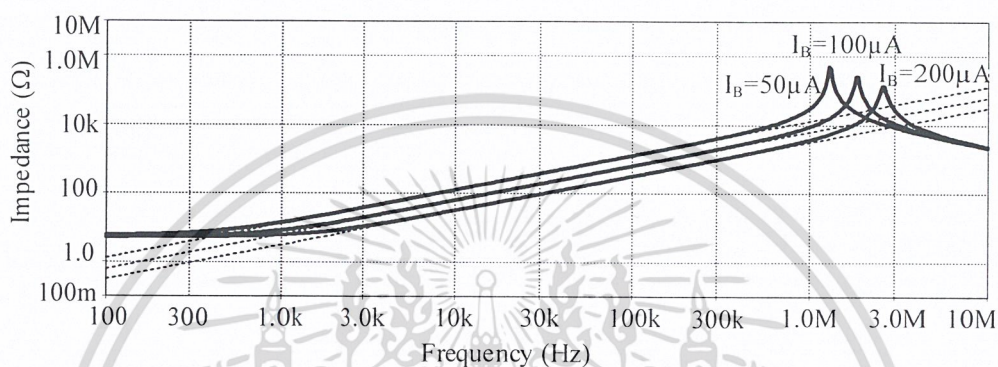
ภาพที่ 4.1 เป็นภาพที่แสดงผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำเทียบกับการทำงานของตัวเหนี่ยวนำในทางอุดมคติ พบว่าวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำให้ค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 1.02 mH ในช่วงความถี่ 3 kHz – 400 kHz โดยพบว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าความเหนี่ยวนำในอุดมคติไปประมาณ 2.07% ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากค่าความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ในสมการที่ (3.40) และความผิดพลาดจากอัตราการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.55) นอกจากนี้ในช่วงความถี่ต่ำวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำยังได้รับผลกระทบจากความต้านทานแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.39) เนื่องจากคุณสมบัติของตัวต้านทานคือความถี่จะไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานส่งผลให้ในช่วงความถี่ต่ำค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำไม่ลดลง ในขณะที่ช่วงความถี่สูงวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำจะได้รับผลกระทบจากความจุแฝงของขั้ว z ดังสมการที่ (3.39) โดยคุณสมบัติของตัวเก็บประจุคือค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะแปรผกผันกับความถี่ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น

4.1.2 ผลการทดสอบสมรรถนะวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำเมื่อมีการควบคุมด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

ในการทดสอบสมรรถนะวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำที่ถูกควบคุมด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม PSPICE ใช้โครงสร้างวงจรจากในภาพที่ 3.5 และค่าของอุปกรณ์ในตารางที่ 4.3 จะได้ผลการทดสอบสมรรถนะวงจรเรโซแนนซ์แบบตัวเหนี่ยวนำเทียบกับตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติขนาด 2 mH, 1 mH, 0.5 mH ที่ได้จากคำนวณตามจากสมการที่ (3.23) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเมื่อเปลี่ยนค่า I_B

อุปกรณ์	ค่าของอุปกรณ์
ตัวเก็บประจุ (C)	1 nF
ตัวต้านทาน (R)	1 k Ω
แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจร	± 5 V
กระแสไบอัส (I_B)	50 μ A, 100 μ A, 200 μ A



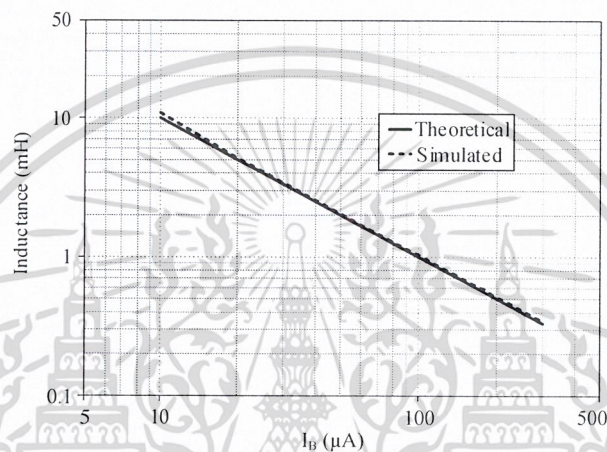
ภาพที่ 4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนค่า I_B

ภาพที่ 4.2 เป็นภาพที่แสดงผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเทียบกับการทำงานของตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติ พบว่าวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่จ่ายกระแส 50 μ A จะได้ค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 2.03 mH ในช่วงความถี่ใช้งานประมาณ 1-300 kHz เมื่อเทียบกับตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติขนาด 2 mH พบว่าค่าความเหนี่ยวนำมีความคลาดเคลื่อนไปประมาณ 1.5% ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากค่าความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.40) และความผิดพลาดจากอัตราการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.55) นอกจากนี้ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1 kHz วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำยังได้รับผลกระทบจากความต้านทานแฝงของอุปกรณ์ ดังสมการที่ (3.39) และในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 300 kHz วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำยังได้รับผลกระทบจากความจุแฝงของขั้ว z ดังสมการที่ (3.39) ในส่วนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่จ่ายกระแส 100 μ A ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1 แล้ว ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายกระแสเป็น 200 μ A จะได้ค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 0.497 mH โดยช่วงความถี่ใช้งานมีค่าประมาณ 8-500 kHz เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติขนาด 0.5 mH พบว่าค่าความเหนี่ยวนำมีความคลาดเคลื่อนไปประมาณ 0.6% ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากค่าความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.40) และความผิดพลาดจากอัตราการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.55)

จากผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนค่า I_B พบว่าในการเปลี่ยนค่า I_B ไม่เพียงแต่เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์เท่านั้นแต่ยังเปลี่ยนช่วงคลื่นความถี่ใช้งาน

อีกด้วยโดยยิ่งค่า I_B มากช่วงความถี่ใช้งานก็จะมากตามไปด้วย อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นว่าในช่วงความถี่ต่ำวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำยังได้รับผลกระทบจากความต้านทานแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.39) และในขณะที่ช่วงความถี่สูงวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำจะได้รับผลกระทบจากค่าความจุแฝงของขั้ว z ดังสมการที่ (3.39)

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความสามารถในการปรับค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (3.23) เทียบกับค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรม PSPICE ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการจำลอง

ภาพที่ 4.3 เป็นภาพที่แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณในอุดมคติตามสมการที่ (3.23) กับค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรม PSPICE โดยในการทดสอบมีการปรับค่าของกระแสไบอัส 10-300 μA พบว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE มีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 3% สาเหตุของความคลาดเคลื่อนเกิดจากความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.38) และความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.52) เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ VDDDA นี้เองที่ส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำไม่ตรงกับค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณ

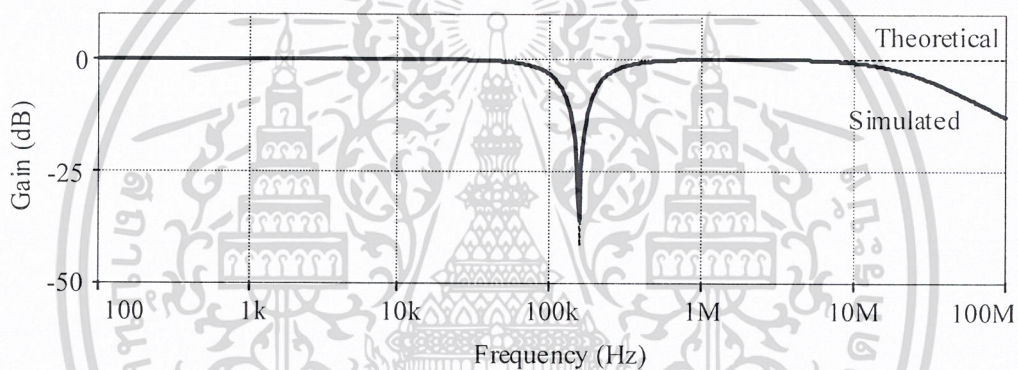
จากผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถยืนยันได้ว่าวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ดังสมการที่ (3.23)

4.1.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรประยุกต์จากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

วงจรกรองกำจัดแถบความถี่อันดับที่สอง (second order band stop filter) เป็นวงจรประยุกต์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้โครงสร้างวงจรกรองกำจัดแถบความถี่จากภาพที่ 3.11 และค่าของอุปกรณ์ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรกรองกำจัดแถบความถี่

อุปกรณ์	ค่าของอุปกรณ์
ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2)	1 nF , 1nF
ตัวต้านทาน (R, R_S)	1 k Ω , 1 k Ω
แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจร	± 5 V
กระแสไบอัส (I_B)	100 μ A



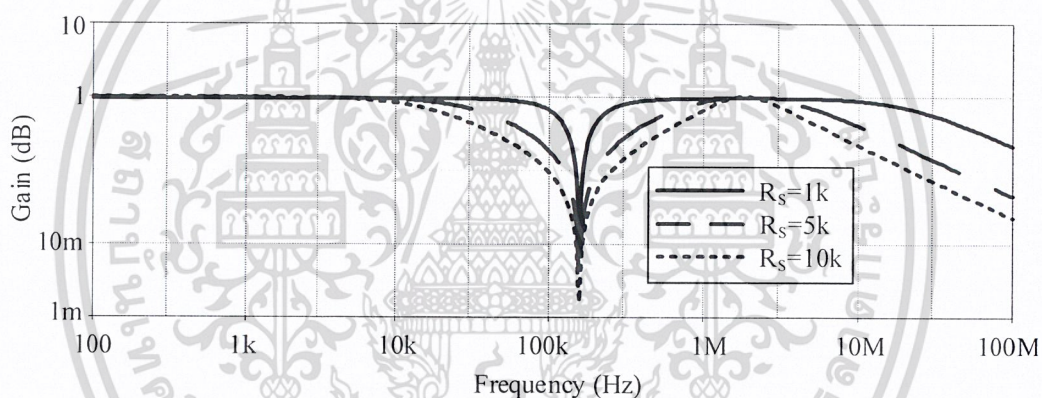
ภาพที่ 4.4 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่

ภาพที่ 4.4 เป็นภาพที่แสดงผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่เมื่อใช้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเทียบกับวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำพบว่าวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ที่ใช้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำมีค่า f_0 ประมาณ 159.21 kHz และ Q มีค่าประมาณเท่ากับ 1.039 ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่า f_0 และค่า Q มีความคลาดเคลื่อนไปจากวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในทางอุดมคติที่มีค่า f_0 เท่ากับ 157.234 kHz ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไปประมาณ 1.24% และ Q จากสมการที่ (3.60) มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งมี ความคลาดเคลื่อนไปประมาณ 3.9% สาเหตุของความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.39) และความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.55) นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความถี่สูงผลการตอบสนองของวงจรกำจัดแถบความถี่จะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นเนื่องจากได้รับผลของความจุแฝงที่ขั้ว z ดังสมการที่ (3.39)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.60) พบว่าสามารถปรับค่าของปัจจัยคุณภาพ (Q) ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อค่าของความถี่ธรรมชาติด้วยการปรับค่า R_S เพื่อยืนยันผลตามสมการที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรรองกำจัดแถบความถี่โดยใช้โครงสร้างวงจรรองกำจัดแถบความถี่ในภาพที่ 3.11 และค่าของอุปกรณ์ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรองกำจัดแถบความถี่เมื่อปรับค่า R_S

อุปกรณ์	ค่าของอุปกรณ์
ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2)	1 nF, 1nF
ตัวต้านทาน (R)	1 k Ω
ตัวต้านทาน (R_S)	1 k Ω , 5 k Ω , 10 k Ω
แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจร	± 5 V
กระแสไบอัส (I_B)	100 μ A



ภาพที่ 4.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองกำจัดแถบความถี่เมื่อเปลี่ยนค่า R_S

ภาพที่ 4.5 เป็นภาพที่แสดงผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรรองกำจัดแถบความถี่ที่ใช้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเมื่อมีการปรับค่า R_S พบว่าวงจรรองกำจัดแถบความถี่ที่มีค่า R_S ที่ต่างกันจะให้ค่า Q ที่ต่างกันออกไปโดยเมื่อ R_S มีค่า 1 k Ω , 5 k Ω , 10 k Ω จะให้ค่า Q ออกมาเป็น 1.039, 0.2336, 0.1522 ตามลำดับ และค่า Q ของวงจรรองกำจัดแถบความถี่ในอุดมคติจากสมการที่ (3.60) คือ 1, 0.2, 0.1 จากผลการทดสอบดังกล่าวพบว่าค่า Q มีความคลาดเคลื่อน 3.9%, 16.8%, 52.17% ตามลำดับ สาเหตุของความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.39) รวมถึงความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.55) นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นอีกว่าเมื่อเพิ่มค่าของ R_S ให้มากขึ้นค่าความผิดพลาดของวงจรรองกำจัดแถบความถี่ก็จะมากตามไปด้วยรวมถึงช่วงความถี่ใช้งานสูงสุดก็จะต่ำลงไปด้วย ถ้าไม่ต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนมากเกินไป 10% ไม่ควรเพิ่มค่า R_S มากเกินกว่า 3 k Ω เนื่องจากค่า Q ที่ได้จาก R_S เป็น 3 k Ω มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 9.55%

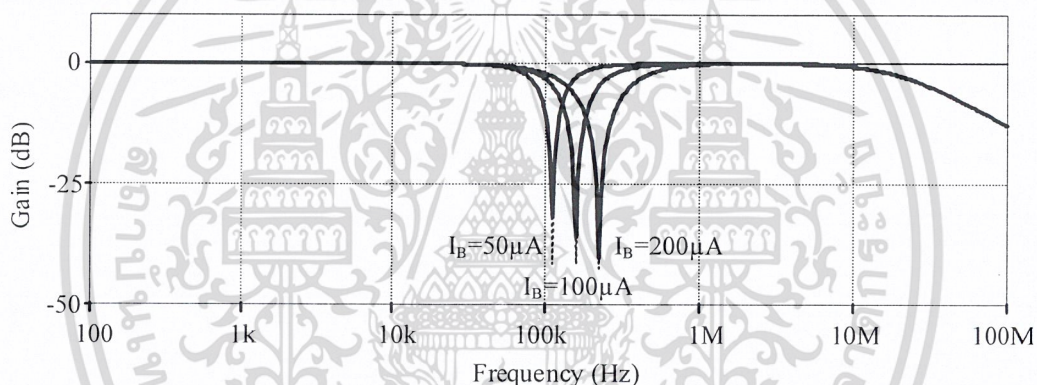
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรประยุกต์จากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเมื่อมีการควบคุมด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

จากสมการที่ (3.59) และสมการที่ (3.60) แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับค่าความถี่ธรรมชาติและปัจจัยคุณภาพของวงจรรองรับกำจัดแถบความถี่ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ จากโครงสร้างในภาพที่ 3.11 และค่าของอุปกรณ์ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรองรับกำจัดแถบความถี่เมื่อเปลี่ยนค่า I_B

อุปกรณ์	ค่าของอุปกรณ์
ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2)	1 nF , 1nF
ตัวต้านทาน (R, R_S)	1 k Ω , 1 k Ω
แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจร	± 5 V
กระแสไบอัส (I_B)	50 μ A, 100 μ A, 200 μ A



ภาพที่ 4.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองรับกำจัดแถบความถี่เมื่อเปลี่ยนค่า I_B

ภาพที่ 4.6 เป็นภาพที่แสดงผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรรองรับกำจัดแถบความถี่เมื่อใช้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเทียบกับวงจรรองรับกำจัดแถบความถี่เมื่อใช้ตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติและมีการควบคุมค่าความเหนี่ยวนำทางอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าวงจรรองรับกำจัดแถบความถี่ที่ใช้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายกระแสไบอัสให้ 50 μ A จะได้ค่า f_0 ประมาณ 111.16 kHz และ Q มีค่าประมาณ 1.442 โดยในส่วนของวงจรรองรับกำจัดแถบความถี่ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติเมื่อจ่ายกระแสไบอัสให้ 50 μ A จะได้ค่า f_0 เท่ากับ 112.55 kHz และ Q มีค่าเท่ากับ 1.414 จากผลที่ได้พบว่าค่าของ f_0 และ Q มีความคลาดเคลื่อนไปประมาณ 1.24% และ 1.98% ตามลำดับ โดยสาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมาจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ VDDDA ได้แก่ ความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.39) รวมถึงความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.55) ในส่วนของวงจรรองรับกำจัดแถบความถี่ที่จ่ายกระแสไบอัส 100 μ A ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1.3 แล้ว และในส่วนของวงจรรองรับกำจัดแถบความถี่ที่ใช้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายกระแสไบอัสเป็น 200 μ A จะได้ค่า f_0 ประมาณ 222.4 kHz

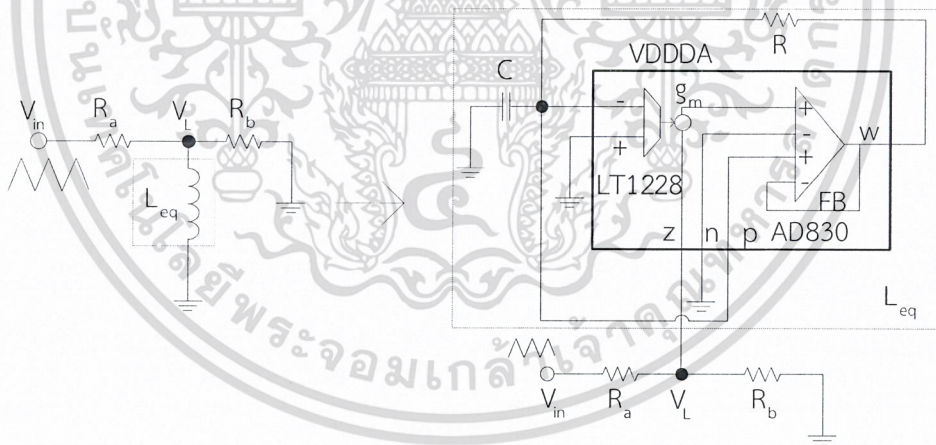
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ Q มีค่าประมาณ 0.7327 โดยในส่วนของวงจรรองกำลังจัดแถบความถี่ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติ เมื่อจ่ายกระแสไบอัสให้ $200 \mu\text{A}$ จะได้ค่า f_0 เท่ากับ 255.06 kHz และ Q มีค่าเท่ากับ 0.7071 ซึ่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของ f_0 เท่ากับ 12.8% และของ Q มีค่าเท่ากับ 3.62% โดยสาเหตุของความคลาดเคลื่อนเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ VDDDA ได้แก่ ความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.39) รวมถึงความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.55) จากผลการทดสอบข้างต้นจะพบว่าการปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์จะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติและปัจจัยคุณภาพของวงจรรองกำลังจัดแถบความถี่เปลี่ยนไปโดยยิ่งค่าของกระแสไบอัสมากขึ้นค่าของความถี่ธรรมชาติและปัจจัยคุณภาพก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.2 การทดสอบสมรรถนะวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยการต่อวงจรจริง

4.2.1 ผลการทดสอบสมรรถนะวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยการต่อวงจรจริง

การทดสอบสมรรถนะของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในการต่อวงจรจริง ผู้วิจัยได้นำวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำมาต่อร่วมกับตัวต้านทาน 2 ตัว คือ R_a , R_b โดยป้อนสัญญาณสามเหลี่ยมเข้าทาง R_a ดังโครงสร้างในภาพที่ 4.7 และถ้าวงจรรวมวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องสัญญาณที่ได้จาก V_L จะต้องเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม

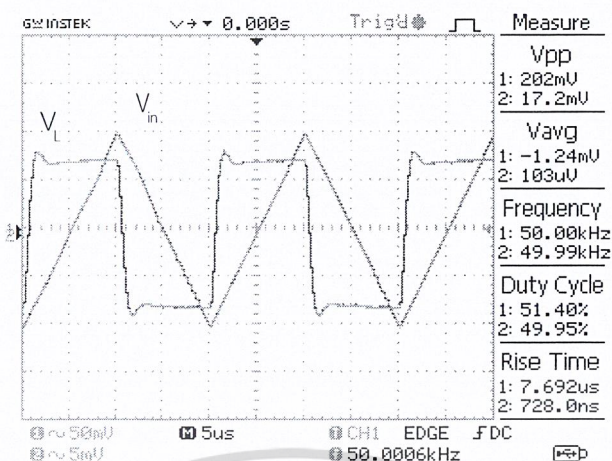


ภาพที่ 4.7 โครงสร้างของวงจรที่ใช้เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 4.7 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรวมตัวเหนี่ยวนำ

อุปกรณ์	ค่าของอุปกรณ์
ตัวเก็บประจุ (C)	1 nF
ตัวต้านทาน (R_a, R_b, R)	2 k Ω , 10 k Ω , 1 k Ω
แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจร	$\pm 5 \text{ V}$
กระแสไบอัส (I_B)	100 μA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 ผลตอบสนองของวงจรที่ใช้เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

ภาพที่ 4.8 เป็นภาพที่แสดงถึงผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรโดยสัญญาณเส้น V_{in} เป็นคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมที่ถูกป้อนเข้าที่ขาของ R_a และสัญญาณเส้น V_L เป็นคลื่นสัญญาณที่ถูกวัดที่ขาอีกข้างของ R_a ซึ่งคลื่นสัญญาณที่ได้เป็นคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมโดยความถี่ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะวงจรเป็น 50 kHz จากผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรแสดงให้เห็นว่าวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำสามารถทำงานได้เหมือนตัวเหนี่ยวนำตามสมการที่ (3.23)

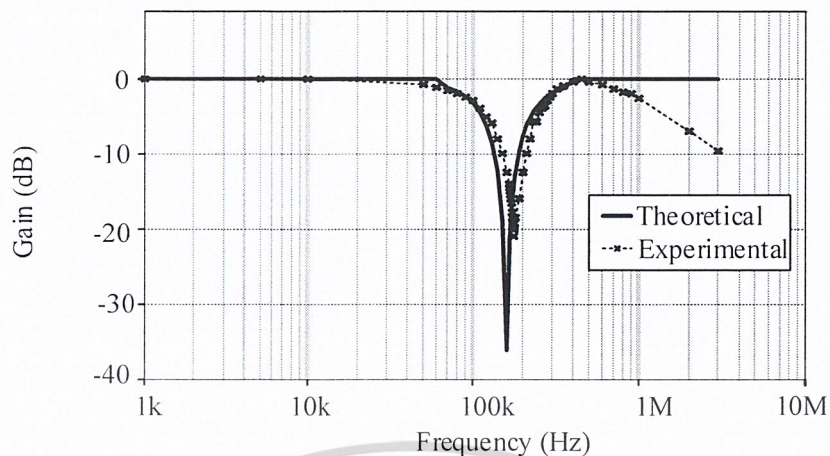
4.2.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรประยุกต์จากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเทียบกับวงจรประยุกต์จากตัวเหนี่ยวนำโดยการต่อวงจรจริง

วงจรรอกงำจัดแถบความถี่อันดับที่สอง เป็นวงจรประยุกต์ที่ใช้ในการทดสอบจากโครงสร้างในภาพที่ 3.11 และค่าของอุปกรณ์ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรอกงำจัดแถบความถี่โดยการต่อวงจรจริง

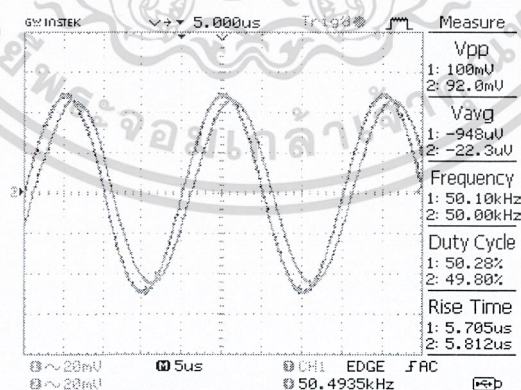
อุปกรณ์	ค่าของอุปกรณ์
ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2)	1 nF , 1nF
ตัวต้านทาน (R, R_S)	1 kΩ , 1 kΩ
แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจร	±5 V
กระแสไบอัส (I_b)	100 μA

จากโครงสร้างของวงจรกำจัดแถบความถี่อันดับที่สอง ในภาพที่ 3.11 และค่าของอุปกรณ์ในตารางที่ 4.8 จะได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 4.9 และ ภาพที่ 4.10



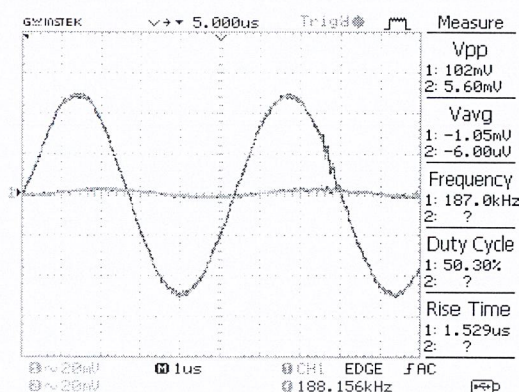
ภาพที่ 4.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่เมื่อต่อวงจรจริง

ภาพที่ 4.9 เป็นภาพที่แสดงผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่เมื่อใช้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเทียบกับวงจรกรองกำจัดแถบความถี่เมื่อใช้ตัวเหนี่ยวนำพบว่าวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ที่ใช้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำสามารถทำงานได้เทียบเท่ากับวงจรประยุกต์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในช่วงความถี่ที่ 1-500 kHz โดย f_0 ของวงจรที่ได้จากการทดสอบมีค่า 188 kHz ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไปจากวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในทางอุดมคติที่มีค่า f_0 เท่ากับ 157.234 kHz หรือมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 19.57% ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.39) รวมถึงความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.55) นอกจากนี้ในช่วงความถี่ที่มากกว่า 500 kHz ผลการตอบสนองของวงจรกำจัดแถบความถี่จะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นเนื่องจากได้รับผลของความจุแฝงที่ขั้ว z ดังสมการที่ (3.39)

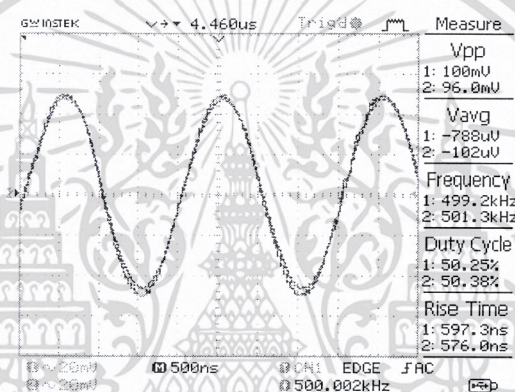


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.10 ผลการตอบสนองสัญญาณที่จุด V_{in} และ V_o ของวงจรกรองกำเนิดแถบความถี่เมื่อต่อวงจรจริงโดย (ก) $f = 50$ kHz, (ข) $f = 188$ kHz และ (ค) $f = 500$ kHz

ภาพที่ 4.10 แสดงผลการตอบสนองสัญญาณที่จุด V_{in} และ V_o ของวงจรกรองกำเนิดแถบความถี่ พบว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามทฤษฎีโดยในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 50 kHz และในช่วงความถี่ที่มากกว่า 500 kHz จะให้แรงดันที่จุด V_{in} และ V_o เท่ากัน แต่เมื่อความถี่เท่ากับ f_0 หรือความถี่เป็น 188 kHz แรงดันที่จุด V_o จะน้อยกว่าแรงดันที่จุด V_{in}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปและอภิปรายผล รวมถึงข้อเสนอแนะของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยอุปกรณ์แอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต หรือ Voltage Differencing Differential Difference Amplifier (VDDDA) โดยวงจรที่ออกแบบจะใช้คุณสมบัติในการปรับค่าความนำถ่ายโอนของ VDDDA มาใช้เพื่อให้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำสามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์วงจรเพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพด้วยการจำลองโดยโปรแกรม PSPICE และต่อวงจรจริง นอกจากนี้ยังมีกรนำเสนอวงจรรองกำจัดแถบความถี่ที่ใช่วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำไปประยุกต์ใช้งานอีกด้วย

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ VDDDA วงจรดังกล่าวใช้เป็นอุปกรณ์แอกทีฟเพียงตัวเดียวคือ VDDDA โดยนำอุปกรณ์แอกทีฟมาต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ 2 ตัวคือ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่สังเคราะห์ได้สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับกระแสที่ไหลเข้าวงจร

การวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์วงจรในกรณีอุดมคติ และวิเคราะห์วงจรในกรณีที่ไม่ได้เป็นอุดมคติ โดยในส่วนของ การวิเคราะห์วงจรประยุกต์จะถุกวิเคราะห์เฉพาะในกรณีอุดมคติเท่านั้น

ในการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบด้วยการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม PSPICE และการทดสอบด้วยการต่อวงจรจริง โดยการทดสอบจะใช้ IC จำนวน 2 ตัวเป็นโครงสร้างของอุปกรณ์ VDDDA ได้แก่ AD830 และ LT1228 นอกจากนี้ในวงจรประยุกต์ก็ถูกทดสอบประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน

5.2 อภิปรายผลงานวิจัย

จากโครงสร้างของวงจรในกรอบแนวคิดจากบทที่ 1 และทฤษฎีในบทที่ 2 นำไปสู่การสังเคราะห์และแลวิเคราะห์วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในบทที่ 3 ซึ่งได้มีการกล่าวถึงการวิเคราะห์ในกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์โดยสมการของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำมีค่าความจุแฝงของตัวต้านทานและค่าความจุแฝงของตัวเก็บประจุอยู่ด้วย ส่งผลให้ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรในบทที่ 4 ไม่เป็นไปตามสมการค่าความเหนี่ยวนำทั้งหมดโดย พบว่าวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถให้ค่าความเหนี่ยวนำที่ใกล้เคียงกับค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติได้จะอยู่ในช่วงความถี่ 3 kHz – 400 kHz (ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำขนาด 1 mH) เนื่องจากผลกระทบของความต้านทานและความจุแฝงของอุปกรณ์โดยในช่วงที่ความถี่ต่ำกว่า 3 kHz จะเป็นผลจากความต้านทานแฝงของอุปกรณ์ VDDDA ดังสมการที่ (3.39) และในช่วงที่ความถี่มากกว่า 400 kHz จะเป็นผลจากค่าความจุแฝงของขั้ว z ดังสมการที่ (3.39) นอกจากนี้ในบทที่ 3 ยังได้นำเสนอวงจรกรองกำจัดแถบความถี่อันดับที่สอง เพื่อเป็นวงจรประยุกต์จากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำและมีการทดสอบสมรรถนะในบทที่ 4 เพื่อยืนยันความสามารถในการทำงานของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอีกด้วย โดยผลการทดสอบของวงจรประยุกต์สามารถทำงานได้เทียบเท่ากับวงจรประยุกต์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติในช่วงความถี่ 100-8M Hz (ในกรณีที่เป็นตัวเหนี่ยวนำขนาด 1 mH) โดยในช่วงความถี่ที่มากกว่า 8 MHz ได้รับผลจากค่าความจุแฝงของตัวเก็บประจุ

นอกจากนี้แล้วผู้วิจัยได้เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ถูกนำเสนอโดยผู้วิจัยท่านอื่นๆ แต่ละงานวิจัยได้มีการเลือกใช้อุปกรณ์แอคทีฟที่ต่างกันออกไป มีการออกแบบโครงสร้างของวงจรเพื่อรองรับการทำงาน โดยในบางวงจรมีการใช้อุปกรณ์แอคทีฟมากกว่า 1 ตัว บางวงจรใช้อุปกรณ์พาสซีฟมากกว่า 2 ตัว บางวงจรต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์ และบางวงจรไม่สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Psychalinos and Spanidou 2006	CA	2	1	√	√	×	±1.5 V	2.7 mW	-
Alpaslan and Yuce 2016	VCDO-CF และ VCVF	2	3	√	×	×	±1.25 V	-	-
Ferri, et. al. 2007	CCII	2	3	√	×	×	-	-	0.1 Hz - 1 kHz
Herencsar, et. al. 2010	CFTA	2	1	√	√	×	±1.85 V	10.6 mW	20 kHz - 10 MHz
Ghosh and Paul 2014	OTRA	1	5	√	×	√	±1.5 V	12 mW	100 Hz - 400 kHz

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Kaçar 2010	FDCCII	1	3	√*	×	×	±1.5 V	-	1 kHz - 10 MHz
Pathak, et. al. 2015	CDBA	1	3	√	×	√	±12 V	-	-
Alpaslan and Yuce 2015	CFOA	1	3	√	×	√	±0.75 V	0.89 mW	300 kHz - 30 MHz
Kumar and Senani 2010	PFTFN	1	5	√	×	×	-	-	100 kHz - 1 MHz
Kacar and Yesil 2010	DXCCII	1	3	√*	×	×	±1.5 V	-	-
Myderrizi, et. al. 2011	DXCCII	1	3,4	√*	×	×	±1.65 V	4.46 mW	30 kHz - 30 MHz
Hong 2010	DVCC	2	3	√	×	×	±1.25 V	-	-
Gupta, et. al. 2012	OTRA และ OTA	2	4	×	×	√	±5 V	-	-
Ibrahim, et. al. 2011	MDO-DDCC	1	3	×	×	×	±1.5 V	-	9 kHz - 60 MHz
Pandey, et. al. 2012	OTRA	1	5	×	×	√	±5 V	0.26 W	200 Hz - 2.5 MHz
Jaikla and Siripruchyanun 2006	CC-CFA	2	1	√	×	×	±1.5 V	0.356 mW	100 Hz - 1 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Jantakun and Siripruchyanun 2010	DVCCCTA	1	1	√	√	×	±1.5 V	1.48 mW	8 kHz - 1 MHz
Prasad, et. al. 2011	VD-DIBA	2	1	√	√	×	±12 V	62.5 mW	1 Hz - 1 MHz
Yuce, et. al. 2015	DDCC	2	3	√	×	×	±0.75 V	6.9 mW	100 Hz - 50 kHz
Senani and Bhaskar 2012	CFOA	2	5	×	×	√	±15 V	-	-
Said, et. al. 2015	CFOA	3	3	√	×	×	±1.5 V	8.42 mW	-
Channumsin, et. al. 2015	VDBA	2	1	√	√	×	±1 V	-	2 kHz - 100 kHz
Koomgaew, et. al. 2009	OTA	3	1	√	√	√	-	-	-
Sagbas, et. al. 2009	DO-CCII และ OTA	2	1	√	√	×	±2.5 V	-	10 kHz - 300 kHz
Bhaskar and Senani 2013	CFOA	2	3	√	×	√	-	-	-
Arslan, et. al. 2012	CCI	1,2	5,3	√*	×	×	±1.65 V	-	-
Bandyopadhyay, et. al. 2005	CFA	2	3	√	×	√	±10 V	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
งานวิจัยชิ้นนี้2019	VDDDA	1	2	√	√	√	±5 V	1.96 W	3 kHz - 400 kHz

* เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวงจรเลียนแบบหลายวงจรและบางวงจรต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์

เมื่อ A คือ ชื่อผู้วิจัยและปีที่นำเสนอ

B คือ อุปกรณ์แอกทีฟ

C คือ จำนวนอุปกรณ์แอกทีฟที่ใช้

D คือ จำนวนอุปกรณ์พาสซีฟที่ใช้

E คือ ไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์

F คือ สามารถปรับความถี่ความถี่ได้ด้วยอิเล็กทรอนิกส์

G คือ มีผลการทดลองจริง

H คือ แหล่งจ่ายแรงดันเลี้ยงวงจร

I คือ กำลังงาน

J คือ ช่วงความถี่

จากตารางที่ 5.1 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยชิ้นนี้กับงานวิจัยอื่นๆ พบว่างานวิจัยชิ้นนี้มีข้อดีต่างๆดังนี้

- ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ 1 ตัว
- ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 2 ตัวคือ ตัวเก็บประจุ 1 ตัวและตัวต้านทาน 1 ตัว
- วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำไม่ต้องการความเข้ากันของอุปกรณ์
- วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำสามารถปรับค่าความถี่ความถี่ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

เพื่อการพัฒนาและวิจัยในอนาคตผู้วิจัยขอเสนอความคิดเห็นเกี่ยวกับข้อจำกัดของงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้และความคิดเห็นเกี่ยวกับการพัฒนาในอนาคต

5.3.1 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่สังเคราะห์ในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ซึ่งสามารถพัฒนางจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวเหนี่ยวนำแบบลอยได้โดยใช้อุปกรณ์ VDDDA จำนวน 2 ตัว

5.3.2 ตัวต้านทานที่ใช้ต่อกับวงจรเลียนแบบสามารถเปลี่ยนไปใช้ OTA ได้โดยจะส่งผลให้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำสามารถปรับค่าความถี่ความถี่ได้ด้วยการปรับกระแสไบอัสสองตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- สมคิด แซ่โจ้ว. 2546. วงจรเลียนแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบซีมอสในย่านความถี่สูง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุรศักดิ์ สังข์แย้ม. 2559. วงจรและออกแบบวงจรของความถี่หลายหน้าที่โหมดแรงดันควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ แบบห้าอินพุท-หนึ่งเอาต์พุทที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงและเอาต์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำ. ครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เอกชัย แสงอินทร์. 2554. ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor). ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Alpaslan H, Yuce E. 2015. Inverting CFOA based lossless and lossy grounded inductor simulators. Circuits Systems and Signal Processing: 3081-3100.
- Alpaslan H, Yuce E. 2016. New CMOS based current follower and its applications to inductor simulator and band-pass filter. Indian Journal of Pure & Applied Physics: 511-516.
- Arslan E, Metin B, Herencsar N, Koton J, Morgul A, Cicekoglul O. 2012. High Performance Wideband CMOS CCI and its Application in Inductance Simulator Design. Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE): 21-26.
- Auttaphut P. 2015. Active parallel-resistor-inductor with electronic controllability for analog signal processing. Far East journal of Electronics and Communications: 93-103.
- Bandyopadhyay T. K, Nagaria R. K, Sanyal S. K, Nandi R. 2005. Lossless Inductor using Current Feedback Amplifier. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): 689-692.
- Bhaskar D. R, Senani R. 2013. Simulation of a floating inductance: a new two - cfoa - based configuration. Fifth International Conference on Computational Intelligence: 381-383.
- Channumsin O, Pimpol J, Thongsopa C, Tangsrirat W. 2015. VDBA-based Floating Inductance Simulator with a Grounded Capacitor. International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE): 144-117.
- Ferri G, Guerrini N. C, Romanato R, Scotti G, Trifiletti A. 2007. CCII-based high-valued inductance simulators with minimum number of active elements. European Conference on Circuit Theory and Design: 440-443.

- Ghosh M, Paul S. K. 2014. Design of lossless grounded negative inductance simulator using single operational transresistance amplifier. *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Électrotechnique et Énergétique*: 381-390.
- Gupta A, Senani R, Bhaskar D.R, Singh A.K. 2012. OTRA-based Grounded-FDNR and Grounded-Inductance Simulators and Their Applications. *Circuits Syst Signal Process*: 489–499.
- Herencsar N, Koton J, Vrba K. 2010. CFTA-based active-C grounded positive inductance simulator and its application. *ElektrorevueEng*: 24-27.
- Herencsar N, Sotner R, Metin B, Koton J, Vrba K. 2013. VDDDA – New ‘Voltage Differencing’ Device for Analog Signal Processing. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*: 17-20.
- Hornig J. W. 2010. Lossless inductance simulation and voltage-mode universal biquadratic filter with one input and five outputs using DVCCs. *Analog Integr Circ Sig Process*: 407-413.
- Ibrahim M. A, Minaei S, Yuce E, Herencsar N, Koton J. 2011. Lossless Grounded Inductance Simulation Using Only One Modified Dual Output DDCC. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*: 261-264.
- Jantakun A, Siripruchyanun M. 2010. Single element based electronically controllable floating positive and negative inductance simulators and its applications. *JICTEE-2010 Luang Prabang*: 231-235.
- Kacar F, Yesil A. 2010. Novel grounded parallel inductance simulators realization using a minimum number of active and passive components. *Microelectronics Journal*: 632-638.
- Kaçar F. 2010. New lossless inductance simulators realization using a minimum active and passive components. *Microelectronics Journal*: 109-113.
- Koomgaew C, Petchmaneelumka W, Riewruja V. 2009. OTA-based Floating Inductance Simulator. *ICROS-SICE International Joint Conference*: 857-860.
- Koton J, Herencsar N, Kamil V, Metin B. 2014. Voltage-mode multifunction filter with mutually independent Q and ω_0 control feature using VDDDA. *Analog Integr Circ Sig Process*: 53-60.
- Kumar P, Senani R. 2010. New grounded simulated inductance circuit using a single PFTFN. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*: 105-112.
- Myderrizi I, Minaei S, Yuce E. 2011. DXCCII-based grounded inductance simulators and filter applications. *Microelectronics Journal*: 1074-1081.

- Pandey R, Pandey N, Paul S.K, Singh A, Sriram B, Trivedi K. 2012. **Novel grounded inductance simulator using single OTRA**. International Journal of Circuit Theory and Applications: 1069-1079.
- Pathak J. K, Singh A. K, Senani R. 2015. **New canonic lossy inductor using a single CDBA and its application**. International Journal of Electronics: 1-13.
- Prasad D, Bhaskar D. R, Pushkar K.L. 2011. **Realization of New Electronically Controllable Grounded and Floating Simulated Inductance Circuits Using Voltage Differencing Differential Input Buffered Amplifiers**. Hindawi Publishing Corporation Active and Passive Electronic Components: 1-8.
- Psychalinos C, Spanidou A. 2006. **Current amplifier based grounded and floating inductance simulators**. AEU - International Journal of Electronics and Communications: 168 – 171.
- Sagbas M, Ayten U. E, Sedef H, Koksal M. 2009. **Electronically tunable floating inductance simulator**. AEU - International Journal of Electronics and Communications: 423-427.
- Said L. A, Madian A. H, Ismail M. H, Soliman A. M. 2014. **Current Feedback Operational Amplifier (CFOA) Based Programmable Lossless Floating Inductor Realization**. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Sangyaem S, Siripongdee S, Jaikla W. 2016. **Electronically controllable three-inputs single- output voltage-mode filter using single VDDDA**. Smart Info-Media Systems in Asia: 274-277.
- Senani R, Bhaskar D.R. 2012. **New lossy/loss-less synthetic floating inductance configuration realized with only two CFOAs**. Analog Integrated Circuits and Signal Processing: 981-987.
- Siripongdee S, Jaikla W. 2015. **Single VDDDA-based voltage-mode multifunction second order filter for analog signal processing**. Signal Processing Computer Networks and Telecommunications: 39-42.
- Srisakultiew S, Silapan P, Siripruchyanun M. 2009. **Novel Floating and Grounded Inductance Simulators Based on CC-CFAs**. The Seventh PSU Engineering Conference: 258-262.
- Tuntrakool S, Kumngern M, Sotner R, Herencsar N, Suwanjan P, Jaikla W. 2017. **High input impedance voltage-mode universal filter and its modification as quadrature oscillator using VDDDAs**. Indian Journal of Pure & Applied Physics: 324-332.

Yuce E, Tokat S, Alpaslan H. 2015. Grounded capacitor-based new floating inductor simulators and a stability test. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences: 2138-2149.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

