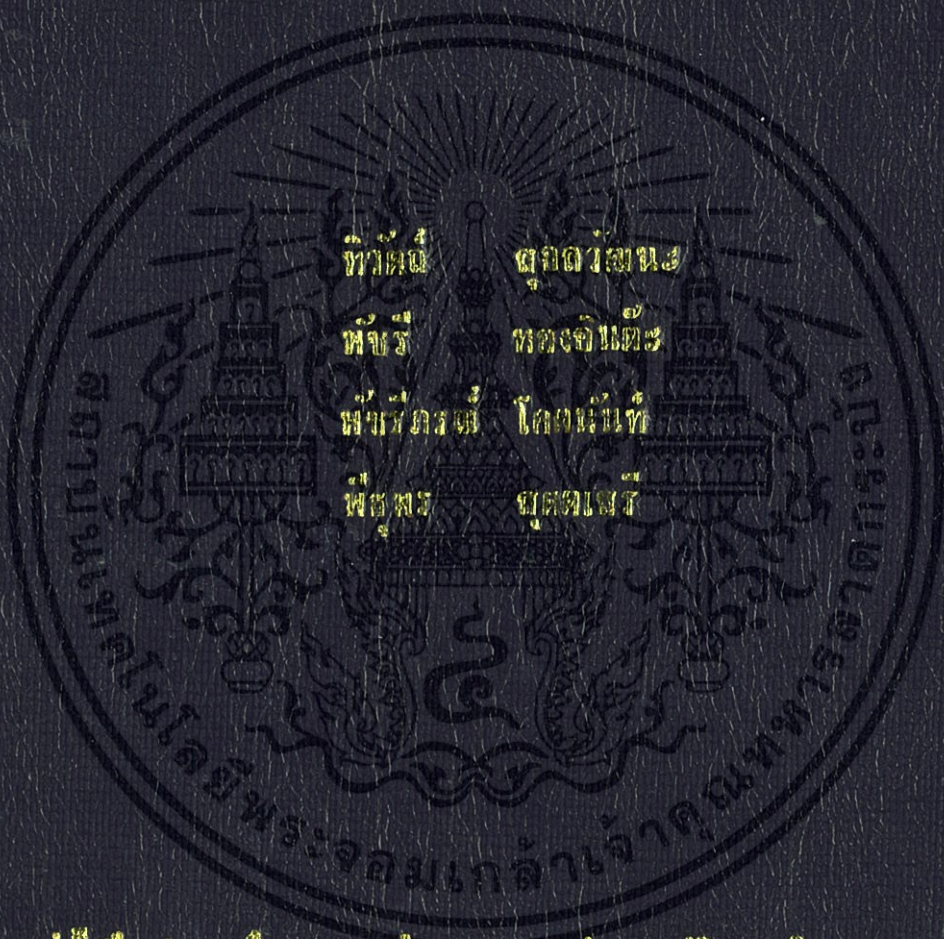


ขดลวดโรกคอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบใช้งานเพื่อวัดกระแสคัมพัทธ์
ROGGWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR
IMPULSE CURRENT MEASUREMENT



ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของวารสารศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรมินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์
ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR
IMPULSE CURRENT MEASUREMENT



โดย
ทิวดี สุกลวัฒน์
พัชร ทองอินตะ
พัชรภรณ์ โคตนันท์
พิรุฬร สุตตเสรี

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR
IMPULSE CURRENT MEASUREMENT



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์
ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR
IMPULSE CURRENT MEASUREMENT



โดย
นาย ทิวต์ สุกวิวัฒนะ
นางสาว พัชรี ทองอินตะ
นางสาว พัชรีภรณ์ โคตนนท์
นางสาว พิรุพร สุดตเสรี

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสฮิมพัลส์

ผู้จัดทำ

1. นาย ทิวต์ สกุวัฒน์นะ
2. นางสาว พัชรี ทองอินดีะ
3. นางสาว พัชรินทร์ โคตนนท์
4. นางสาว พิรุพร สุดตเสรี



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิรุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์

นาย ทิวต์ถ์ สกุวัฒน์นะ
นางสาว พ็ชรี ทองอินตะ
นางสาว พ็ชร์ภรณ์ โคตนันท์
นางสาว พิรุพร สุดตเสรี
ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี เมื่อวงจรอินทิเกรตทำงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีจะได้ระบบวัดที่มีอัตราขยาย 40 กิโลแอมแปร์ ต่อ 4 โวลต์ และมีผลตอบสนองต่อความถี่อยู่ในช่วง 0.5 เฮิร์ต ถึง 3.3 เมกกะเฮิร์ต ทดสอบวงจรอินทิเกรตก่อนนำไปวัดกระแสอิมพัลส์ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีโดยการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้แก่วงจร จากนั้นจึงทดสอบวงจรอินทิเกรตร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีโดยการวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2 มิลลิวินาที เปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลจากการใช้วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานงาน (Passive integrator) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า (Compensated integrator) และวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว (Inverting active integrator) วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดเดียวกันร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี และใช้ผลการวัดกระแสอิมพัลส์รูปเดียวกันโดยใช้ตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ (Shunt resistor) เป็นผลอ้างอิงในการเปรียบเทียบ การทดสอบ พบว่า วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วมีความสามารถในการวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวได้ดีเทียบเท่ากับวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน และสามารถวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวได้ดีกว่าวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า แต่ยังคงดีกว่าการวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวโดยใช้ตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ

ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT MEASUREMENT

Mr. Thiwat Sakulwattana
Ms. Patcharee Thonginta
Ms. Patchareeporn Cotanan
Ms. Pithuporn Suttaseree
Asst.Prof.Dr.Peerawut Yutthagawit Supervisor
Year 2013

ABSTRACT

This paper presents a design and construction of a non-inverting active integrator circuit for impulse currents measurement. When integrator circuit was used with Rogowski coil, measurement system's gain would be 4 kA / 4 V. Frequency response of system would be 0.5 Hz to 3.3 MHz. Integrator circuit was tested before using with Rogowski coil by giving square wave voltage to it. Next, Tested integrator circuit with Rogowski coil by measuring 2 ms long duration impulse current. Compared test results with same impulse current measurement results by using RC integrator, RC compensated integrator and inverting active integrator with Rogowski coil. Same impulse current measurement by using shunt resistor was used to be the reference in comparison. From the experimental results, non-inverting active integrator circuit performance is same as inverting active integrator circuit performance, and both active integrator circuit performances have been better than passive integrator circuit performance and compensated integrator circuit performance but still worse than shunt resistor performance.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการตั้งใจทำงานด้วยความวิริยะอุตสาหะและได้รับการสนับสนุนจากบุคคลทั้งหลาย ซึ่งเป็นการสนับสนุนทั้งทางตรงและทางอ้อม ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างมากและขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ดังกล่าว

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รวมไปถึงคุณปทุมยวีร์ ฉายศิริ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำ และเสนอข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำโครงการนี้

ขอขอบพระคุณคุณบัญญัติ ลีลาจริยกุล นักศึกษาในระดับปริญญาโท ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำโครงการมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่ในกองปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงที่ได้แนะนำแนวการทำปริญญาานิพนธ์ อีกทั้งให้คำแนะนำและคอยให้กำลังใจเสมอมา

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี	5
2.1.1 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี	5
2.2 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	9
2.3 วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว (Non-inverting integrator)	11
2.3.1 วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว	11
2.3.2 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกผ่านวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว	14
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	18
3.1 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกี	18
3.1.1 แกนขดลวด	18
3.1.2 ขดลวด	19
3.1.3 อัตราขยายของระบบวัดและความถี่	20
3.1.4 ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม	21
3.1.5 การพันขดลวดโรกอฟสกี	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรต	23
3.2.1 แนวคิดการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	23
3.2.2 แนวคิดการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว	24
3.2.3 ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว	25
3.3 การประกอบสร้างวงจรอินทิเกรต	26
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	28
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	28
4.2 การทดสอบวงจรอินทิเกรต	28
4.2.1 วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว	29
4.2.2 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	33
4.2.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า	37
4.2.4 การทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว	41
4.3 การทดสอบวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวโดยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจร อินทิเกรตแบบไวงานเปรียบเทียบกับวงจรอินทิเกรตแบบอื่นๆ	45
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	45
4.3.2 วงจรทดสอบจริง	45
4.3.3 วิธีการทดสอบ	46
4.3.4 ผลการทดลอง	46
4.3.4.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2 ms	47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	48
5.1 สรุปผลการทดลอง	48
5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ	48
5.3 แนวทางการพัฒนา	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก	51
ภาคผนวก ก บทความ	52
ภาคผนวก ข Datasheet Op-Amp LF411CN	57
ประวัติผู้เขียน	71

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี	5
2.2	วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกี	7
2.3	ผลตอบสนองทางความถี่ของขดลวดโรกอฟสกี	8
2.4	วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	9
2.5	ผลตอบสนองความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	10
2.6	วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว	12
2.7	วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้วที่ใช้ในทางปฏิบัติ	13
2.8	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว	13
2.9	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว	14
2.10	ผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดโรกอฟสกี	15
2.11	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	15
2.12	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว	16
2.13	ผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว	17
3.1	มิติของแกนขดลวด	18
3.2	การพันขดลวด	19
3.3	การพันขดลวด	23
3.4	วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานแบบ RC	23
3.5	วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว	24
3.6	วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว	25
3.5	วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วที่ทำการประกอบสร้าง	27
4.1	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 150 Hz	29
4.2	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz	29
4.3	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 100 Hz	30
4.4	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 100 Hz	30
4.5	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 10 Hz	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 Hz	31
4.7	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 1 Hz	32
4.8	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1 Hz	32
4.9	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 150 Hz	33
4.10	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz	33
4.11	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 100 Hz	34
4.12	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 100 Hz	34
4.13	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 10 Hz	35
4.14	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 Hz	35
4.15	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 1 Hz	36
4.16	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1 Hz	36
4.17	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 150 Hz	37
4.18	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz	37
4.19	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 100 Hz	38
4.20	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 100 Hz	38
4.21	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 10 Hz	39
4.22	รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 Hz	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่าเมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 1 Hz	40
4.24 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานชดเชยค่าเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1 Hz	40
4.25 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดกลับขั้วเมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 150 Hz	41
4.26 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดกลับขั้วเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz	41
4.27 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดกลับขั้วเมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 100 Hz	42
4.28 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดกลับขั้วเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 100 Hz	42
4.29 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดกลับขั้วเมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 10 Hz	43
4.30 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดกลับขั้วเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 Hz	43
4.31 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดกลับขั้วเมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 1 Hz	44
4.32 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดกลับขั้วเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1Hz	44
4.33 การต่อวงจรทดสอบจริง	45
4.34 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2ms ที่ถูกทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 4 แบบกับระบบวัดอ้างอิง	47

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการดำเนินงาน

3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

กับดักแรงดันเกิน (Surge Arrester) เป็นอุปกรณ์ป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า หรือ แรงดันเกินที่เกิดจากการสับสวิตช์ในระบบไฟฟ้ากำลัง กับดักแรงดันเกินที่ดีจะต้องมีอิมพีแดนซ์สูงในสภาวะปกติ และเมื่อเกิดแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวจะต้องลดลงเพื่อจำกัดแรงดันเกินไม่ให้เกินกว่าระดับการป้องกันที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งก่อนนำกับดักแรงดันเกินไปใช้งานจะต้องมีการทดสอบวัฏจักรร้อนด้วยกระแสพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ดังนั้น การวัดรูปคลื่นกระแสพัลส์ด้วยเครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญต่อการทดสอบกับดักแรงดันเกิน

วิธีการวัดกระแสพัลส์มีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 วิธี คือ การวัดกระแสพัลส์ด้วยตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (Shunt Resister) และการวัดกระแสพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟกี (Rogowski Coil) จากสองวิธีข้างต้นการวัดกระแสพัลส์ด้วยตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำมีข้อเสีย คือ อุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแสจะมีขนาดใหญ่ตามขนาดของกระแสที่ต้องการวัด และอุปกรณ์ดังกล่าวอาจกลายเป็นโหลดของวงจรทดสอบ อีกทั้งการวัดกระแสพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟกีเป็นการวัดโดยคล้อยจากภายนอกวงจรทดสอบ ดังนั้น เมื่อเกิดการเบรคควานหรือการวาบไฟตามผิวที่วัดทดสอบจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบบันทึกผลและปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงาน

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากในปีการศึกษา 2555 ได้มีการออกแบบและสร้างขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว (inverting Active Integrator) เพื่อใช้วัดกระแสพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แต่พบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวยังคงมีปัญหาในเรื่องการผิดเพี้ยนที่เวลาเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสเมื่อทำการวัดรูปคลื่นกระแสพัลส์ $8/20 \mu s$ และ $30/80 \mu s$ และวงจรดังกล่าวยังพบปัญหาความไม่คงตัวของยอดรูปคลื่นเมื่อทำการวัดรูปคลื่นกระแสพัลส์ช่วงยาว ดังนั้น ในปีการศึกษา 2556 จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว (non-inverting Integrator) เพื่อแก้ปัญหาความไม่คงตัวของยอดรูปคลื่นเมื่อทำการวัดกระแสพัลส์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาทฤษฎีการวัดกระแสพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรต
- 2) เพื่อพัฒนาระบบการวัดกระแสพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรต
- 3) เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายจากการสั่งซื้อขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตจากต่างประเทศ

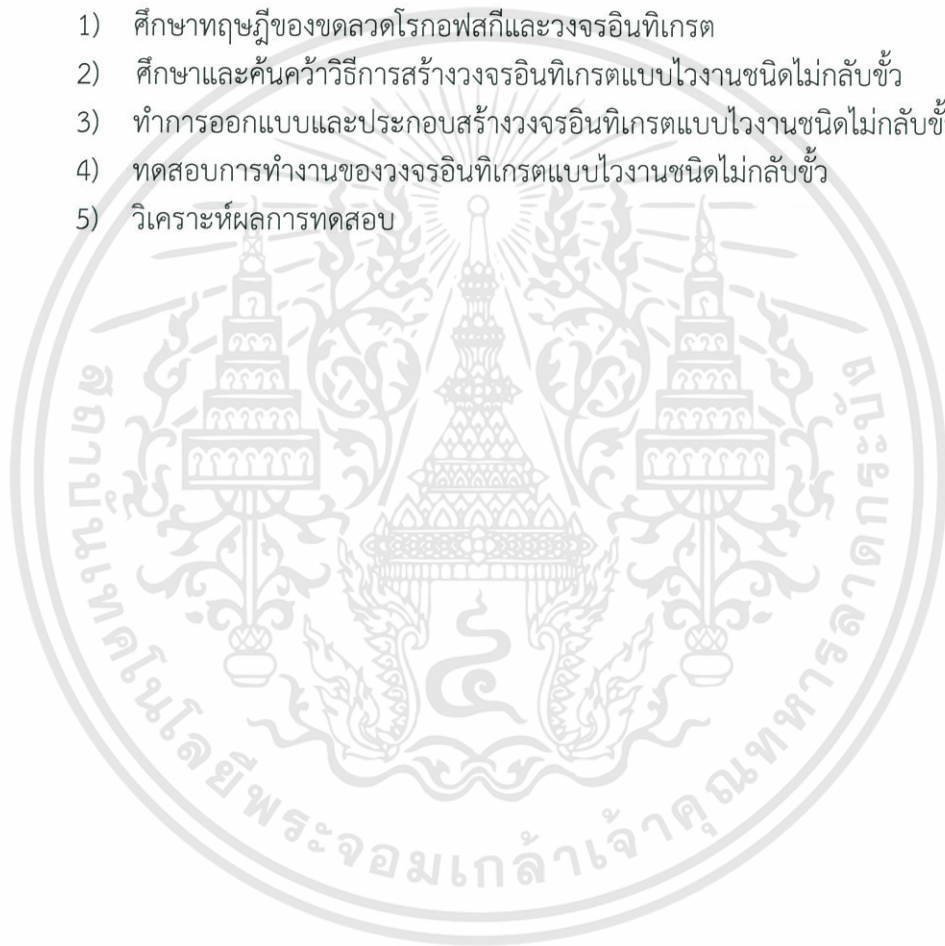
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว
- 2) ศึกษาวิธีการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ตามมาตรฐาน 60060-2
- 3) ออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว
- 4) ทดสอบและปรับปรุงวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว
- 5) ทดสอบและปรับปรุงระบบวัดกระแสฮาร์มอนิกส์

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรต
- 2) ศึกษาและค้นคว้าวิธีการสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว
- 3) ทำการออกแบบและประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว
- 4) ทดสอบการทำงานของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว
- 5) วิเคราะห์ผลการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน									
	พ.ศ.2556							พ.ศ.2557		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1) ศึกษาทฤษฎีของขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรต	←-----→	←-----→								
2) ศึกษาการวัดกระแสฮิมพัลส์และค้นคว้าวิธีการสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน	←-----→	←-----→								
3) ออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว			←-----→	←-----→	←-----→	←-----→	←-----→	←-----→		
4) ประกอบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว					←-----→	←-----→	←-----→	←-----→		
5) ทดสอบและปรับปรุงวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว						←-----→	←-----→	←-----→	←-----→	
6) สรุปผลการทดสอบและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์								←-----→	←-----→	←-----→

←-----→ การวางแผน ←-----→ การดำเนินงานจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1) มีความเข้าใจในหลักการทำงานของการทำงานของการวัดกระแสฮิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว
- 2) สามารถใช้งานขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเพื่อวัดกระแสฮิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3) ประหยัดค่าใช้จ่ายจากการสั่งซื้อขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานจากต่างประเทศเพราะได้มีการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปีการศึกษา 2554 มีการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ [1] โดยนายวคุณ ไตรรัตน์ภักษ์ ซึ่งเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์นี้สามารถสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า $8/20 \mu s$ พิกัด 40 kA ได้ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1

ต่อมาในปีการศึกษา 2555 มีการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน [2] โดยนายนรภัทร สุขสันติโชค ซึ่งระบบวัดกระแสอิมพัลส์นี้ สามารถวัดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า $8/20 \mu s$ และกระแสอิมพัลส์สวิตช์ซึ่ง $30/80 \mu s$ ซึ่งพบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนในช่วงเวลาเริ่มต้นของรูปคลื่น (Pre Shoot) และสามารถวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวได้

ต่อมาในปีการศึกษา 2556 มีการออกแบบและพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว [3] โดยนายชาติอริยะ ประเสริฐสังข์ เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวนี้ สามารถสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 0.5, 1.0, 2.0 ms สำหรับทดสอบกับดักแรงดันเกินตามมาตรฐาน 60099-4

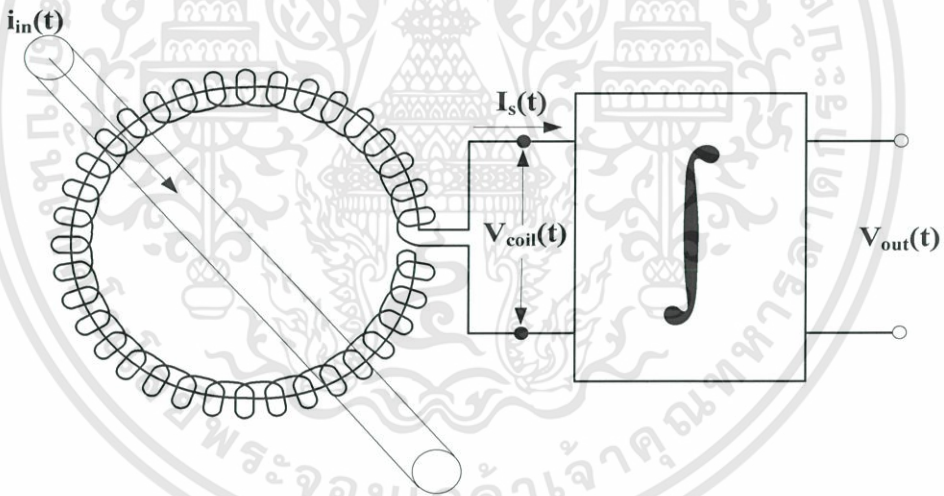


บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี [4]

2.1.1 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี

หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี จะใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (CT) แบบพิเศษ ซึ่งหลักการวัดกระแสด้วยขดลวดดังกล่าว คือ เมื่อนำขดลวดโรกอฟสกีไปคล้องล้อมรอบแท่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัดไหลผ่าน เส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งตัวนำจะไปคล้องผ่านขดลวดโรกอฟสกีและเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ก็จะทำให้ส่งผลให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องผ่านขดลวดโรกอฟสกีเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นกัน เมื่อเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องผ่านขดลวดโรกอฟสกีมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายขดลวดโรกอฟสกี นั่นคือ $v_{coil}(t)$ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของกระแส $\frac{di_{in}}{dt}$ และหากนำแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสม จะทำให้ได้รูปคลื่นของกระแสที่ต้องการวัดปรากฏออกมาในรูปของแรงดันขาออกของวงจร ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี

ในรูปที่ 2.1 จากกฎของแอมแปร์ คือ เมื่อขดลวดโรกอฟสกีคล้องล้อมรอบแท่งตัวนำที่มีกระแส $i_{in}(t)$ ไหลผ่าน จะทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่ขดลวดโรกอฟสกีซึ่งอยู่ห่างจากแท่งตัวนำในแนวรัศมีเท่ากับ r คือ

$$H_r = \frac{I_{in}}{2\pi r} \quad (2.1)$$

หากขดลวดวางอยู่ในอากาศ จะได้ความหนาแน่นเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก ณ จุดนั้น คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = \mu_0 H_r = \frac{\mu_0 I_{in}}{2\pi r} \quad (2.2)$$

และหากขดลวดมีพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับ A จะสามารถหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องผ่านขดลวดที่มีจำนวนรอบทั้งหมด N รอบ และมีความยาวของขดลวดเท่ากับ $l = 2\pi r$ ได้คือ

$$\Phi = \frac{\mu_0 A I_{in}}{l} \quad (2.3)$$

จากกฎเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ทำให้สามารถหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดจำนวน N รอบได้ดังนี้

$$v_{coil}(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{-N\mu_0 A}{l} \times \frac{di_{in}}{dt} \quad (2.4)$$

$$v_{coil}(t) = -M \frac{di_{in}}{dt} \quad (2.5)$$

โดยที่ $M = -\frac{N\mu_0 A}{l}$, M คือความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดโรกอฟสกีกับตัวนำที่มีกระแส i_{in} ไหลผ่าน โดยที่กระแส i_{in} ที่ต้องการวัดมีค่าเท่ากับ

$$i_{in}(t) = -M \int_0^t v_{coil}(t) dt \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) พบว่าการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกีจะต้องทำการอินทิเกรตแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ปลายขดลวดเพื่อให้ได้กระแสที่ต้องการวัด ดังนั้นเมื่อทำการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกีจึงจำเป็นต้องมีวงจรอินทิเกรต

ขนาดของแรงดันที่ทำการอินทิเกรตจะขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัว (τ) ของวงจรอินทิเกรต ดังสมการที่ (2.7)

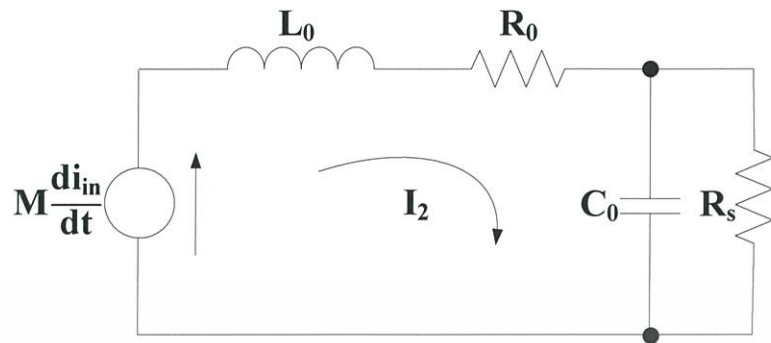
$$V_{out} = \frac{1}{\tau} \int v_{coil}(t) dt \quad (2.7)$$

โดยอัตราขยายของระบบวัดจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนแรงดันขาออกต่อกระแสที่วัด V_{out}/I_{in} ดังสมการ (2.8)

$$G_I = \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{M}{\tau} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกีสามารถเขียนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของขดลวดโรกอฟสกี

สามารถหาค่า L_0 และค่า C_0 ได้ดังนี้

$$L_0 = MN \quad (2.9)$$

$$C_0 = \frac{16\epsilon_0\epsilon_r l}{\pi \ln\left(\frac{A}{a}\right)} \quad (2.10)$$

$$R_0 = \frac{\rho_w l_w}{A_w} \quad (2.11)$$

โดยที่

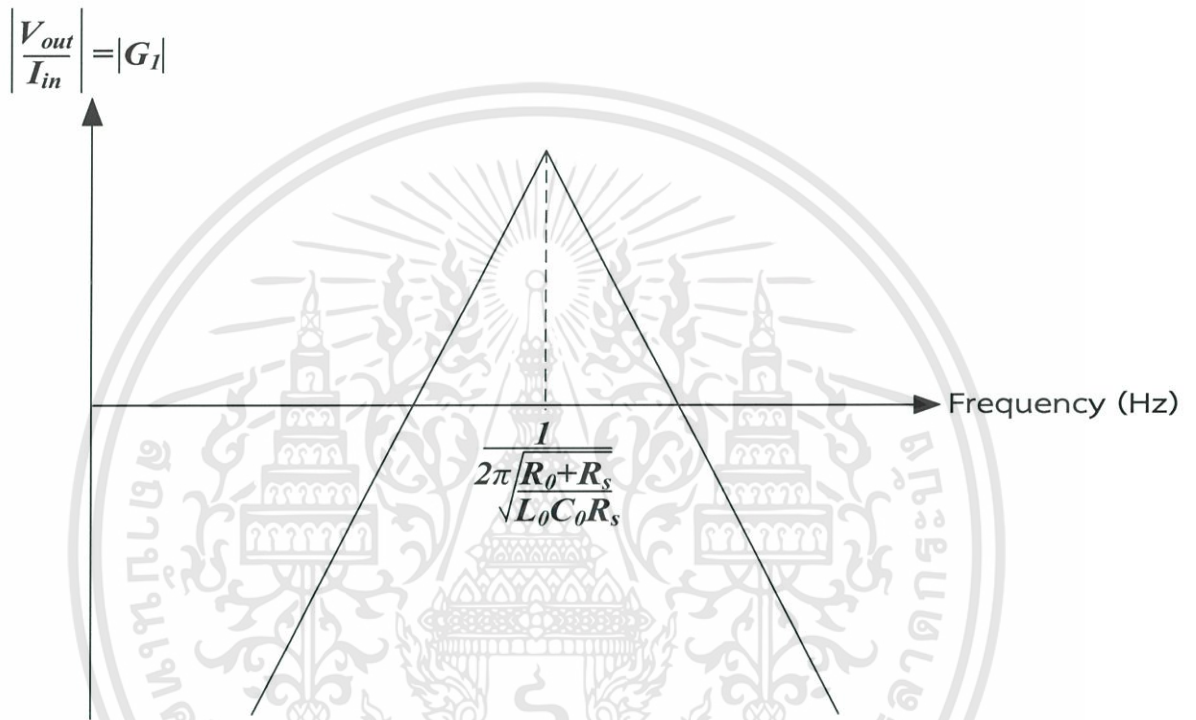
$M \frac{di_m}{dt}$	คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)
R_0	คือ ความต้านทานของขดลวดโรกอฟสกี (Ω)
L_0	คือ ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี (H)
C_0	คือ ความจุไฟฟ้าของขดลวดโรกอฟสกี (F)
a	คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m^2)
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนขดลวด (m^2)
N	คือ จำนวนรอบขดลวดทั้งหมด (turn)
n	คือ จำนวนรอบต่อความยาวแกน (turn/m)
ϵ_r	คือ เปรอริมิตติวิตีสัมพัทธ์ของแกนที่ใช้พันขดลวด (F/m)
ϵ_0	คือ เปรอริมิตติวิตีสัมพัทธ์ของอากาศ (F/m)
ρ_w	คือ ความต้านทานจำเพาะของลวด ($\Omega\cdot m$)
A_w	คือ พื้นที่หน้าตัดของลวด (mm^2)
l_w	คือ ความยาวของลวด (m)
R_s	คือ ความต้านทานหน่วง (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรมุมของขดลวดโรกอฟสกีในรูปที่ 2.2 สามารถหาค่าอัตราขยายของขดลวดโรกอฟสกีได้ ดังสมการ (2.12)

$$G_I(s) = \frac{sM}{[s^2 C_0 L_0 + (\frac{L_0}{R_s} + R_0 C_0)s + (\frac{R_0}{R_s} + 1)]} \quad (2.12)$$

กราฟผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



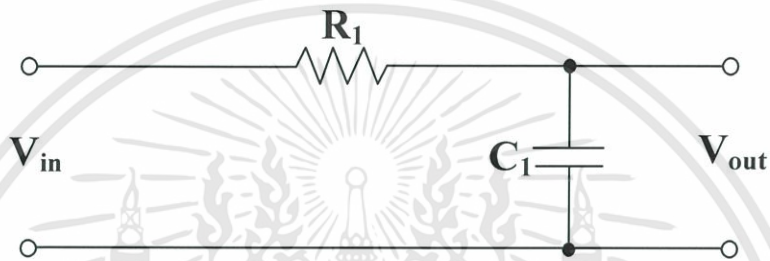
รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดโรกอฟสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน [5]

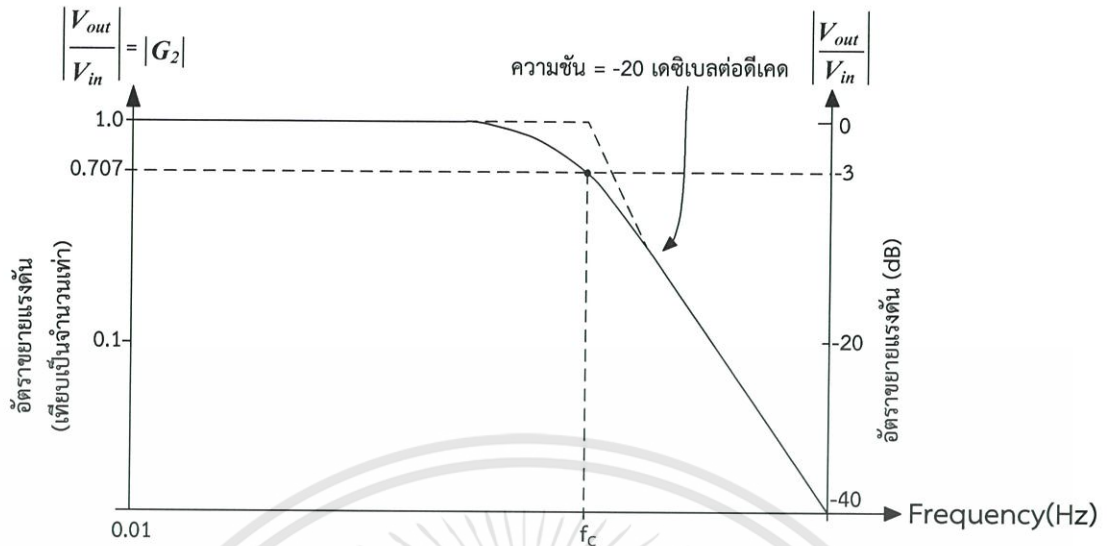
วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานหรือเรียกอีกชื่อว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอาร์ซี ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ทำงาน ได้แก่ อุปกรณ์ประเภทตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) โดยแรงดันขาออกที่ได้จะวัดจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานมีหน้าที่คือ ทำให้รูปคลื่นขาออกเป็นรูปคลื่นที่ได้จากการอินทิเกรตรูปคลื่นขาเข้า โดยรูปคลื่นที่อินทิเกรตได้จะมีรูปร่างแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัวของวงจร (T) ซึ่งวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานนี้จะมีข้อดีคือ สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่สูงมากและสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟใดๆ ทั้งสิ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำ จะยอมให้องค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความถี่ที่กำหนด ผ่านได้โดยไม่มีการลดทอนของสัญญาณ ซึ่งความถี่ที่กำหนดดังกล่าวถูกเรียกว่า ความถี่ตัด (Cut-Off Frequency, f_c) ซึ่งก็คือความถี่ขณะที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ ส่วนองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่สูงเกินความถี่ที่กำหนด เมื่อผ่านวงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่านในทางทฤษฎีแล้ว ควรจะมีอัตราขยายเท่ากับศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเป็นเช่นนั้นได้ เนื่องจากการตอบสนองต่อองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ ของอุปกรณ์แบบเฉื่อยงานจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงในทันทีทันใดได้ ดังนั้นผลที่ได้คือ เมื่อองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่สูงเกินความถี่ที่กำหนดผ่านวงจร วงจรจะลดทอนขนาดขององค์ประกอบของสัญญาณที่ความถี่นั้นลงไปดังแสดงได้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

จากวงจรในรูปที่ 2.5 สามารถหาค่าแรงดันขาออกของวงจร ได้จากสมการ

$$V_{out}(s) = \frac{I}{C_1 s} \quad (2.13)$$

และค่าแรงดันขาเข้าของวงจรจะมีค่าดังสมการที่ (2.14)

$$V_{in}(s) = IR_1 + \frac{I}{C_1 s} = I\left(R_1 + \frac{1}{C_1 s}\right) \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) จะสามารถหาค่าอัตราส่วนแรงดันขาออกต่อแรงดันขาเข้า หรืออัตราขยายของวงจรได้ดังสมการ

$$G_2(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\frac{I}{C_1 s}}{I\left(R_1 + \frac{1}{C_1 s}\right)}$$

$$G_2(s) = \frac{1}{1 + R_1 C_1 s} \quad (2.15)$$

แต่ $s = j\omega$ ดังนั้น

$$|G_2(j\omega)| = \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.16) สามารถคำนวณขนาดของอัตราขยายของวงจรได้จาก

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + (j\omega R_1 C_1)^2}}$$

แต่ $f^2 = -1$ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงแต่ขนาดจะไม่คิดเครื่องหมาย ดังนั้นจะได้ขนาดของอัตราขยายเป็นดังสมการ (2.17)

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + (\omega R_1 C_1)^2}} \quad (2.17)$$

และสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษสำหรับการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานคือค่าความถี่ตัด f_c ที่ต้องการใช้งาน จากรูปที่ 2.5 ที่ความถี่ตัด พบว่า ขนาดของสัญญาณจะลดลง 0.707 เท่า และ $X_C = R_1$ ดังนั้น จะสามารถหาค่าความถี่ตัด ได้ดังสมการ (2.18)

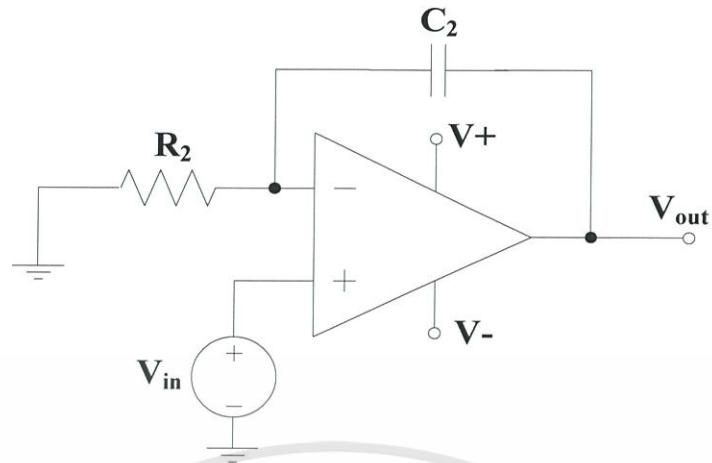
$$X_C = \frac{1}{2\pi f_c C_1} \approx R_1 \quad (2.18)$$

โดยที่ f_c คือความถี่ (Hz)
 R_1 คือความต้านทาน (Ω)
 C_1 คือความจุไฟฟ้า (F)

2.3 วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

2.3.1 วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว เป็นวงจรที่สร้างขึ้นโดยให้ตัวต้านทานเป็นองค์ประกอบขาเข้าด้าน Inverting ของออปแอมป์ และให้ตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบป้อนกลับ โดยที่ขาเข้าด้าน Non-inverting ของออปแอมป์จะถูกจ่ายสัญญาณแรงดันที่ต้องการอินทิเกรต



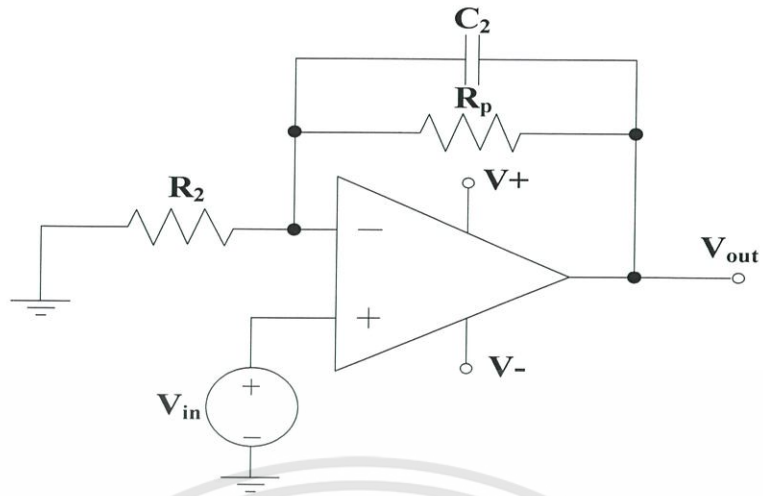
รูปที่ 2.6 วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

จากรูปที่ 2.6 จะได้แรงดันขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้วเป็นฟังก์ชันของเวลาซึ่งแสดงในรูปสมการได้ ดังนี้

$$v_{out}(t) = \frac{1}{R_2 C_2} \int_0^t v_{in}(t) dt \quad (2.19)$$

โดยที่ v_{in} คือ แรงดันขาเข้าของวงจร
 v_{out} คือ แรงดันขาออกที่ได้จากวงจร
 $R_2 C_2$ คือ ค่าเวลาคงตัวของวงจร

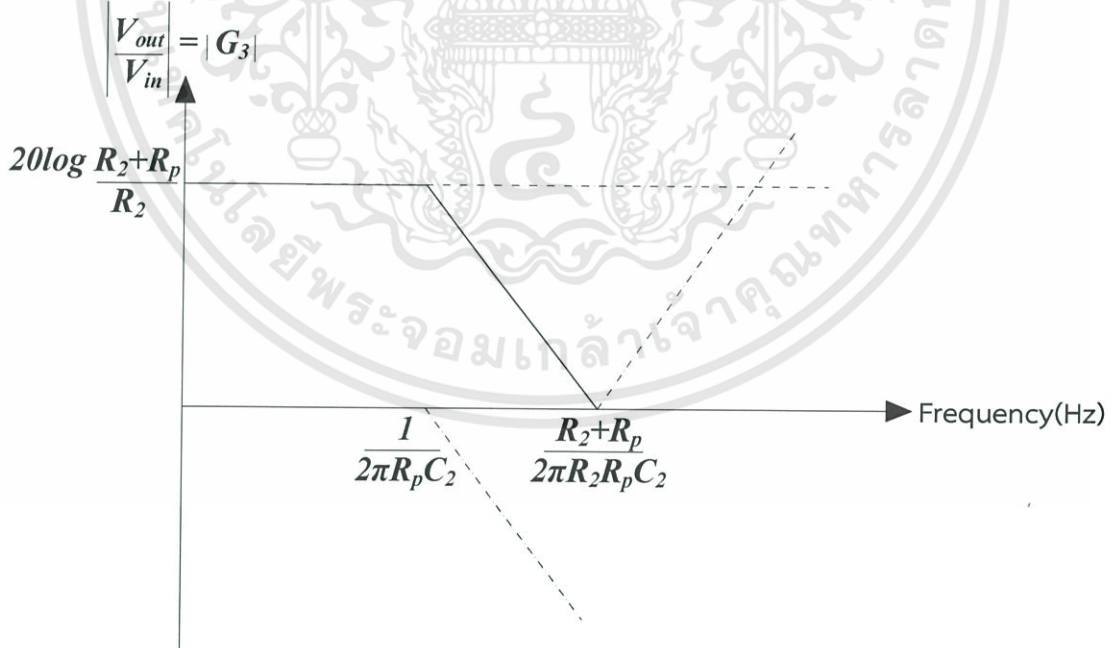
จากวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้วดังรูปที่ 2.6 พบว่า หากแรงดันขาเข้ามีองค์ประกอบแรงดันตรง จะทำให้อัตราขยายของวงจรดังกล่าวมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นจึงทำการขนานตัวต้านทาน R_p เข้ากับตัวเก็บประจุ เพื่อจำกัดอัตราขยายของวงจรเมื่อแรงดันที่ต้องการอินทิเกรตมีองค์ประกอบของแรงดันตรงปะปนมาด้วย ซึ่งโดยทั่วไปค่า R_p ควรค่ามากกว่าสิบเท่าของ R_2 ดังนั้นวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้วในทางปฏิบัติจึงแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้วที่ใช้ในทางปฏิบัติ

จากวงจรในรูปที่ 2.7 สามารถคำนวณอัตราขยายได้ตั้งสมการที่ (2.19) และเขียนผลตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response) ได้ดังรูปที่ 2.10

$$G_3(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s + \frac{R_2 + R_p}{R_2 R_p C_2}}{s + \frac{1}{R_p C_2}} \quad (2.20)$$

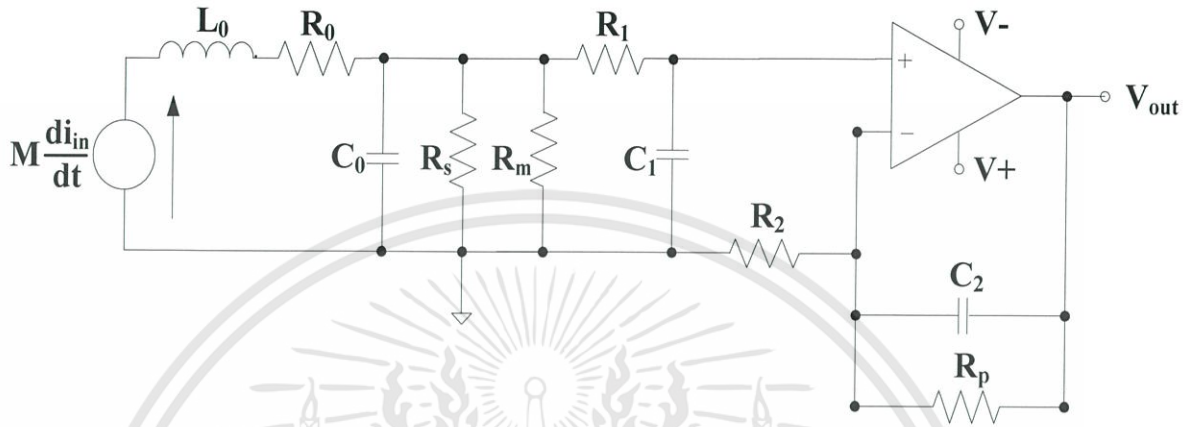


รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกผ่านวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

เมื่อนำขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกผ่านวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้วจะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้า ดังรูป 2.9



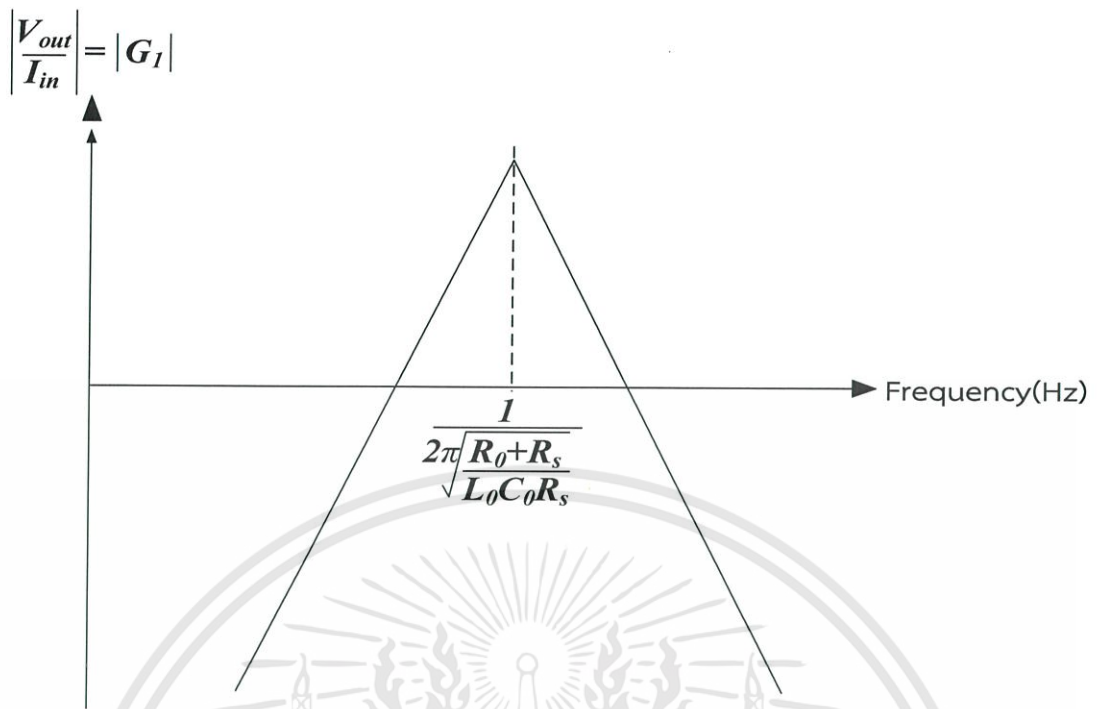
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

จากรูปที่ 2.9 พบว่าอัตราขยายรวมของระบบวัด สามารถแยกคิดอัตราขยายแต่ละวงจรแล้วนำมาหาอัตราขยายรวมในภายหลังได้ ดังนี้

1) อัตราขยายของขดลวดโรกอฟสกี

$$G_1(s) = \frac{sM}{[s^2 C_0 L_0 + (\frac{L_0}{R_s} + R_0 C_0)s + (\frac{R_0}{R_s} + 1)]}$$

กราฟพลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีแสดงได้ดังรูปที่ 2.10

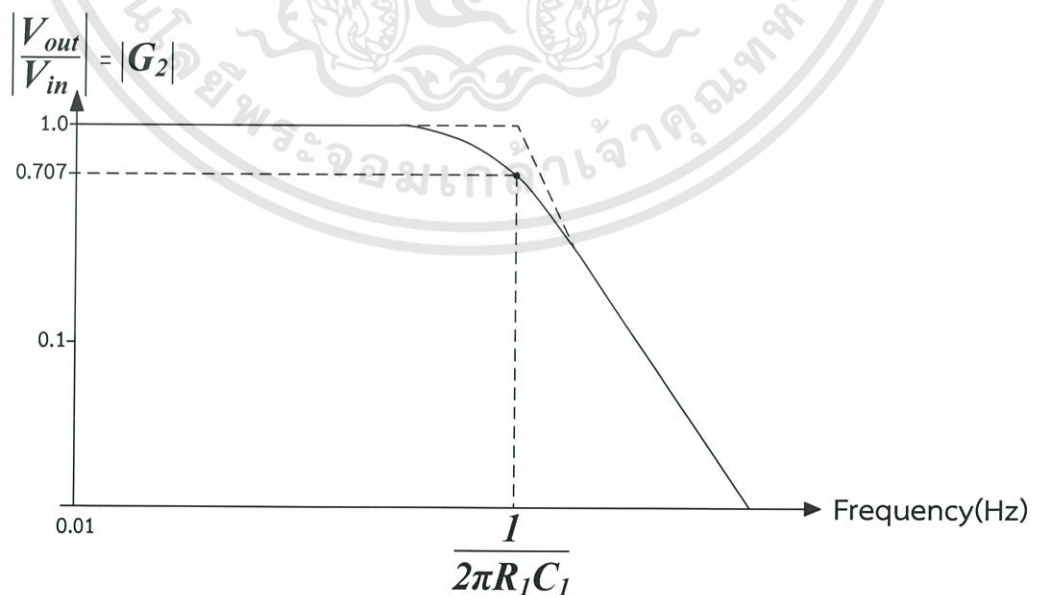


รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดโรกอฟสกี

2) อัตราขยายของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

$$G_2(s) = \frac{1}{1 + R_1 C_1 s}$$

กราฟผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



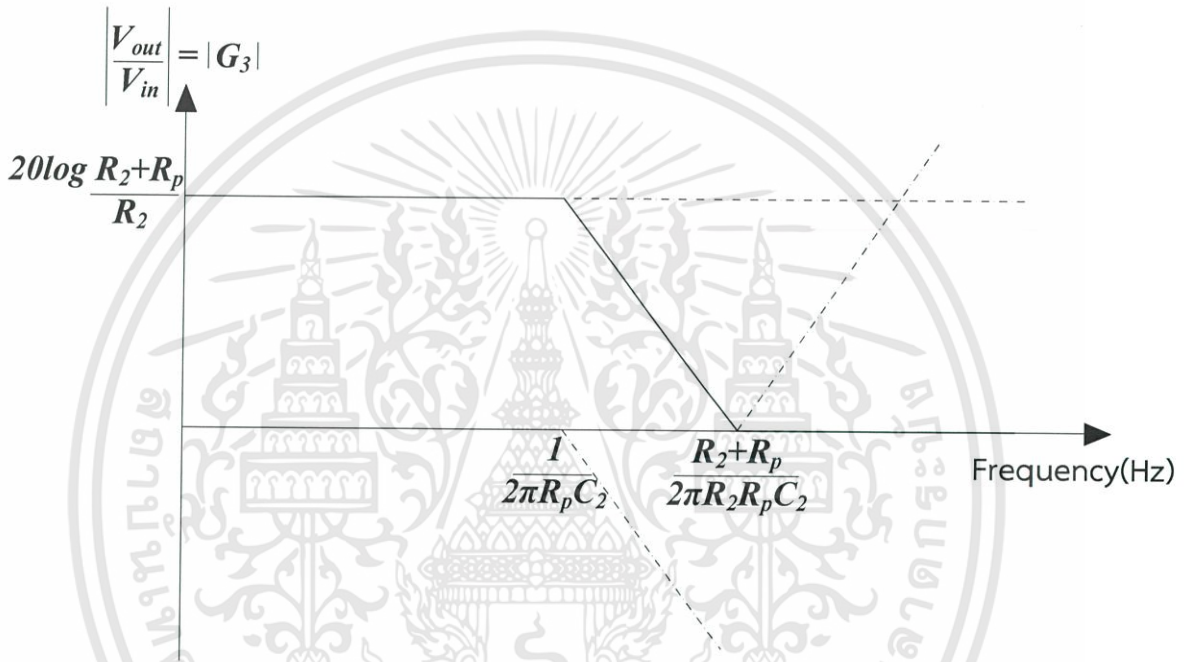
รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) อัตราขยายของวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

$$G_3(s) = \frac{s + \frac{R_2 + R_p}{R_2 R_p C_2}}{s + \frac{1}{R_p C_2}}$$

กราฟผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้วแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

ดังนั้น จะได้อัตราขยายรวมของขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว ดังนี้

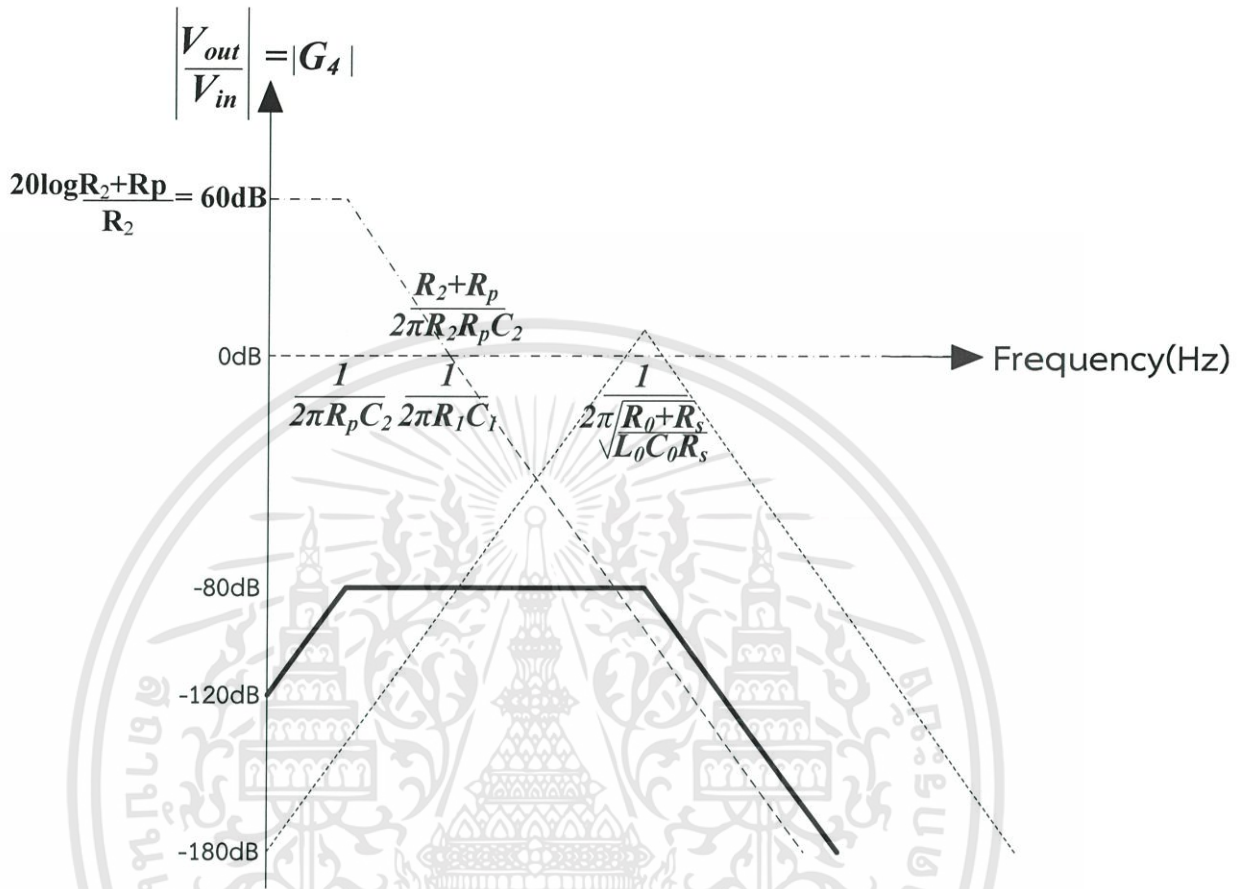
$$G_4(s) = G_1(s) \times G_2(s) \times G_3(s)$$

$$G_4(s) = \frac{\frac{M}{L_0 C_0} s}{s^2 + \frac{1}{R_s C_0} s + \frac{1}{L_0 C_0}} \times \frac{1}{1 + R_1 C_1 s} \times \frac{s + \frac{R_2 + R_p}{R_2 R_p C_2}}{s + \frac{1}{R_p C_2}}$$

$$G_4(s) = \frac{R_s M}{(R_0 + R_s) R_1 C_1} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกราฟผลตอบแทนต่อความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีเมื่อต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีเมื่อต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

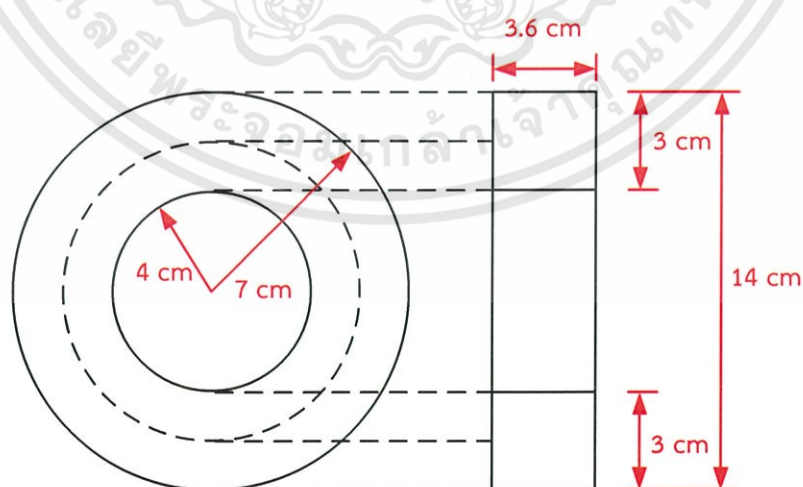
วงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว ประกอบด้วยวงจรรีจิสเตอร์ 2 ส่วน คือ วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานหรือวงจรรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรรีจิสเตอร์แบบไม่กลับขั้ว การออกแบบและประกอบสร้างวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเริ่มจาก ออกแบบค่าความถี่จำกัดบนและความถี่จำกัดล่างของวงจรรีจิสเตอร์แบบไม่กลับขั้ว ต่อไปจึงทำการออกแบบค่าความถี่ของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานให้มีค่าเท่ากับค่าความถี่จำกัดบนของวงจรรีจิสเตอร์แบบไม่กลับขั้ว จากนั้นทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรรีจิสเตอร์แบบไม่กลับขั้วและวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรรีจิสเตอร์แล้วจึงทำการประกอบสร้างวงจรรีจิสเตอร์แบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วขึ้น

3.1 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดโรกอฟสกี [6]

3.1.1 แกนขดลวด

เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก กล่าวคือ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) เท่ากับอากาศ ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) หรือ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability) เท่ากับหนึ่ง ดังนั้น จึงไม่ทำให้เกิดการอิมิตัวของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านวัสดุดังกล่าว และหากนำพลาสติกมาเป็นวัสดุในการทำแกนของขดลวดโรกอฟสกีเพื่อใช้วัดกระแสที่มีขนาดสูงและมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็ว เช่น กระแสอิมพัลส์ จะทำให้รูปคลื่นของแรงดันขาออกไม่เกิดความผิดเพี้ยน

แกนขดลวดนี้ได้จากการกลึงพลาสติกเป็นรูปทอรอยด์ โดยออกแบบให้รัศมีนอกของแกนเท่ากับ 7 cm รัศมีในของแกนเท่ากับ 4 cm และให้มีขนาดของพื้นที่หน้าตัดแกนเท่ากับ 10.8 cm² ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 มิติของแกนขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบดังรูปที่ 3.1 สามารถคำนวณหาความยาวเฉลี่ยของแกนขดลวด (l) ได้จาก

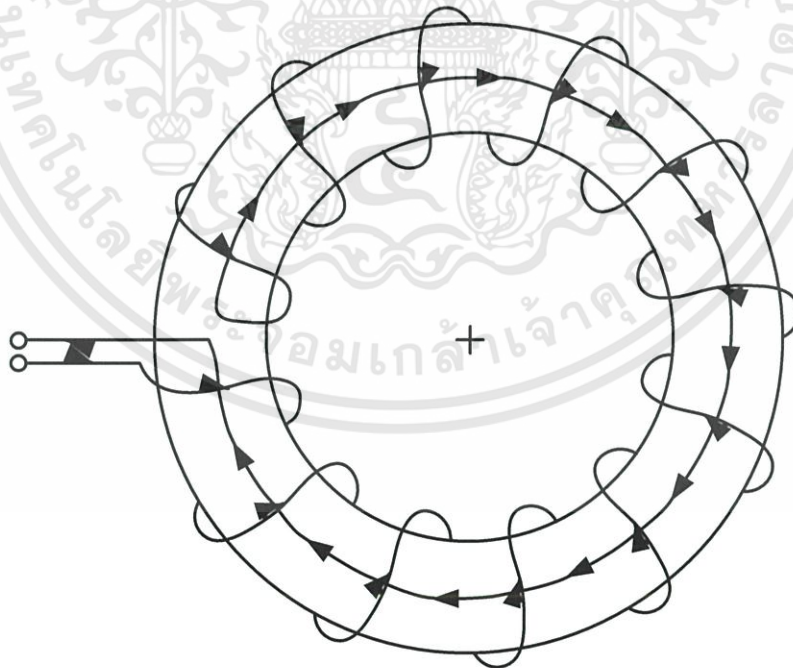
$$l = 2\pi\left(\frac{R+r}{2}\right) \quad (3.1)$$

$$l = 2\pi\left(\frac{7+4}{2}\right) = 34.56 \text{ cm}$$

3.1.2 ขดลวด

การวัดกระแสอิมพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกี เป็นการวัดกระแสที่อาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำที่ขดลวดโรกอฟสกีคล้องอยู่ ซึ่งการวัดจะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อ พื้นที่ภาคตัดขวางและความถี่ของจำนวนรอบขดลวดมีความสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวแกน

การพันขดลวดโรกอฟสกีนั้น จะมีลักษณะพิเศษต่างจากการพันขดลวดปกติ คือ มีการพันย้อนกลับเข้าไปภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบ เพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน ดังรูปที่ 3.2 และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในขดลวดจะมาจากสนามแม่เหล็กของกระแสที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงทำให้รูปคลื่นกระแสที่วัดได้มีความถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 3.2 การพันขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อัตราขยายของระบบวัดและค่าพารามิเตอร์ของขดลวดโรกอฟสกี

ในการออกแบบอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ พบว่า ค่ายอดของกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัดคือ 40 kA ซึ่งในการออกแบบจะเผื่อพิคกิ้งขึ้นอีก 20% ของพิคกิ้งที่กำหนด ดังนั้นพิคกิ้งกระแสที่ออกแบบคือ $I_{in} = 48$ kA โดยกำหนดให้แรงดันขาออกของขดลวดโรกอฟสกีที่ต้องการ (V_{coil}) เท่ากับ 16 V ซึ่งจากบทที่ 2 พบว่า อัตราขยายของระบบวัดจะอยู่ในเทอมของอัตราส่วนแรงดันขาออกต่อกระแสที่ทำการวัด

$$G_I = \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{M}{\tau}$$

ซึ่งอัตราขยายของขดลวดโรกอฟสกี จะคิดเหมือนกับการคิดอัตราขยายของขดลวดโรกอฟสกีโดยต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน ดังนี้

$$G_I = \frac{M}{RC} = \frac{V_{coil}}{I_{in}} = \frac{16}{48 \times 10^3} \quad (3.2)$$

และด้วยเงื่อนไขข้างต้นจะสามารถหาค่า M ได้จาก

$$\frac{I}{2\pi RC} \leq f_L \quad (3.3)$$

$$\frac{I}{2\pi RC} \leq 338.8$$

$$\frac{I}{RC} \leq 2128.74$$

นำค่า $\frac{I}{RC}$ ไปแทนลงในสมการอัตราขยายจะได้

$$M = G \times RC \quad (3.4)$$

$$M = \frac{16}{48 \times 10^3 \times 2128.74} = 0.157 \mu H$$

และคำนวณหาจำนวนรอบขดลวดต่อเมตร

$$n = \frac{M}{\mu_0 A} \quad (3.5)$$

$$n = \frac{0.157 \times 10^{-6}}{(4\pi \times 10^{-7}) \times (10.8 \times 10^{-4})} = 115.6 \text{ turns/m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาจำนวนรอบขดลวดทั้งหมดที่ต้องพัน

$$N = nl \quad (3.6)$$

$$N = 115.68 \times 34.56 \times 10^{-2} = 40 \text{ turns}$$

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า

$$L_0 = MN \quad (3.7)$$

$$L_0 = 0.157 \times 10^{-6} \times 40 = 6.28 \mu H$$

หาค่าความถี่ตัดบนได้จาก

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_0 + R_s}{C_0 L_0 R_s}} \quad (3.8)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 + 92}{(0.375 \times 10^{-9})(6.28 \times 10^{-6})(92)}}$$

$$f_H = 3.3 \text{ MHz}$$

กำหนดให้ค่าความต้านทานแมชซิ่ง มีค่าเท่ากับ 50 Ω

3.1.4 ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม (Optimal damping resistance)

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของขดลวดโรกอฟสกี

$$G_1(s) = \frac{V_{coil}}{I_{in}} = \frac{sM}{[s^2 C_0 L_0 + (\frac{L_0}{R_s} + R_0 C_0)s + (\frac{R_0}{R_s} + 1)]} = \frac{sM}{[C_0 L_0 (s-s_1)(s-s_2)]} \quad (3.9)$$

เมื่อ $s_{1,2} = -\omega_1 \pm \sqrt{\omega_1^2 - \omega_2^2}$ คือ รากทั้งสองของสมการ
จะได้ว่า

$$\omega_1 = \frac{L_0 + R_0 C_0 R_s}{2C_0 L_0 R_s} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{R_0 + R_s}{R_s C_0 L_0}} \quad (3.11)$$

หาขนาดของอัตราขยายได้จาก

$$|G_1(j\omega)| = \frac{\frac{MR_s\omega}{R_0 + R_s}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right]^2 + 4\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}} \quad (3.12)$$

สามารถเลือกค่าความต้านทานหน่วงที่เหมาะสมเมื่อเส้นโค้งระหว่างขนาดและความถี่ไม่มีสไปก์ (Spike) คือต้องการให้มี Maximum overshoot ไม่เกิน 3% ซึ่งจะได้ค่า $(\omega_1/\omega_2) = (1/\sqrt{2})$

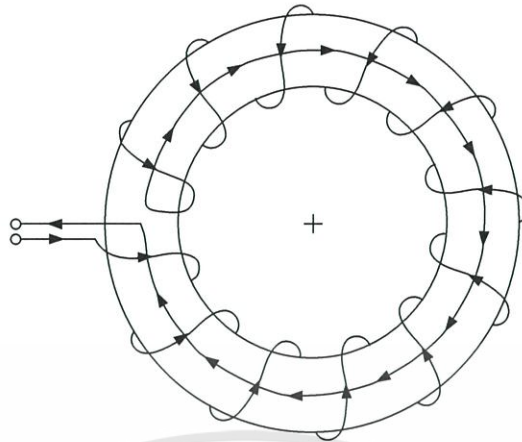
ดังนั้น ค่า R_s ที่เหมาะสม คือ

$$R_s = \frac{L_0}{\sqrt{2C_0L_0 - R_0^2C_0^2}} \quad (3.13)$$

$$R_s = 92 \Omega$$

3.1.5 การพันขดลวดโรกอฟสกี

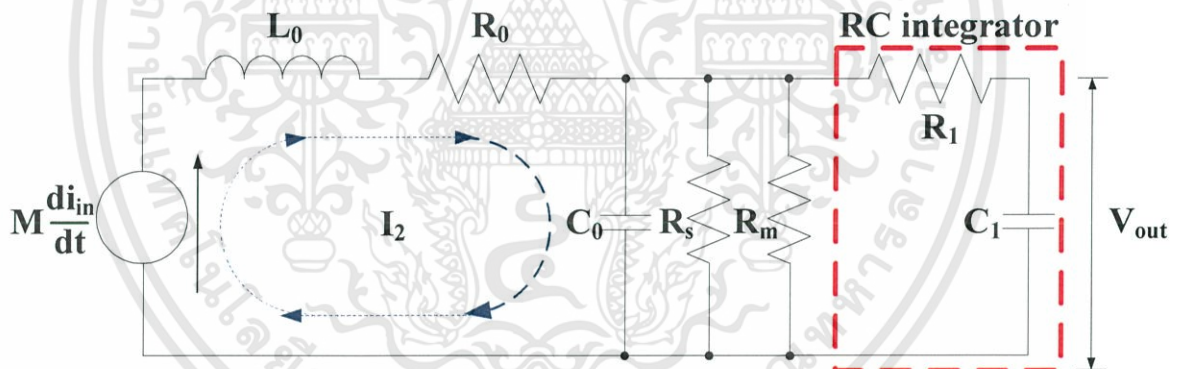
การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นที่ภาคตัดขวางและความหนาแน่นของจำนวนรอบขดลวดคงที่ตลอดช่วงความยาวแกน ดังนั้น การพันขดลวดโรกอฟสกี จึงต้องคำนึงถึงความสม่ำเสมอของพื้นที่ภาคตัดขวางและจำนวนรอบ อีกประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ สนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด จะต้องมาจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัดเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยจะต้องไม่มีผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ดังนั้น เพื่อให้การวัดมีความถูกต้องแม่นยำจึงมีการพันขดลวดโรกอฟสกีให้มีลักษณะพิเศษคือ มีการพันย้อนกลับเข้าไปภายในขดลวดอีกหนึ่งรอบเพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกหักล้างกัน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การพันขดลวด

3.2 การออกแบบและสร้างวงจรอินทิเกรต

3.2.1 แนวคิดการออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน



รูปที่ 3.4 วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานแบบ RC

จากรูปที่ 3.4 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานแบบ RC จะมีอัตราขยายของระบบวัดดังนี้

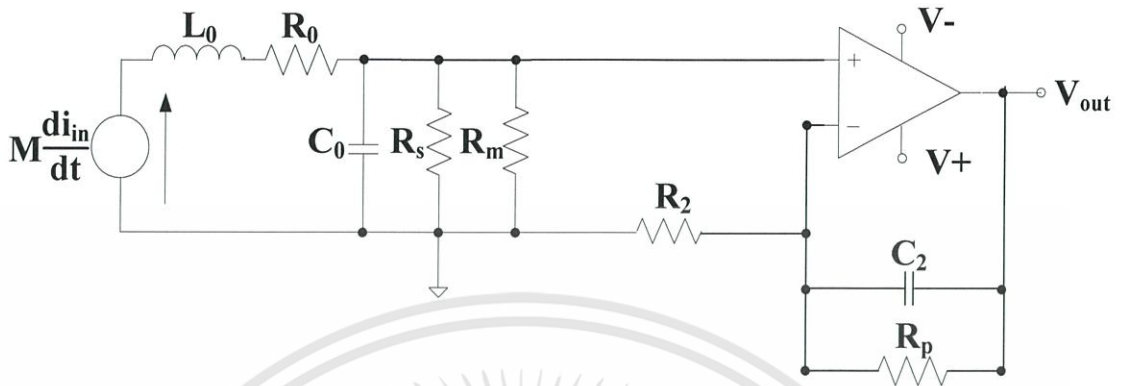
$$G = \frac{M}{R_1 C_1} = \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{4}{40 \times 10^3}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า $R_1 C_1$ ได้จาก

$$R_1 C_1 = \frac{M}{G}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การออกแบบวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว



รูปที่ 3.5 วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

จากรูปที่ 3.5 ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว จะมี อัตราขยายของระบบวัด ดังนี้

$$G = \frac{M}{R_p C_2} = \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{4}{40 \times 10^3}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า $R_p C_2$ ได้จาก

$$R_p C_2 = \frac{M}{G}$$

กำหนดให้ความถี่ตัดกลางของระบบวัด

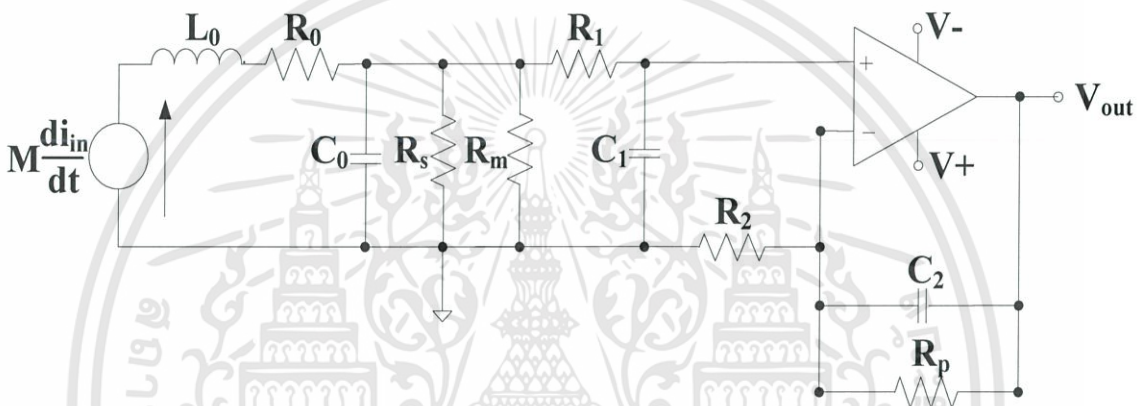
$$f_L = \frac{1}{2\pi R_p C_2} = 0.5 \text{ Hz}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า $R_p C_2$ ได้ ดังนี้

$$R_p C_2 = \frac{1}{2\pi(0.1)}$$

จากรูปที่ 3.5 วงจรอินทิเกรตที่ทำการออกแบบจะมีตัวต้านทานขนาน (R_p) เพื่อจำกัดอัตราขยายหากระบบวัดมีองค์ประกอบอินพุตที่ความถี่ต่ำ

3.2.3 ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับ
ซ้ำ



รูปที่ 3.6 วงจรขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน และวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับซ้ำ

ขดลวดโรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับซ้ำ มีอัตราขยายดังสมการ (3.15) และจากบทที่ 2 พบว่า ความถี่ตัดบนของระบบวัดจะขึ้นอยู่กับค่า R_0 , L_0 , C_0 และ R_s ส่วนความถี่ตัดล่างจะขึ้นอยู่กับ R_p และ C_2

ซึ่งสามารถหาอัตราขยาย (Gain) ของระบบวัด ในช่วงที่วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานทำหน้าที่เป็นวงจรอินทิเกรตได้จาก

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{MR_s}{(R_0+R_s)R_1C_1} \quad (3.14)$$

และสามารถหาอัตราขยาย (Gain) ของระบบวัด ในช่วงที่วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานทำหน้าที่เป็นวงจรอินทิเกรตได้จาก

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{MR_s(R_2+R_p)}{(R_0+R_s)R_pC_2R_2} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังต่อไปนี้

จากการออกแบบข้างต้นสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบวัดได้

ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดโรกอฟสกี

- $R_0 = 3 \Omega$
- $R_s = 92 \Omega$
- $L_0 = 6.28 \mu\text{H}$
- $C_0 = 0.375 \text{ nF}$

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

- $R_1 = 15.7 \text{ k}\Omega$
- $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

- $R_2 = 15.7 \text{ k}\Omega$
- $R_p = 3 \text{ M}\Omega$
- $C_2 = 0.1 \mu\text{F}$

3.3 ประกอบสร้างวงจรอินทิเกรต

เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรอินทิเกรตแล้ว ต่อไปจึงทำการสร้างวงจรอินทิเกรตโดยเลือกค่าพารามิเตอร์ที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ดังนี้

ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดโรกอฟสกี

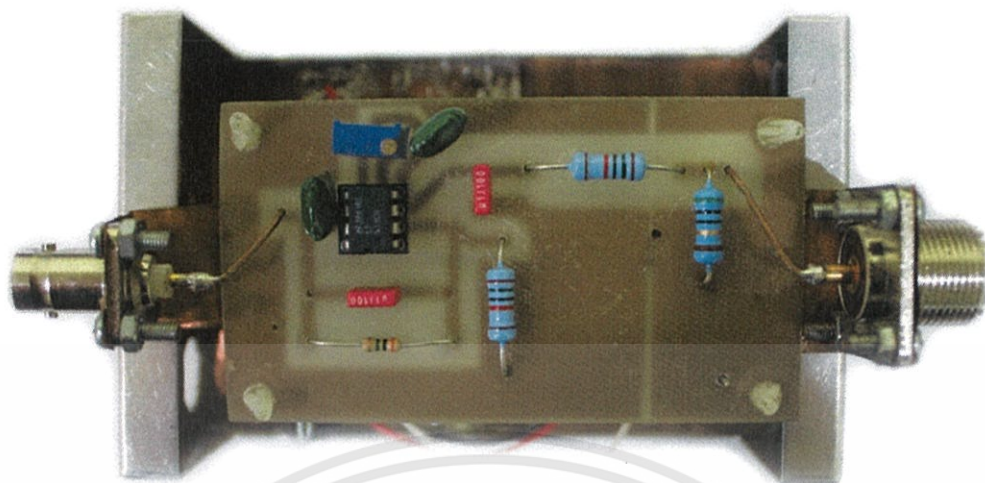
- $R_0 = 3 \Omega$
- $R_s = 92 \Omega$
- $L_0 = 6.28 \mu\text{H}$
- $C_0 = 0.375 \text{ nF}$

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

- $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$
- $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

- $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$
- $R_p = 3 \text{ M}\Omega$
- $C_2 = 0.1 \mu\text{F}$



รูปที่ 3.7 วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วที่ทำการประกอบสร้าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

ก่อนนำวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วที่ประกอบสร้างขึ้นไปใช้งานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีในการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดสอบวงจรอินทิเกรตโดยการป้อนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและประเมินผลการทดสอบเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ที่ต้องการวัดของวงจรอินทิเกรตและเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบต่างๆหลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบการทดสอบวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2 ms โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้วที่ประกอบสร้างขึ้นและวงจรอินทิเกรตแบบต่างๆเพื่อดูประสิทธิภาพในการวัดกระแสอิมพัลส์ของแต่ละวงจร

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

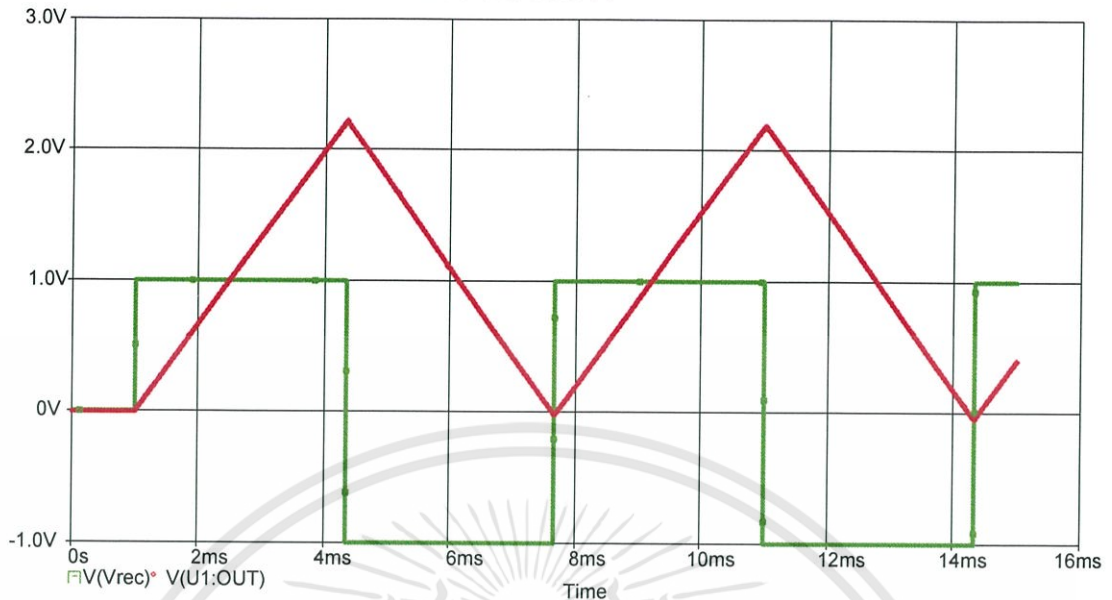
- | | |
|--|-----------|
| 1) วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วที่ทำการประกอบสร้างขึ้น | 1 วงจร |
| 2) วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว | 1 วงจร |
| 3) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน | 1 วงจร |
| 4) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า | 1 วงจร |
| 5) เครื่องกำเนิดรูปคลื่น (Function generator) | 1 เครื่อง |
| 6) ชุดไฟเลี้ยง op - amp | 1 ชุด |
| 7) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป | 1 เครื่อง |
| 8) สายเคเบิล RG8 | 2 เส้น |

4.2 การทดสอบวงจรอินทิเกรต

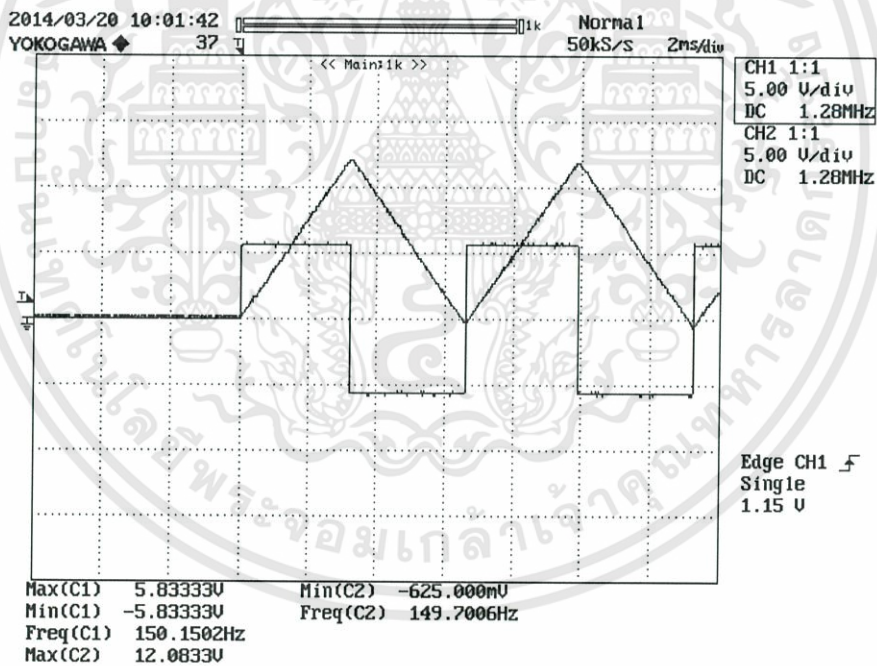
ทำการทดสอบวงจรอินทิเกรตแต่ละชนิดเพื่อดูผลตอบสนองต่อความถี่ที่ต้องการวัดก่อนนำวงจรอินทิเกรตไปทำการทดสอบวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว โดยการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดรูปคลื่น(Function generator) ให้กับวงจรอินทิเกรตด้วยความถี่ 150 Hz และทำการเผื่อย่านความถี่ให้ต่ำลงเป็น 100 Hz 10 Hz และ 1 Hz จากนั้นสังเกตและเปรียบเทียบผลลัพธ์จากรูปคลื่นแรงดันขาออกของวงจร

หมายเหตุ: CH 1 คือ แรงดันขาเข้า
CH 2 คือ แรงดันขาออก

4.2.1 วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว

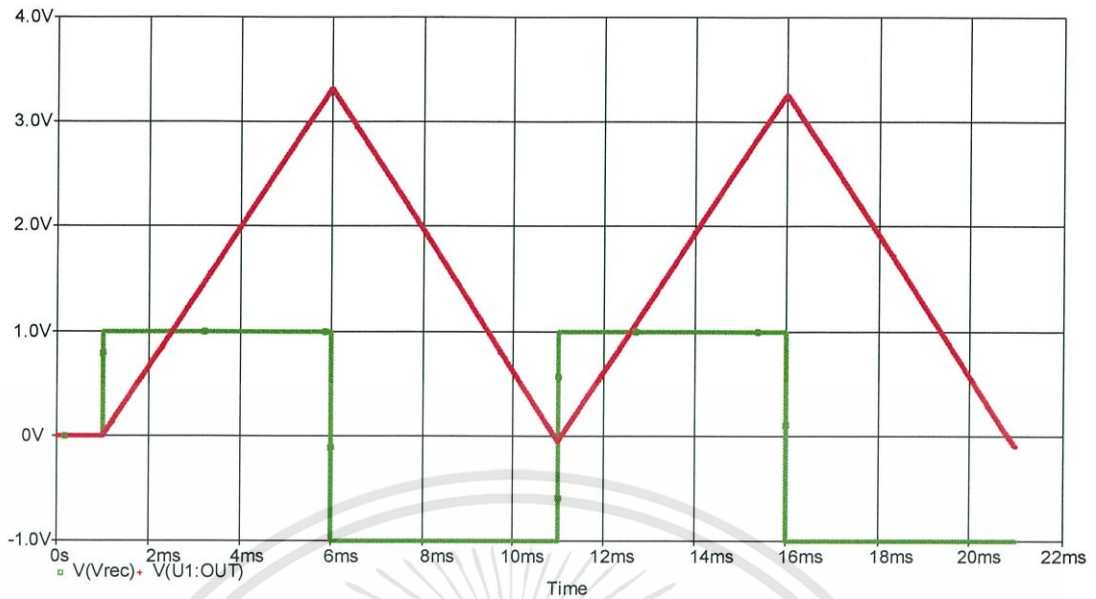


รูปที่ 4.1 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 150 Hz

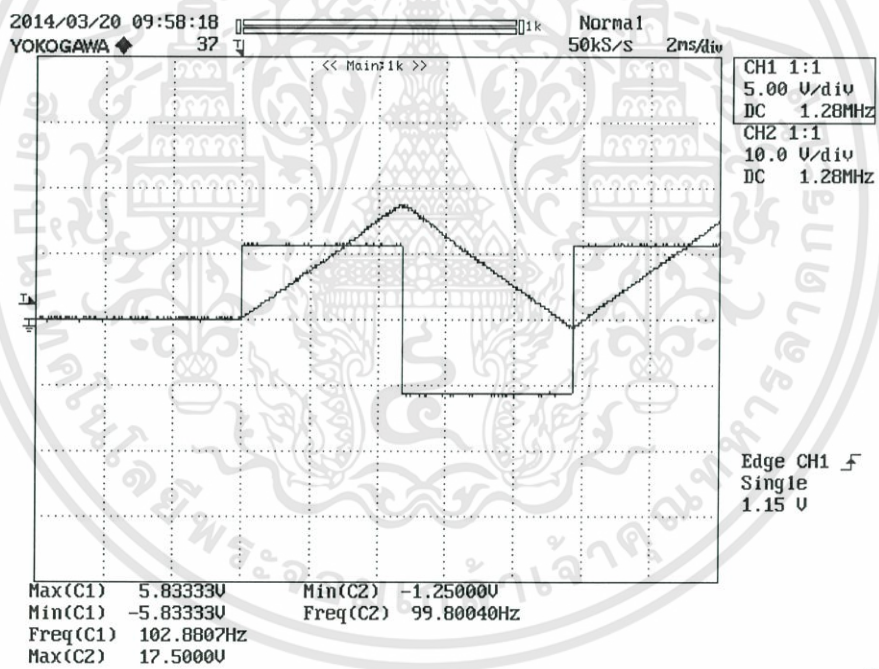


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

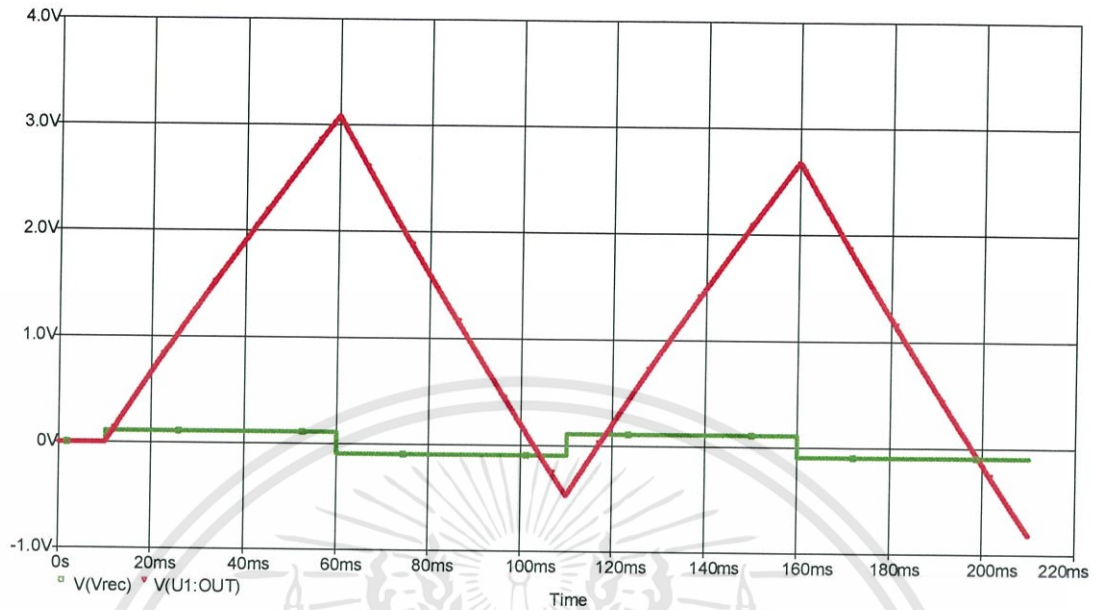


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 100 Hz

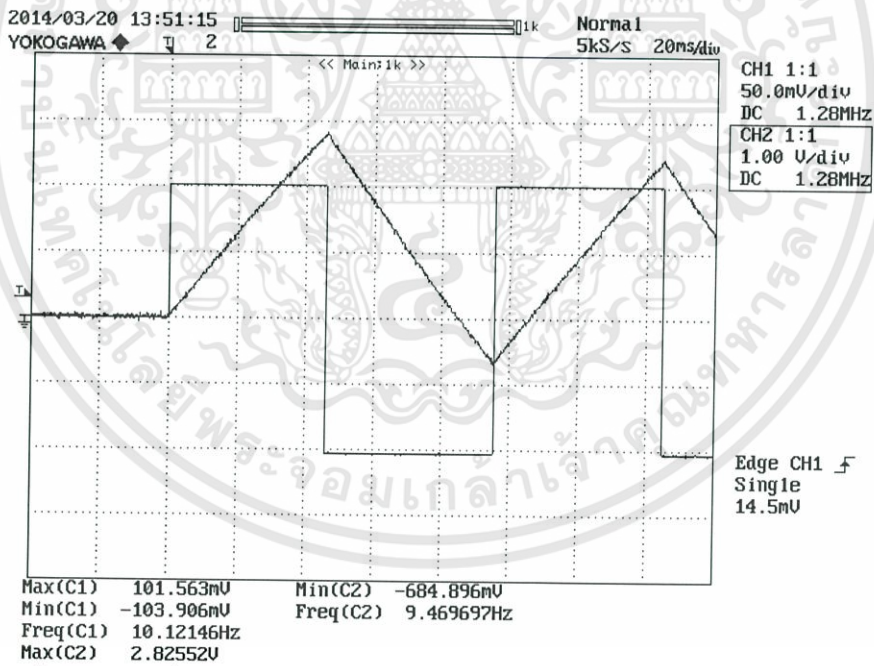


รูปที่ 4.4 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

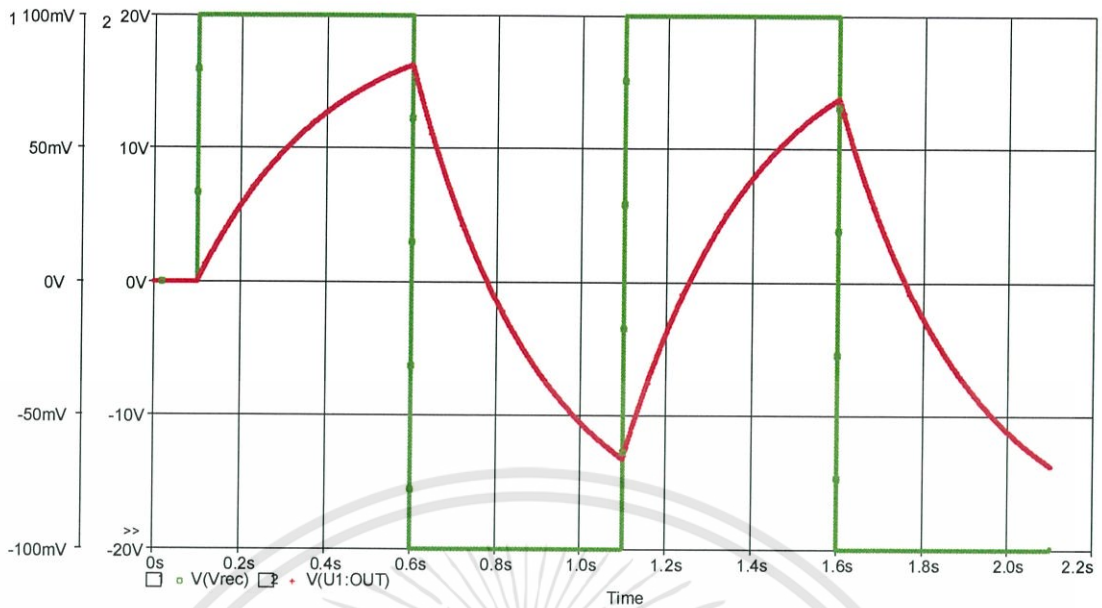


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว
เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 10 Hz

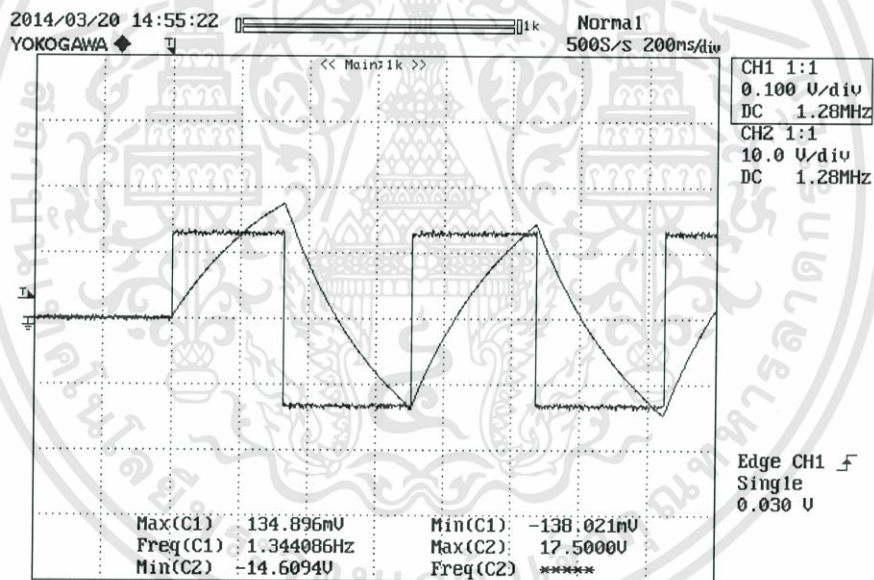


รูปที่ 4.6 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรูปคลื่นอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 1 Hz

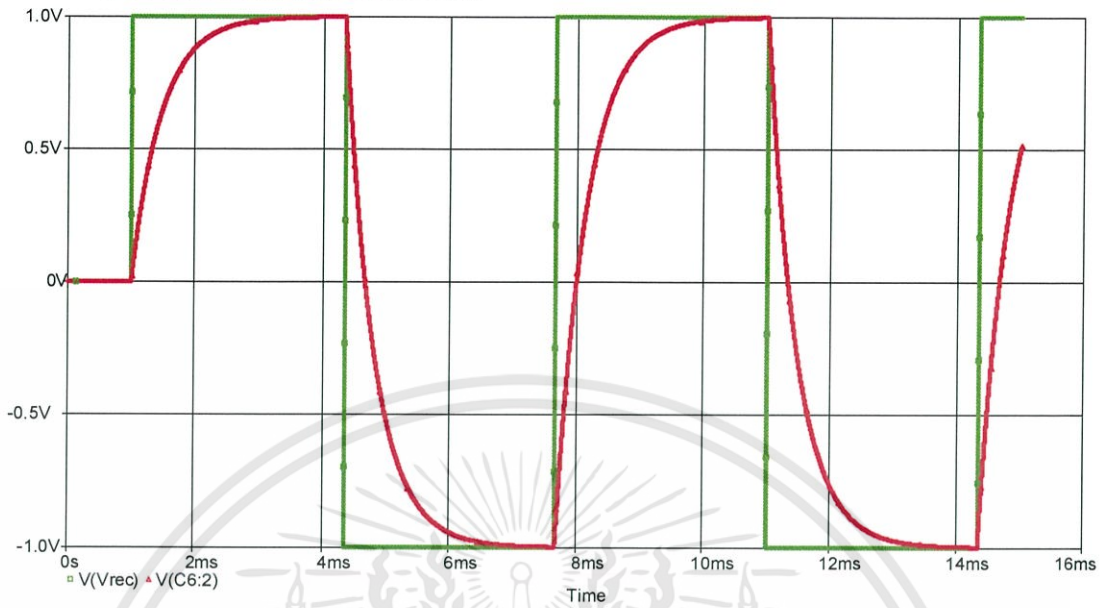


รูปที่ 4.8 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรูปคลื่นอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1 Hz

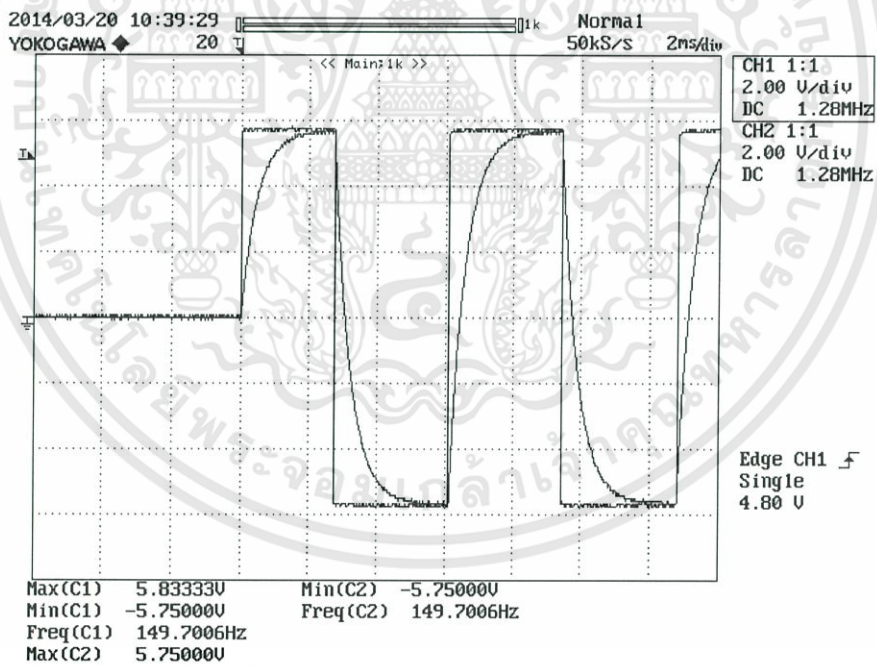
จากรูปที่ 4.1 – 4.8 พบว่า วงจรรูปคลื่นอินทิเกรตแบบไวงานที่ประกอบสร้างขึ้นสามารถอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 10 Hz – 150 Hz ได้ดี แต่ที่ความถี่ 1 Hz พบว่าวงจรรูปคลื่นอินทิเกรตที่ทำการประกอบสร้างขึ้นไม่สามารถทำการอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้เป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมตามทฤษฎีได้โดยจะพบว่าที่ความถี่ 1 Hz รูปสามเหลี่ยมที่ได้จากการอินทิเกรตจะมีส่วนโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

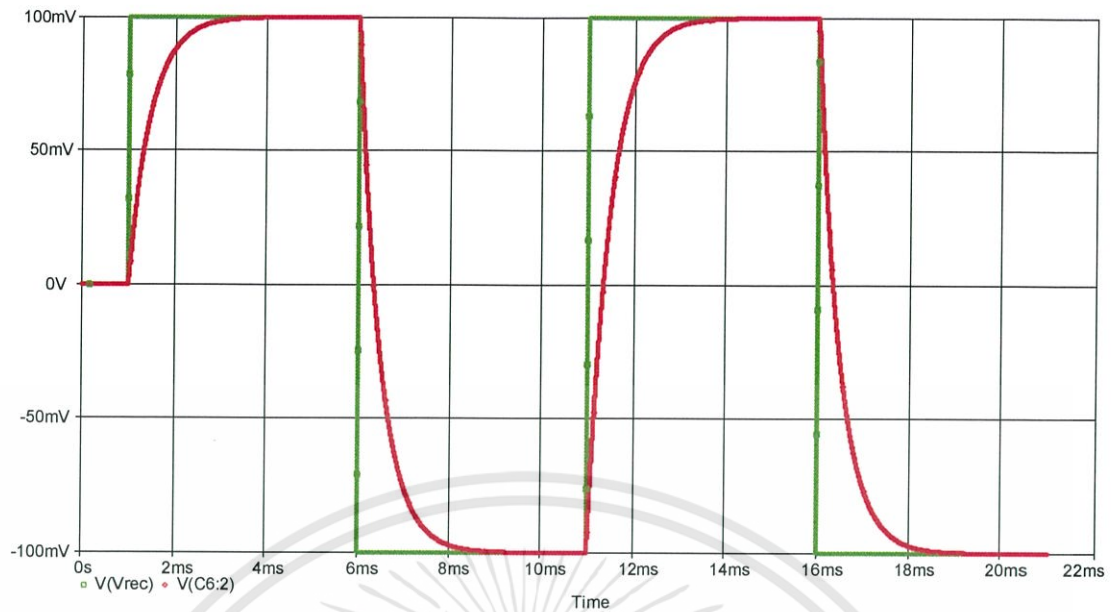


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 150 Hz

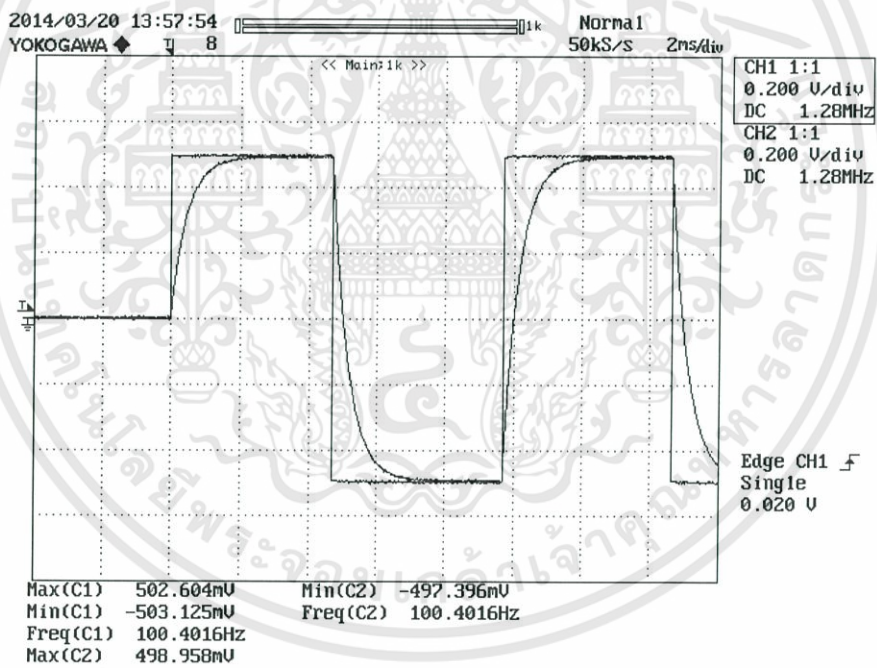


รูปที่ 4.10 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

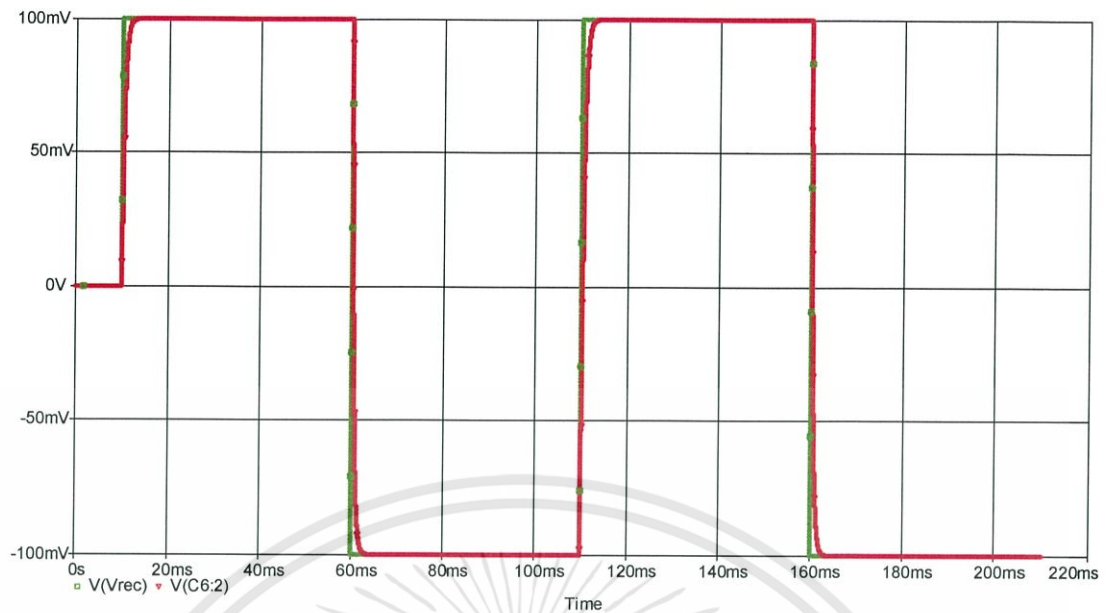


รูปที่ 4.11 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน
เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 100 Hz

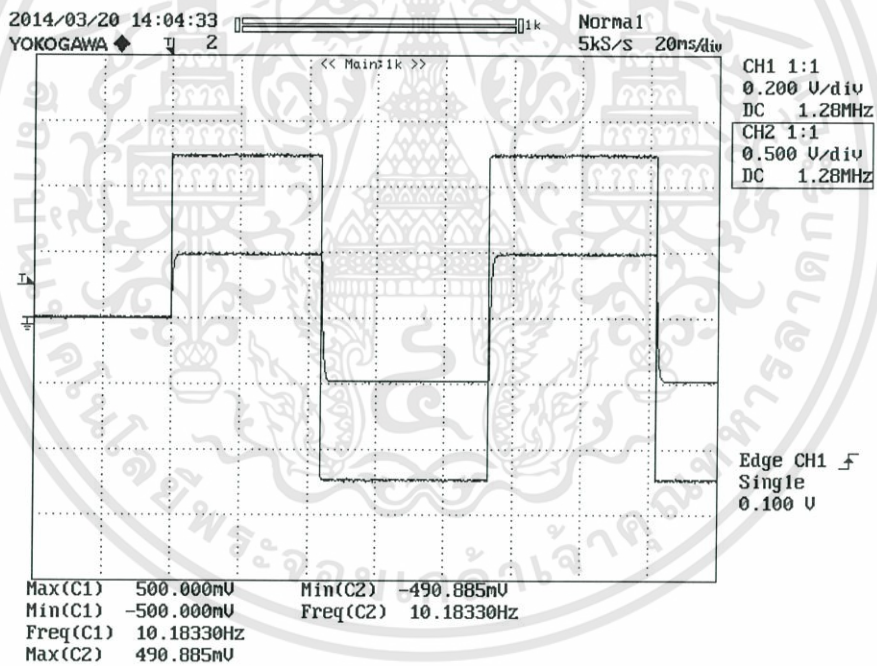


รูปที่ 4.12 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

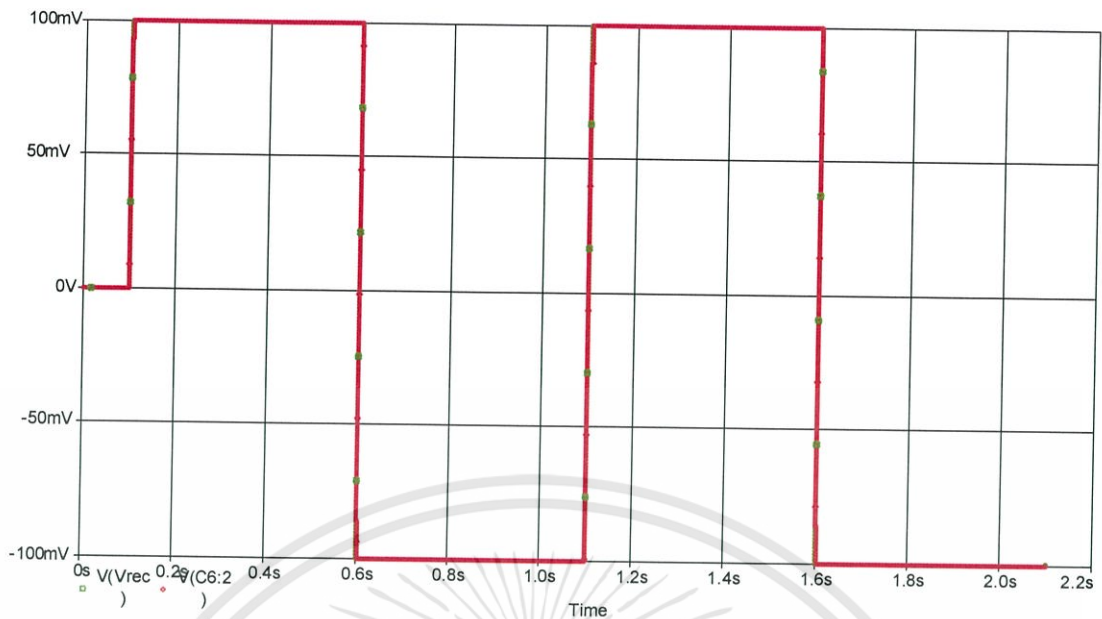


รูปที่ 4.13 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 10 Hz

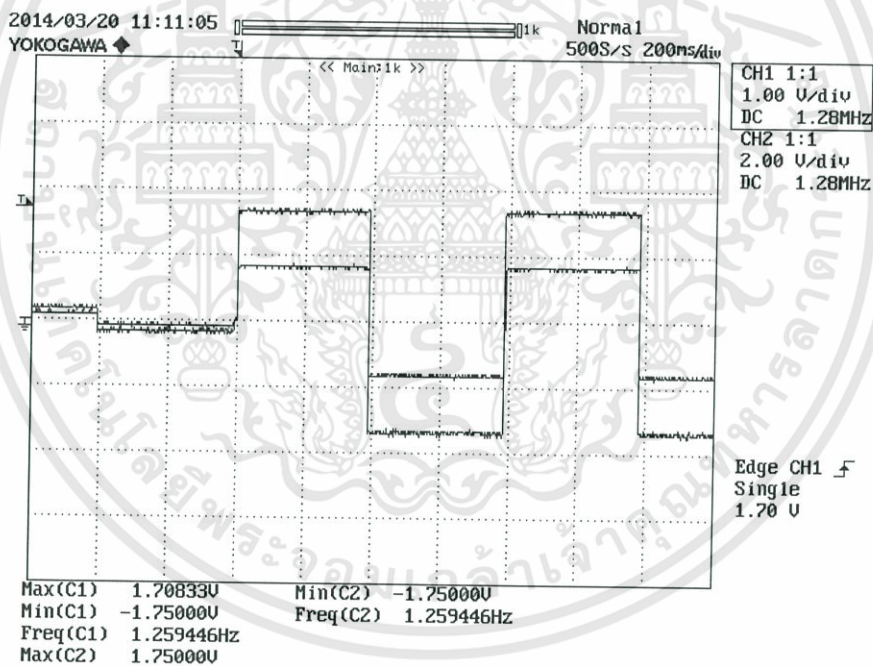


รูปที่ 4.14 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



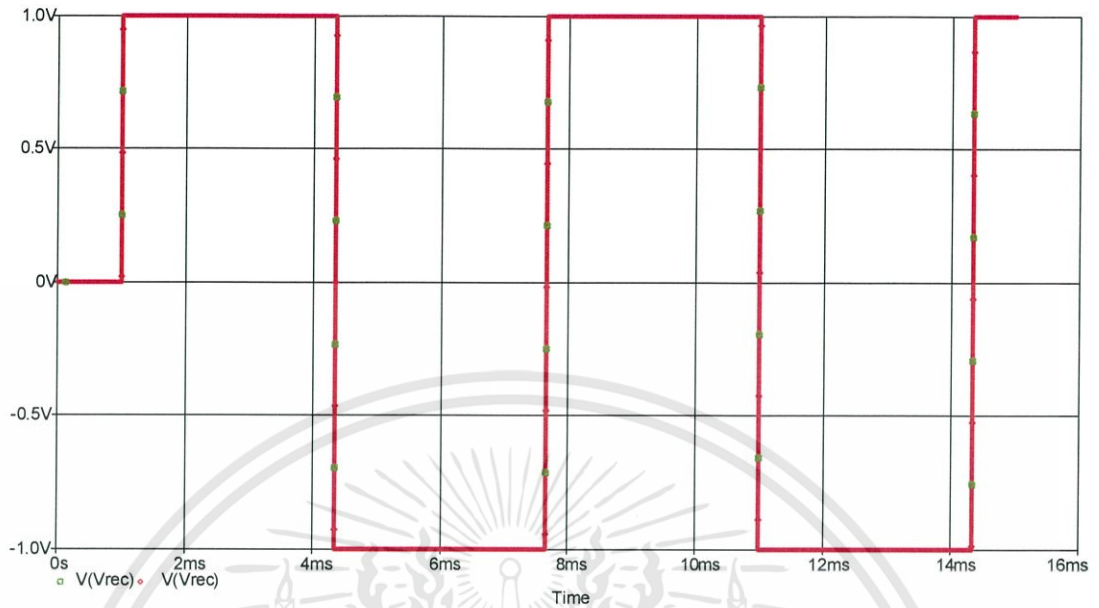
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน
เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 1 Hz



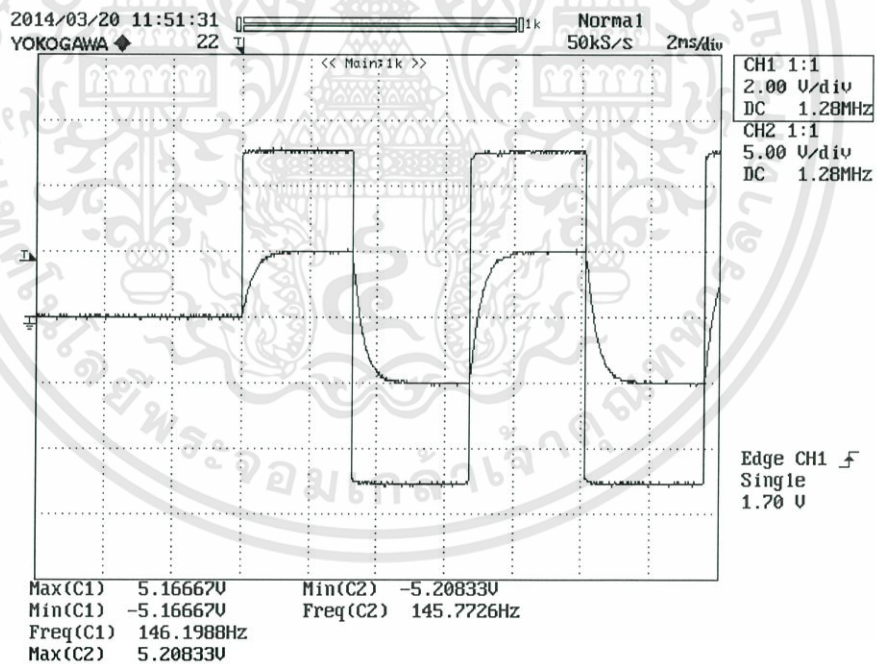
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงาน
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1 Hz

จากรูปที่ 4.9– 4.16 พบว่า วงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานไม่สามารถอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 Hz – 150 Hz ให้เป็นรูปสามเหลี่ยมตามทฤษฎีได้ ซึ่งพบว่ารูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้จากวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานตั้งแต่ความถี่ 1 Hz – 150 Hz มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยที่ 150 Hz รูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่หัวคลื่นมีลักษณะโค้งและความโค้งนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อลดความถี่ลง จนกระทั่งที่ความถี่ 1 Hz พบว่ารูปคลื่นแรงดันขาออกจากวงจรรีจิสเตอร์แบบเฉื่อยงานมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า

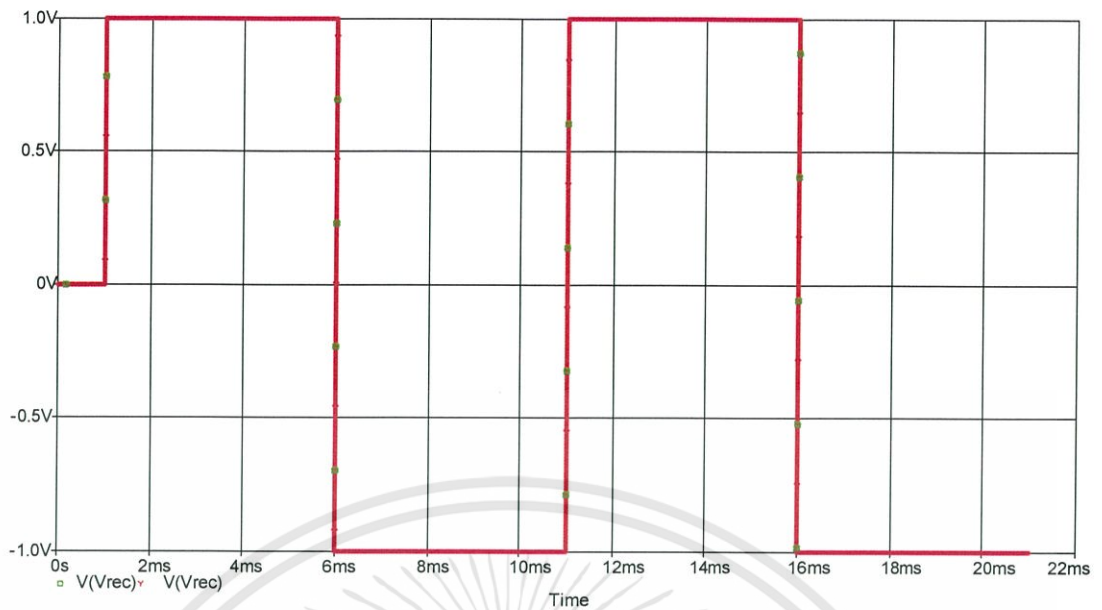


รูปที่ 4.17 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า
เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 150 Hz

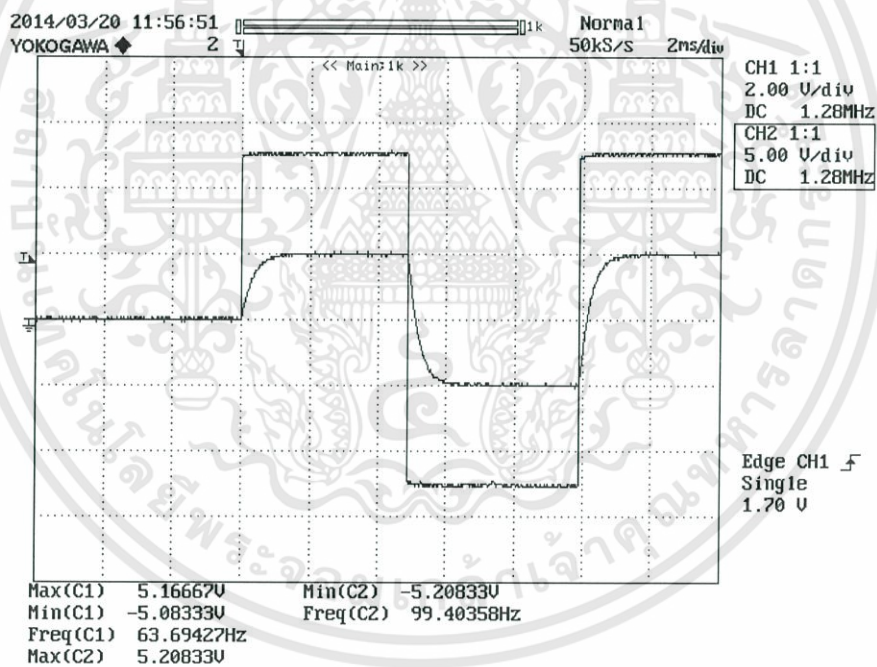


รูปที่ 4.18 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

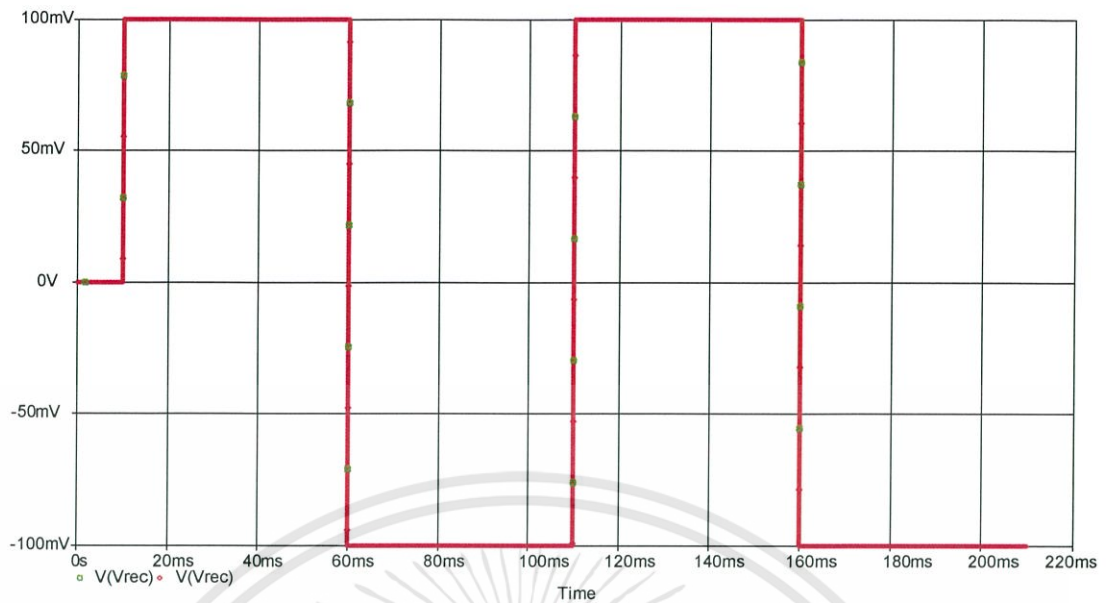


รูปที่ 4.19 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 100 Hz

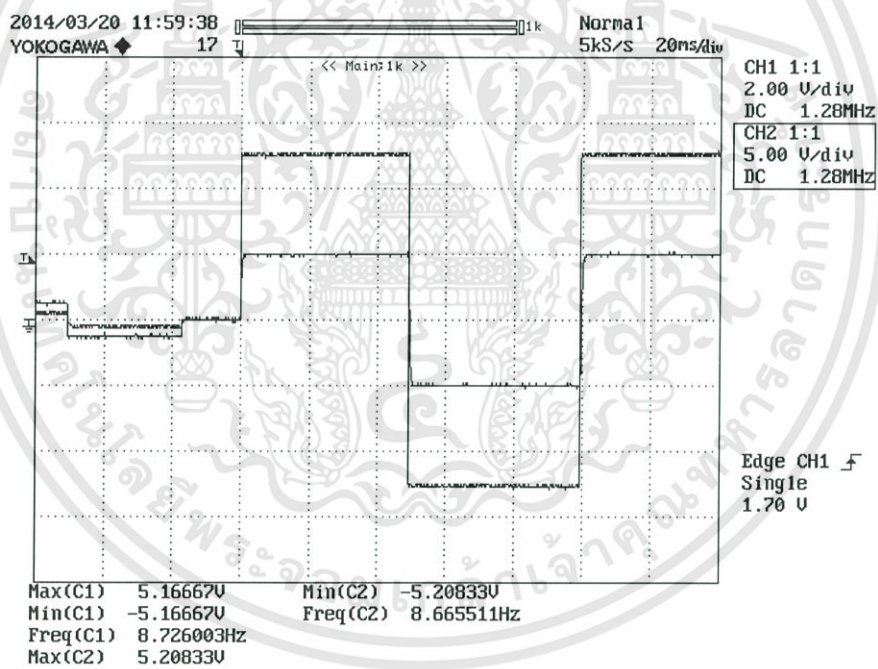


รูปที่ 4.20 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

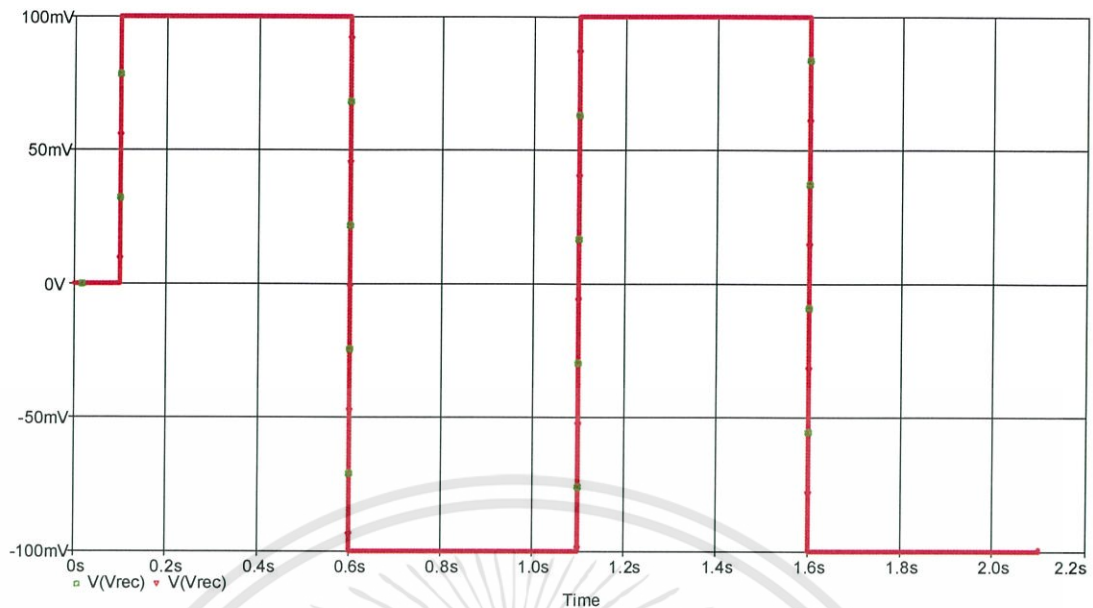


รูปที่ 4.21 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 10 Hz

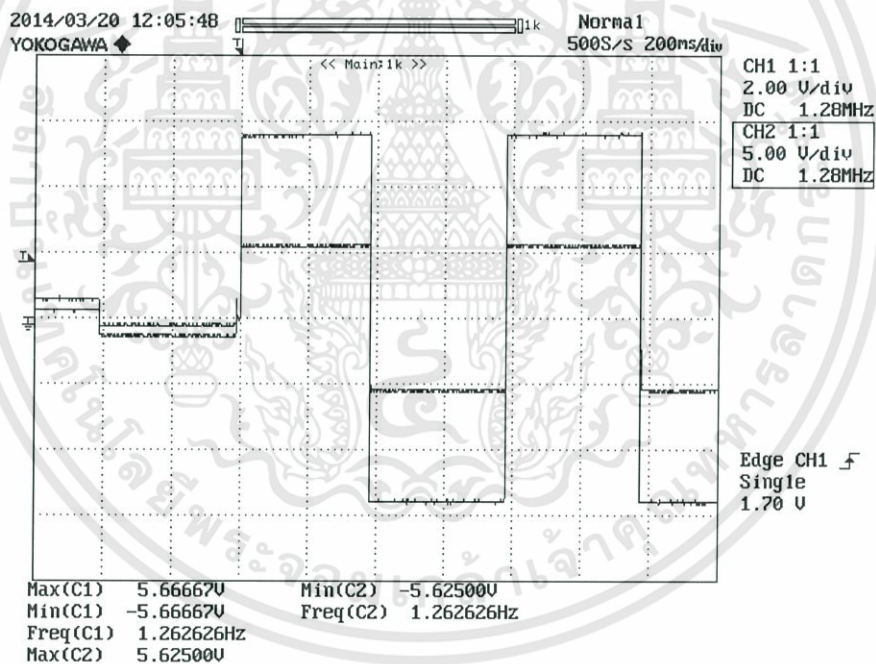


รูปที่ 4.22 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการ simulation ในโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ 1 Hz

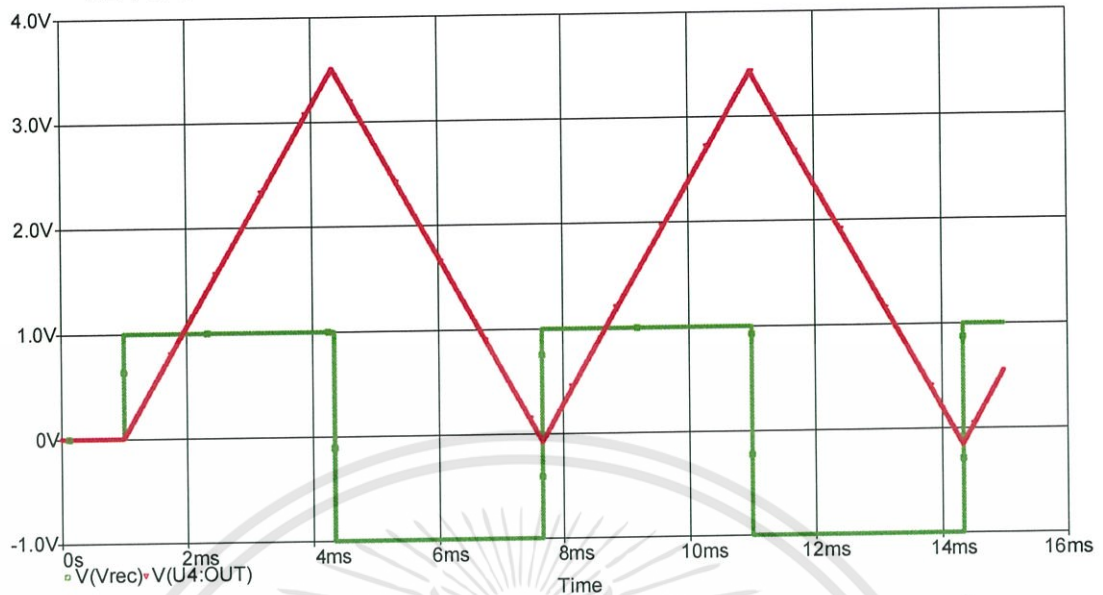


รูปที่ 4.24 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1 Hz

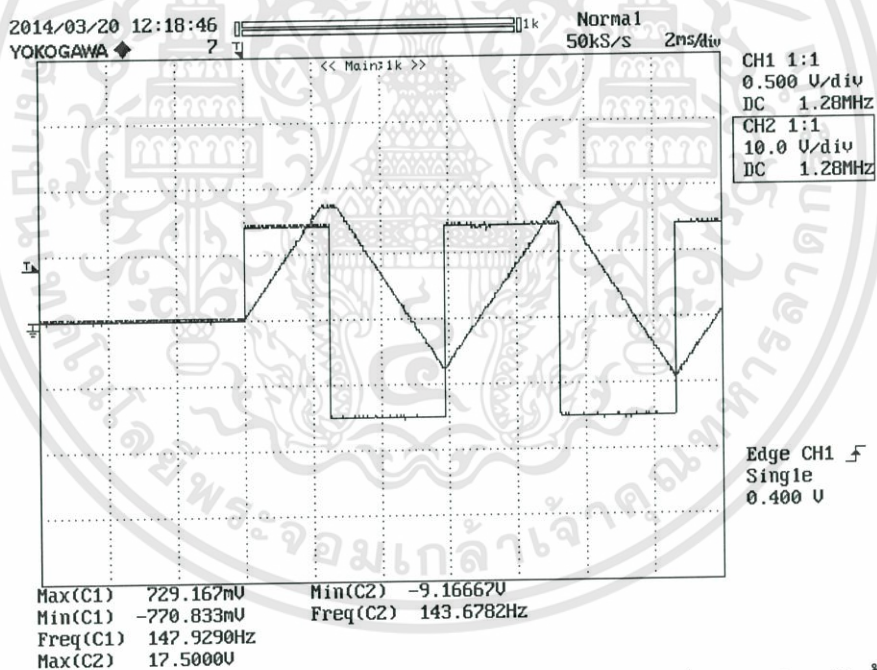
จากรูปที่ 4.17- 4.24 พบว่า วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าไม่สามารถอินทิเกรต รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 Hz – 150 Hz ให้เป็นรูปสามเหลี่ยมตามทฤษฎีได้ ซึ่งพบว่ารูปคลื่น แรงดันขาออกที่ได้จากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานตั้งแต่ความถี่ 1 Hz – 150 Hz มีลักษณะใกล้เคียง กับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดย ที่ 150 Hz รูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่หัวคลื่นมี ลักษณะโค้งและความโค้งนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อลดความถี่ลง จนกระทั่งที่ความถี่ 1 Hz พบว่ารูปคลื่น แรงดันขาออกจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

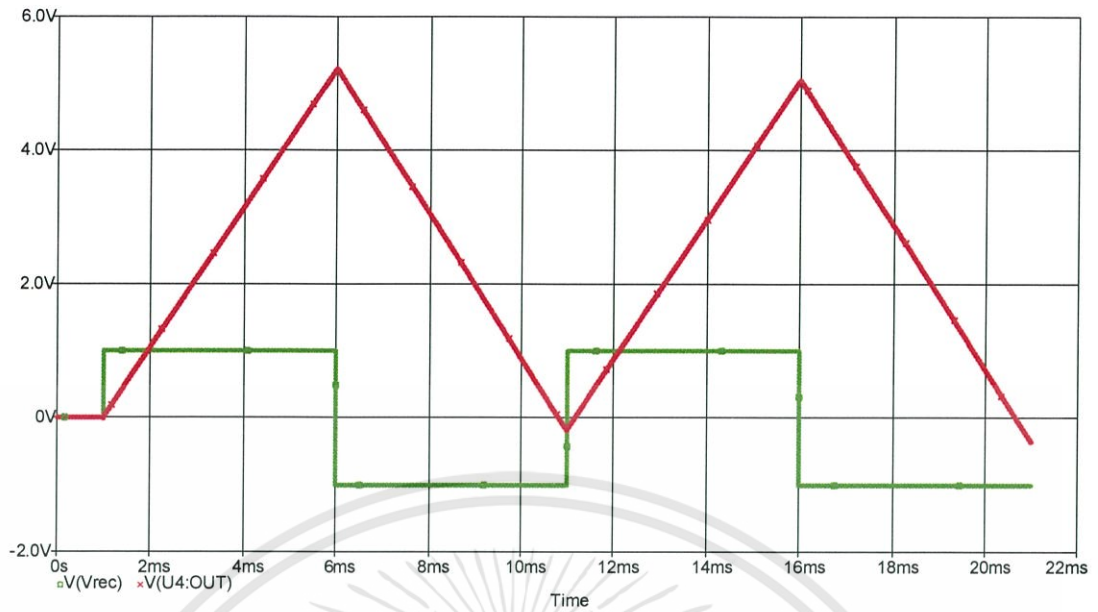
4.2.4 การทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับซ้ำ



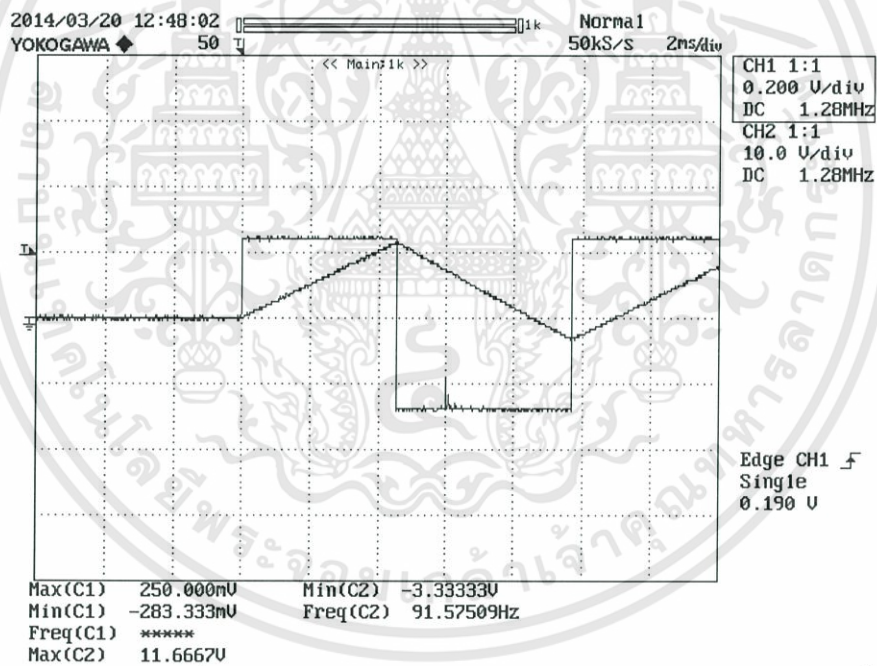
รูปที่ 4.25 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับซ้ำ
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 150 Hz



รูปที่ 4.26 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับซ้ำ
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 150 Hz

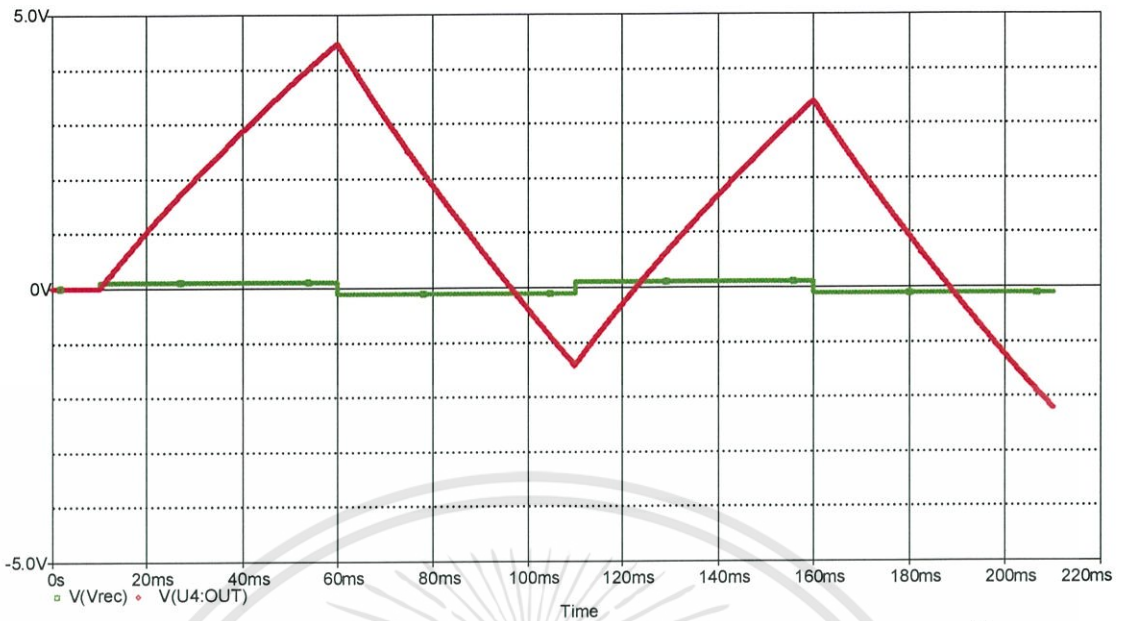


รูปที่ 4.27 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 100 Hz

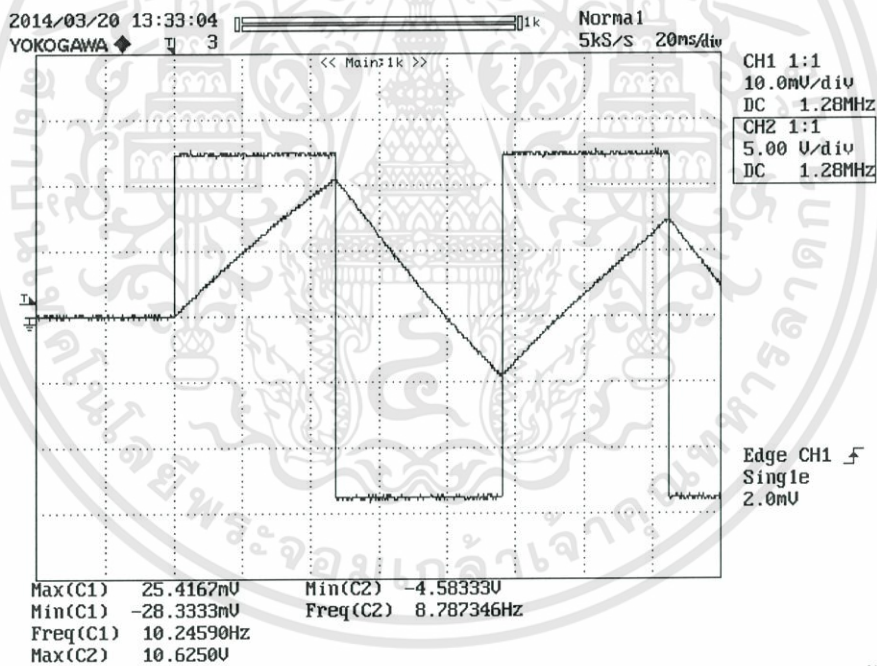


รูปที่ 4.28 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

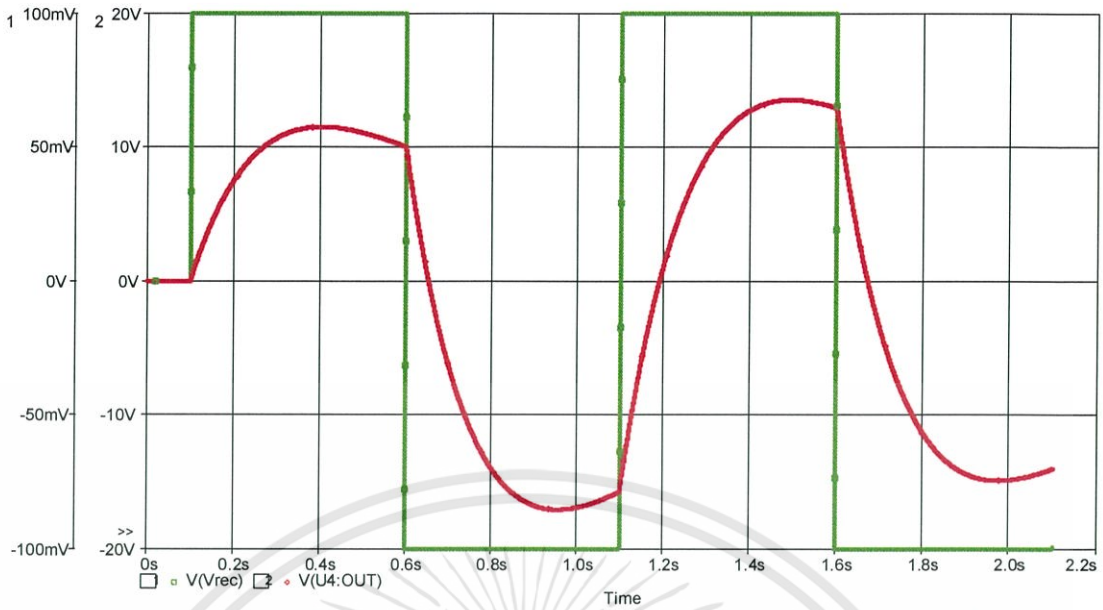


รูปที่ 4.29 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 Hz

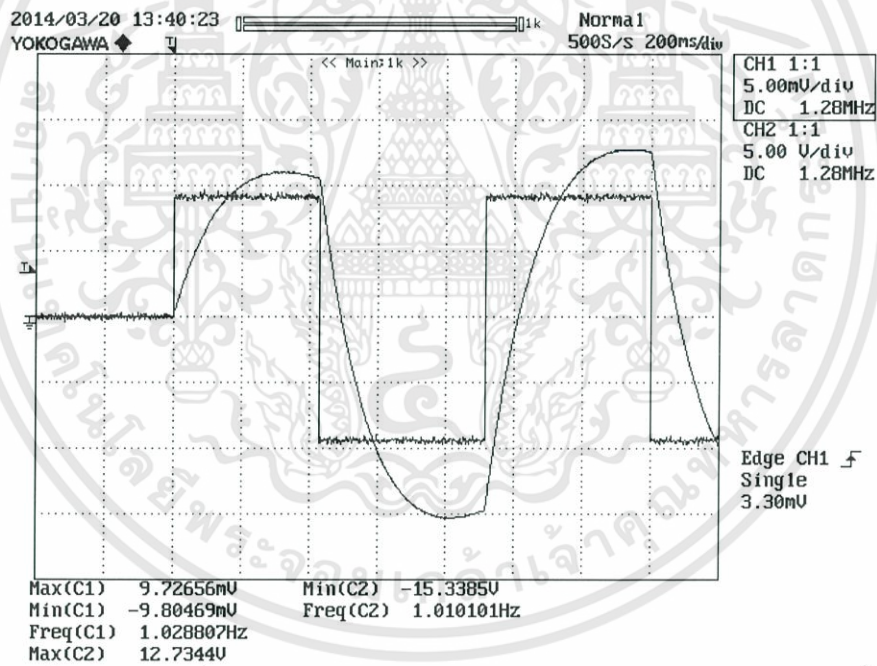


รูปที่ 4.30 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว
เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1 Hz



รูปที่ 4.32 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว เมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1 Hz

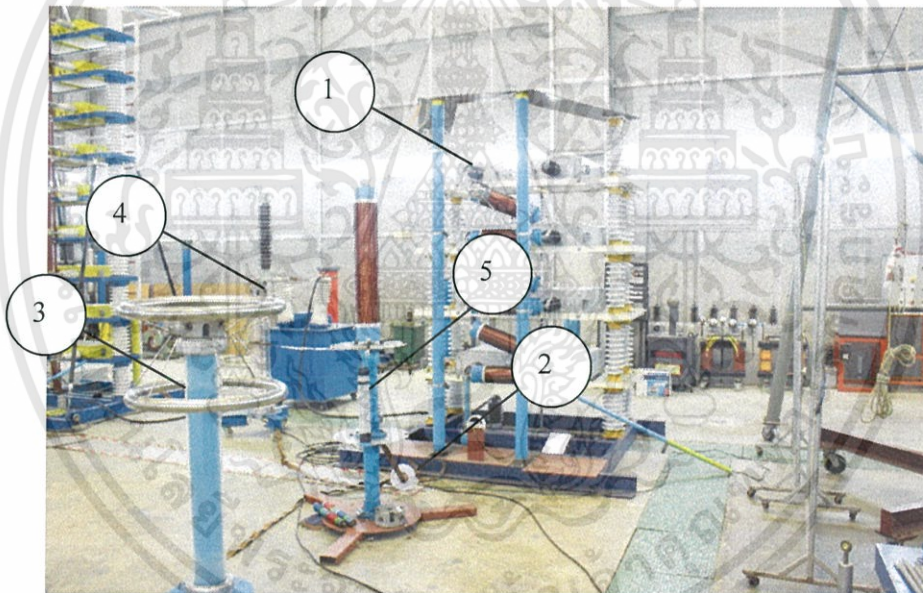
จากรูปที่ 4.25 – 4.32 พบว่า วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้วสามารถอินทิเกรต รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 10 Hz – 150 Hz ได้ดี แต่ที่ความถี่ 1 Hz พบว่าวงจรอินทิเกรตแบบ ไวงานชนิดกลับขั้วไม่สามารถทำการอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้เป็นรูปสามเหลี่ยมตามทฤษฎีได้โดย จะพบว่าที่ความถี่ 1 Hz รูปสามเหลี่ยมที่ได้จากการอินทิเกรตจะมีส่วนโค้ง

4.3 การทดสอบวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ช่วงยาวโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรรินทิเกรตแบบไวงานที่ประกอบสร้างขึ้นเปรียบเทียบกับวงจรรินทิเกรตแบบอื่นๆ

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

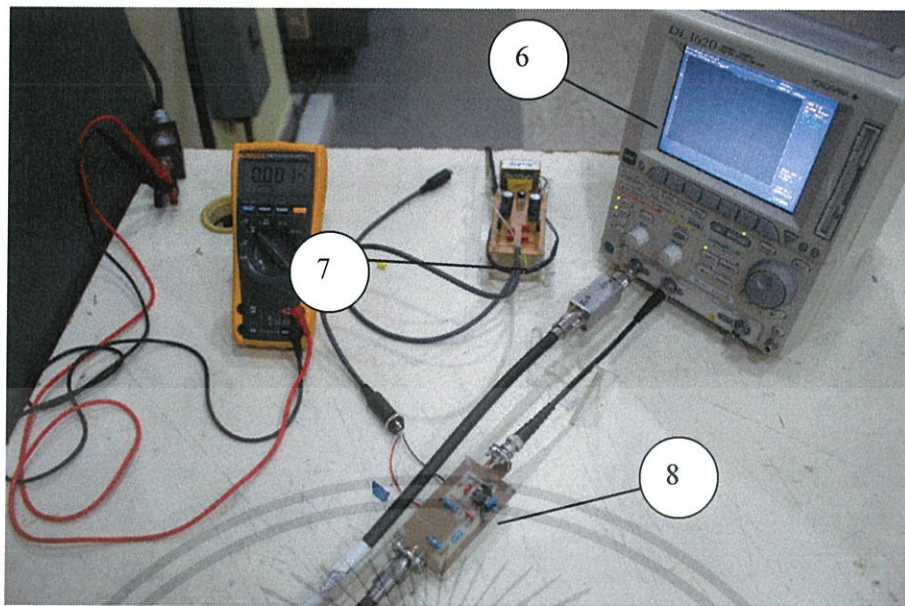
1) วงจรรินทิเกรตแบบไวงานที่ประกอบสร้างขึ้น	1 วงจร
2) วงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า	1 วงจร
3) วงจรรินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน	1 วงจร
4) วงจรรินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว	1 วงจร
5) ขดลวดโรกอฟสกี	1 วงจร
6) ตัวต้านทานไร้ความเหนียวนำ (Shunt resister)ขนาด 71 โอห์ม	1 ตัว
7) เครื่องกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์	1 เครื่อง
8) สายเคเบิล RG 8	6 เส้น
9) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป	1 เครื่อง

4.3.2 วงจรทดสอบจริง



รูป ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข)
รูปที่ 4.33 วงจรทดสอบจริง

อุปกรณ์ในวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.33 ประกอบด้วย

- 1) เครื่องกำเนิดกระแสสลับพัลส์
- 2) ขดลวดโรกอฟสกี
- 3), 4) อุปกรณ์แบ่งแรงดัน
- 5) ตัวต้านทานไร้ความเหนียวหนา (Shunt resistor)
- 6) ออสซิลโลสโคป
- 7) โวลต์มิเตอร์
- 8) วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วที่ประกอบสร้างขึ้น

4.3.3 วิธีการทดสอบ

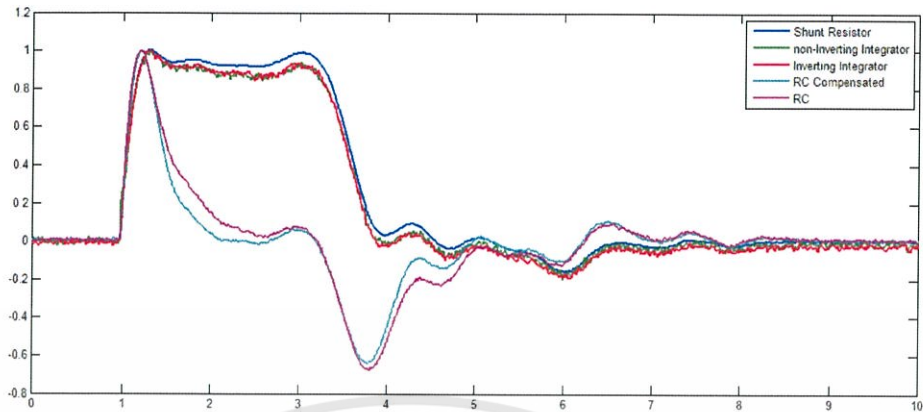
- 1) ต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 4.33
- 2) ทดสอบลัดวงจรโดยให้แรงดันอัดประจุ 30 KV
- 3) บันทึกผลการทดลอง

4.3.4 ผลการทดลอง

นำผลการทดสอบวัดกระแสสลับพัลส์ช่วงยาว 2 ms ของวงจรอินทิเกรตทั้ง 4 แบบมาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากตัวต้านทานไร้ความเหนียวหนา โดยทำการนอร์มอลไลซ์ข้อมูลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4.1 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2 ms (Long duration Impulse current)



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2ms ที่ถูกทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 4 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

จากรูปที่ 4.34 พบว่า รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2 ms ที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้วนั้นมีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกัน และลักษณะรูปคลื่นที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตทั้ง 2 ข้างต้น มีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นจากระบบวัดอ้างอิง ส่วนลักษณะรูปคลื่นจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่านั้นมีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นระบบวัดอ้างอิงอย่างมาก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ขดลวดโรกอฟสกีเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์ร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว ประกอบด้วยขดลวดโรกอฟสกีที่มีค่าความเหนี่ยวนำรวมเท่ากับ 0.16 ไมโครเฮนรี มีค่าความเหนี่ยวนำ 6.28 มิลลิเฮนรี ทำงานร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีค่าพารามิเตอร์ $R_m = 50 \Omega$, $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_p = 3 \text{ M}\Omega$, $C_1 = 100 \text{ nF}$, $C_2 = 100 \text{ nF}$ และมีอัตราขยายของระบบคือ 40 กิโลแอมแปร์ ต่อ 4 โวลต์ มีผลตอบสนองทางความถี่ระหว่าง 0.5 Hz – 3.3 MHz จากการทดสอบด้วยรูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยม พบว่า

- 1) วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วสามารถอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ในช่วง 10 Hz – 150 Hz ได้ดี
- 2) จากรูปที่ 4.13 – 4.16 พบว่า วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้วสามารถอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ในช่วง 10 Hz – 150 Hz ได้ดี
- 3) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าไม่สามารถอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ในช่วง 1 Hz – 150 Hz ได้
- 4) วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานไม่สามารถอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ในช่วง 1 Hz – 150 Hz ได้

จากการทดสอบวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2 ms พบว่ารูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2 ms ที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้วนั้นมีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกัน และลักษณะรูปคลื่นที่วัดได้จากวงจรอินทิเกรตทั้งสองมีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นจากระบบวัดอ้างอิง ส่วนลักษณะรูปคลื่นจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่านั้นมีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นระบบวัดอ้างอิงอย่างมาก

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ

ปัญหาและอุปสรรคที่พบในโครงการขดลวดโรกอฟสกีและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว มีดังนี้

- 1) มีปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนมาปะปนกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่วัดได้
- 2) ความสะอาดของแผ่นวงจร และการออกแบบลายวงจรมัน เป็นปัจจัยสำคัญอย่างมาก เนื่องจากวงจรวัดจะมีความไวต่อสภาพแวดล้อมรอบภายนอกอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แนวทางการพัฒนา

จากการทดสอบและศึกษาค้นคว้า จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสिमพัลส์จากการวัดกระแสिमพัลส์ช่วงยาว 2 ms โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วที่ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้น ยังคงมีความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นจากรูปคลื่นระบบวัดอ้างอิงเล็กน้อย โดยรูปคลื่นที่วัดได้ดังกล่าวมีความไม่คงตัวของค่าแรงดันยอดคลื่น และในการพัฒนาระบบวัดเพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น จึงควรพัฒนาการวัดกระแสिमพัลส์โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตให้สามารถวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ได้โดยไม่เกิดความไม่คงตัวของค่าแรงดันยอดคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นวคุณ ไตรรัตน์ภักษ์ และคณะ, “เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์”, *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [2] นรภัทร สุขสันติโชค และคณะ, “ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์”, *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [3] ชาตอริยะ ประเสริฐสังข์, “การออกแบบและพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว”, *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [4] สำรวัย สังข์สะอาด, *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร : คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [5] นุชนาฏ ชุ่มชื่นและคณะ, “การสร้างและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนแบบสื่อประสม เรื่องวงจรรองความถี่พาสซีฟ”, *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [6] พีรวุฒิ ยุทธโกวิท และคณะ, “อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดขดลวดโรกอฟสกี”, *โครงการวิจัย*, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์

ROGOWSKI COIL WITH AN ACTIVE INTEGRATOR FOR IMPULSE CURRENT MEASUREMENT

ทีศักดิ์ วัฒนะ พันธ์ ทองอินตะ พันธ์กรณ โคตพันธ์ พิฑูพร สุดเศวี
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 1 ซอย ลลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

ปฏิญานพินธ์นี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้าง วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเพื่อใช้วัดกระแสอิมพัลส์ ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี เมื่อวงจรอินทิเกรตทำงานร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีจะได้ระบบวัดที่มีอัตราขยาย 40 กิโลแอมแปร์ ต่อ 4 โวลต์ และมีผลตอบสนองต่อความถี่อยู่ในช่วง 0.5 เฮิร์ต ถึง 3.3 เมกะเฮิร์ต ทดสอบ วงจรอินทิเกรตก่อนนำไปวัดกระแสอิมพัลส์ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี โดยการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้แก่วงจร จากนั้นจึงทดสอบวงจรอินทิเกรตร่วมกับขดลวดโรกอฟสกีโดยการวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว 2 มิลลิวินาที เปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลจากการใช้วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน (Passive integrator) วงจรอินทิเกรตแบบชดเชยงาน (Compensated integrator) และวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว (Inverting active integrator) วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดเดียวกัน ร่วมกับขดลวดโรกอฟสกี และใช้ผลการวัดกระแสอิมพัลส์รูปเดียวกัน โดยใช้ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (Shunt resistor) เป็นผลอ้างอิงในการเปรียบเทียบ การทดสอบ พบว่า วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วมีความสามารถในการวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวได้ดีเทียบเท่ากับ วงจรอินทิเกรตแบบไวงาน และสามารถวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวได้ ดีกว่าวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบชดเชยงาน แต่ยังคงดีกว่าการวัดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวโดยใช้ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ

คำสำคัญ: ขดลวดโรกอฟสกี, วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว, การวัดกระแสอิมพัลส์

Abstract

This paper presents a design and construction of a non-inverting active integrator circuit for impulse currents measurement. When integrator circuit was used with Rogowski coil, measurement system's gain would be 4 kA / 4 V. Frequency response of system would be 0.5 Hz to 3.3 MHz. Integrator circuit was tested before using

with Rogowski coil by giving square wave voltage to it. Next, Tested integrator circuit with Rogowski coil by measuring 2 ms long duration impulse current. Compared test results with same impulse current measurement results by using RC integrator, RC compensated integrator and inverting active integrator with Rogowski coil. Same impulse current measurement by using shunt resistor was used to be the reference in comparison. From the experimental results, non-inverting active integrator circuit performance is same as inverting active integrator circuit performance, and both active integrator circuit performances have been better than passive integrator circuit performance and compensated integrator circuit performance but still worse than shunt resistor performance.

Keywords : Rogowski coil, non-inverting integrator circuit, impulse current measurement

1. บทนำ

กับดักแรงดันเกิน (surge arrester) เป็นอุปกรณ์ป้องกัน อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า หรือ แรงดันเกินที่เกิดจากการสับสวิตช์ในระบบไฟฟ้ากำลัง กับดักแรงดันเกินที่ติดตั้งต้องมีอิมพีแดนซ์สูงในสภาวะปกติ และเมื่อเกิดแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวจะต้องลดลงเพื่อจำกัดแรงดันเกินไม่ให้เกินกว่าระดับการป้องกันที่กำหนดไว้ ซึ่งก่อนนำกับดักแรงดันเกินไปใช้งานจะต้องมีการทดสอบวัฏจักรอื่นด้วยกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ดังนั้น การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยเครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญต่อการทดสอบกับดักแรงดันเกิน

วิธีการวัดกระแสอิมพัลส์มีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มี 2 วิธี คือ การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ (Shunt Resistor) และการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี (Rogowski Coil) จากสองวิธีข้างต้นการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานไว้ความเหนียวมีข้อเสียคือ อุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแสจะมีขนาดใหญ่ตามขนาดของกระแสที่ต้องการวัด และอุปกรณ์ดังกล่าวอาจกลายเป็นโหลดของวงจรทดสอบ อีกทั้งการวัดกระแสสัมผัสด้วยขดลวดโรกอฟสกีเป็นการวัดโดยคั่นออกจากภายนอกวงจรทดสอบ ดังนั้นเมื่อเกิดการเบรคควาน์หรือการวูบไฟตามคิวที่วัดทดสอบจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบบันทึกผลและปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงาน

2. ทฤษฎีการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรต

2.1 หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี[3]

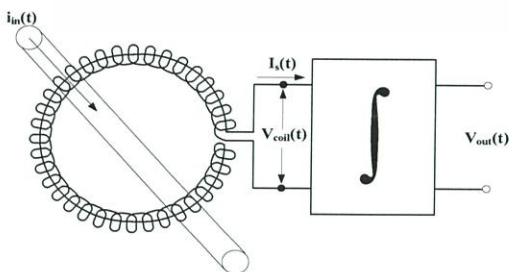
เมื่อนำขดลวด โรกอฟสกีไปคล้องล้อมรอบแท่งตัวนำที่มีกระแสไฟไหลผ่าน จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กจากแท่งตัวนำคั่นผ่านขดลวด โรกอฟสกี เมื่อกระแสไฟเปลี่ยนแปลงตามเวลา ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย ดังนั้น จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ปลายทั้งสองของขดลวด ถ้านำแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสมจะได้รูปคลื่นของกระแสที่ต้องการวัดปรากฏผลออกมาในรูปของแรงดันขาออกของวงจร

$$v_{out}(t) = -M \frac{di_{in}}{dt} \tag{1}$$

กำหนดให้ M คือความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวด โรกอฟสกีกับตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน และ I_{in} คือกระแสที่ต้องการวัด

$$i_{in}(t) = -M \int_0^t v_{coil}(t) dt \tag{2}$$

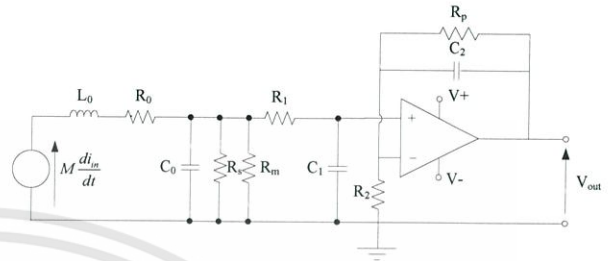
- เมื่อ
- v_c คือ แรงดันเหนี่ยวนำ (V)
 - i_{in} คือ กระแสปฐมภูมิ (A)
 - A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนขดลวด m^2
 - N คือ จำนวนรอบต่อความยาวแกน (turn/m)
 - ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)
 - μ_0 คือ สภาพใ้ห้ซึมได้ของสุญญากาศ



รูปที่ 1 หลักการวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกี

2.2 ขดลวดโรกอฟสกีต่อวงจรขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบวงงาน

อัตราขยายของขดลวด โรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบวงงานชนิดไม่กลับขั้ว สามารถแยกคิดแต่ละวงจรแล้วนำมาหาอัตราขยายรวมภายหลังได้



รูปที่ 2 วงจรขดลวด โรกอฟสกีต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบวงงาน

จากวงจรรูปที่ 2 จะได้อัตราขยายดังนี้
อัตราขยายของขดลวด โรกอฟสกี

$$G_1(s) = \frac{sM}{[s^2 C_0 L_0 + (\frac{L_0}{R_0} + R_0 C_0) s + (\frac{R_0}{R_1} + 1)]} \tag{3}$$

อัตราขยายของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

$$G_2(s) = \frac{1}{1 + R_1 C_1} \tag{4}$$

อัตราขยายของวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

$$G_3(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s + \frac{R_2 + R_p}{R_2 R_p C_2}}{s + \frac{1}{R_p C_2}} \tag{5}$$

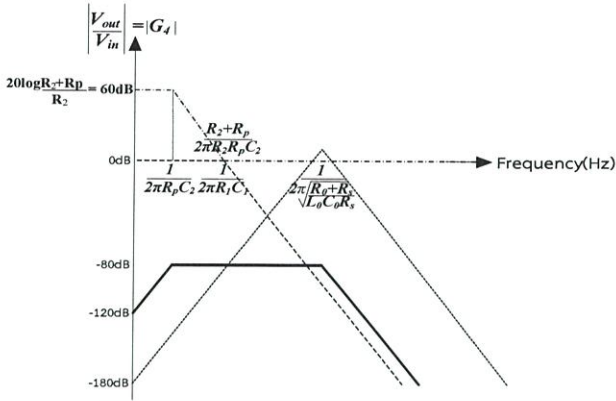
อัตราขยายรวมของระบบวัด

$$G_4(s) = G_1(s) \times G_2(s) \times G_3(s) \tag{6}$$

$$G_4(s) = \frac{\frac{M}{L_0 C_0} S}{s^2 + \frac{1}{R_0 C_0} S + \frac{1}{L_0 C_0}} \times \frac{1}{1 + R_1 C_1} \times \frac{s + \frac{R_2 + R_p}{R_2 R_p C_2}}{s + \frac{1}{R_p C_2}}$$

และกราฟผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดโรกอฟสกีเมื่อต่อขาออกเป็นวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว แสดงได้ดังรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 ผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวด โรกอฟสกีเมื่อต่อขาออกเป็น วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

3. การออกแบบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

3.1 การออกแบบสร้างวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

การวัดกระแสฮอลล์ด้วยวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วร่วมกับขดลวด โรกอฟสกีที่ทำการออกแบบจะมีคุณลักษณะของระบบวัดเป็นดังนี้

อัตราขยายของระบบวัด = $40 \text{ kA} / 4 \text{ V}$

ค่าความถี่จำกัดล่างของระบบ = 0.5 Hz

ค่าความถี่จำกัดบนของระบบ = 3.33 MHz

และค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ออกแบบ มีดังนี้

ค่าพารามิเตอร์ของขดลวด โรกอฟสกี

- $R_0 = 3 \Omega$
- $R_1 = 92 \Omega$
- $L_0 = 6.28 \mu\text{H}$
- $C_0 = 0.375 \text{ nF}$

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

- $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$
- $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$

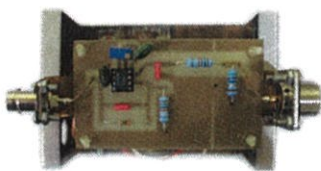
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรตแบบไวงาน

- $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$
- $R_p = 3 \text{ M}\Omega$

3.2 วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วที่ประกอบสร้าง

วงจรอินทิเกรตที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างแสดงดัง

รูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วที่ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การทดสอบและประเมินผล

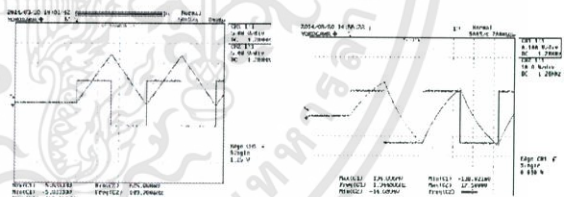
ทำการทดสอบวงจรอินทิเกรตแต่ละแบบก่อนนำไปวัดกระแสฮอลล์ช่วงยาว โดยการป้อนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อประเมินความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ที่ต้องการวัดและเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรอินทิเกรตแบบต่างๆ หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบการทดสอบวัดกระแสฮอลล์ช่วงยาว 2 ms โดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้วที่ประกอบสร้างขึ้นและวงจรอินทิเกรตแบบต่างๆ เพื่อดูประสิทธิภาพในการวัดกระแสฮอลล์ของแต่ละวงจร

4.1 การทดสอบวงจรอินทิเกรต

ทำการทดสอบวงจรอินทิเกรตแต่ละชนิดเพื่อดูผลตอบสนองต่อความถี่ที่ต้องการวัดก่อนนำวงจรอินทิเกรตไปทำการทดสอบวัดกระแสฮอลล์ช่วงยาว โดยการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดรูปคลื่น (Function generator) ให้กับวงจรอินทิเกรต ด้วยความถี่ 150 Hz และทำการเพื่อย่านความถี่ให้ต่ำลงเป็น 100 Hz 10 Hz และ 1 Hz จากนั้นสังเกตและเปรียบเทียบผลลัพธ์จากรูปคลื่นแรงดันขาออกของวงจร

4.1.1 วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้ว

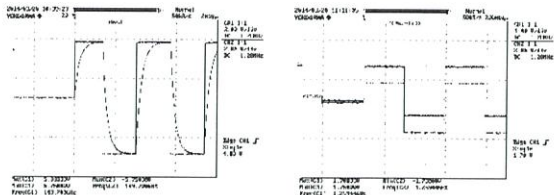
วงจรอินทิเกรตแบบไวงานที่ประกอบสร้างขึ้นสามารถอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 10 Hz - 150 Hz ได้ดี แต่ที่ความถี่ 1 Hz จะไม่สามารถทำการอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้เป็นไปตามทฤษฎีได้ โดยจะพบว่า รูปสามเหลี่ยมที่ได้จากการอินทิเกรตจะมีตัว โค้ง



รูปที่ 5 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้วเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz และ 1 Hz ตามลำดับ

4.1.2 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน

วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานไม่สามารถอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 Hz - 150 Hz ให้เป็นไปตามทฤษฎีได้ ซึ่งพบว่ารูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้จากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานตั้งแต่ความถี่ 1 Hz - 150 Hz มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยที่ 150 Hz รูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่หัวคลื่นมีลักษณะ โค้งและความ โค้งนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อลดความถี่ลง จนกระทั่งที่ความถี่ 1 Hz พบว่ารูปคลื่นแรงดันขาออกจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างมาก

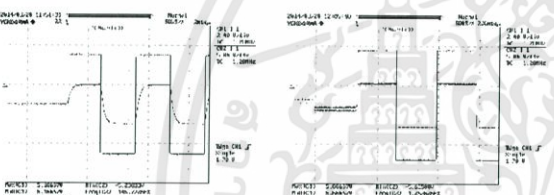


รูปที่ 6 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz และ 1 Hz ตามลำดับ

4.1.3 วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า

พบว่า วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าไม่สามารถ

อินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 Hz –150 Hz ให้เป็นไปตามทฤษฎีได้ ซึ่งพบว่ารูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้จากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานตั้งแต่ความถี่ 1 Hz – 150 Hz มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยที่ 150 Hz รูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่หัวคลื่นมีลักษณะโค้งและความโค้งนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อลดความถี่ลง จนกระทั่งที่ความถี่ 1 Hz พบว่ารูปคลื่นแรงดันขาออกจากวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างมาก

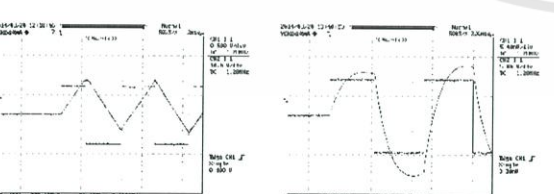


รูปที่ 7 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz และ 1 Hz ตามลำดับ

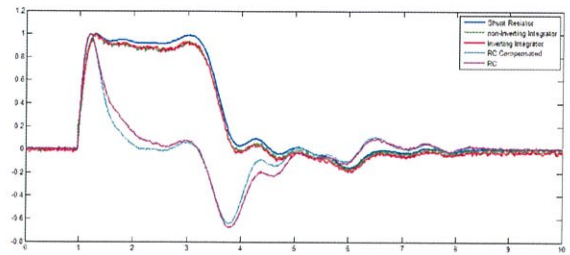
4.2.3 การทดสอบวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว

พบว่า วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้วสามารถ

อินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 10 Hz –150 Hz ได้ดี แต่ที่ความถี่ 1 Hz พบว่าวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้วไม่สามารถทำการอินทิเกรตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้เป็นไปตามทฤษฎีได้โดยจะพบว่าที่ความถี่ 1 Hz รูปสปรามสี่เหลี่ยมที่ได้จากการอินทิเกรตจะมีส่วนโค้ง



รูปที่ 8 รูปคลื่นขาเข้าและขาออกของวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วเมื่อทำการจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 150 Hz และ 1 Hz ตามลำดับ



รูปที่ 9 เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสมีพัลส์ช่วงยาว 2 ms ที่ถูกทำให้เป็นหนึ่งหน่วยของอินทิเกรตทั้ง 4 แบบกับระบบวัดอ้างอิง

5. สรุปผลการทดลอง

เมื่อทำการทดสอบระบบวัดกระแสมีพัลส์ที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้น โดยนำไปวัดรูปกระแสมีพัลส์ช่วงยาว 2 มิลลิวินาที จากนั้นเปรียบเทียบผลการวัดรูปคลื่นกระแสมีพัลส์กับกรวัดด้วยตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ และวัดกระแสมีพัลส์ด้วยขดลวด โรกอฟสกี ร่วมกับวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงาน วงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่าและวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว ผลการทดสอบพบว่า วงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดไม่กลับขั้วที่ประกอบสร้างขึ้น มีความสามารถในการวัดกระแสมีพัลส์ช่วงยาว 2 มิลลิวินาที ได้ดีเทียบเท่ากับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานชนิดกลับขั้ว และได้ดีกว่าวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานและวงจรอินทิเกรตแบบเฉื่อยงานชดเชยค่า แต่ยังคงดีกว่าการใช้ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาดิอริยะ ประเสริฐสังข์, “การออกแบบและพัฒนาคircuit กำหนดกระแสมีพัลส์ช่วงยาว”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [2] นรภัทร สุขสันติโชค และคณะ, “ขดลวด โรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบไวงานเพื่อวัดกระแสมีพัลส์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [3] ตำรวจ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [4] พีรวุฒิ ยุทธโกวิท และคณะ, “อุปกรณ์วัดกระแสมีพัลส์ชนิดขดลวดโรกอฟสกี”, โครงการวิจัย, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
Datasheet Op-Amp LF411CN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF411

Low Offset, Low Drift JFET Input Operational Amplifier

General Description

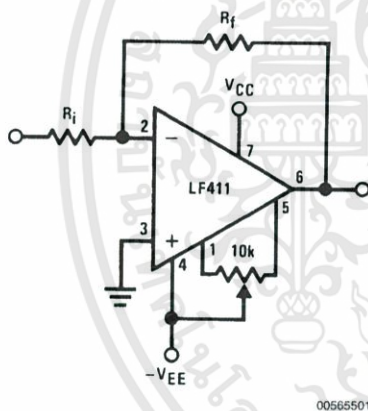
These devices are low cost, high speed, JFET input operational amplifiers with very low input offset voltage and guaranteed input offset voltage drift. They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF411 is pin compatible with the standard LM741 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage and drift, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth.

Features

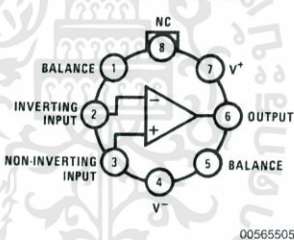
■ Internally trimmed offset voltage:	0.5 mV(max)
■ Input offset voltage drift:	10 μ V/ $^{\circ}$ C(max)
■ Low input bias current:	50 pA
■ Low input noise current:	0.01 pA/ \sqrt Hz
■ Wide gain bandwidth:	3 MHz(min)
■ High slew rate:	10V/ μ s(min)
■ Low supply current:	1.8 mA
■ High input impedance:	$10^{12}\Omega$
■ Low total harmonic distortion:	$\leq 0.02\%$
■ Low 1/f noise corner:	50 Hz
■ Fast settling time to 0.01%:	2 μ s

Typical Connection



Connection Diagrams

Metal Can Package



Note: Pin 4 connected to case.

Top View

Order Number LF411ACH
or LF411MH/883 (Note 11)
See NS Package Number H08A

00565505

Ordering Information

LF411XYZ

X indicates electrical grade

Y indicates temperature range

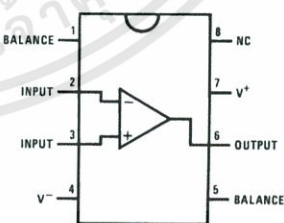
"M" for military

"C" for commercial

Z indicates package type

"H" or "N"

Dual-In-Line Package



Top View

Order Number LF411ACN, LF411CN
See NS Package Number N08E

00565507

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

	LF411A	LF411		H Package	N Package
Supply Voltage	±22V	±18V	$T_{j,max}$	150°C	115°C
Differential Input Voltage	±38V	±30V	θ_{jA}	162°C/W (Still Air)	120°C/W
Input Voltage Range (Note 2)	±19V	±15V		65°C/W (400 LF/min Air Flow)	
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	θ_{jC}	20°C/W	
			Operating Temp. Range	(Note 4)	(Note 4)
			Storage Temp. Range	-65°C ≤ T _A ≤ 150°C	-65°C ≤ T _A ≤ 150°C
			Lead Temp. (Soldering, 10 sec.)	260°C	260°C
Power Dissipation (Notes 3, 10)	H Package 670 mW	N Package 670 mW	ESD Tolerance		Rating to be determined.

DC Electrical Characteristics (Note 5)

Symbol	Parameter	Conditions	LF411A			LF411			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _{OS}	Input Offset Voltage	R _S =10 kΩ, T _A =25°C		0.3	0.5		0.8	2.0	mV
ΔV _{OS} /ΔT	Average TC of Input Offset Voltage	R _S =10 kΩ (Note 6)		7	10		7	20 (Note 6)	μV/°C
I _{OS}	Input Offset Current	V _S =±15V (Notes 5, 7)	T _J =25°C	25	100	25	100	pA	
			T _J =70°C		2		2	nA	
			T _J =125°C		25		25	nA	
I _B	Input Bias Current	V _S =±15V (Notes 5, 7)	T _J =25°C	50	200	50	200	pA	
			T _J =70°C		4		4	nA	
			T _J =125°C		50		50	nA	
R _{IN}	Input Resistance	T _J =25°C		10 ¹²		10 ¹²		Ω	
A _{VOL}	Large Signal Voltage Gain	V _S =±15V, V _O =±10V, R _L =2k, T _A =25°C	50	200	25	200		V/mV	
		Over Temperature	25	200	15	200		V/mV	
V _O	Output Voltage Swing	V _S =±15V, R _L =10k	±12	±13.5	±12	±13.5		V	
V _{CM}	Input Common-Mode Voltage Range		±16	+19.5	±11	+14.5		V	
				-16.5		-11.5		V	
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	R _S ≤10k	80	100	70	100		dB	
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 8)	80	100	70	100		dB	
I _S	Supply Current		1.8	2.8	1.8	3.4		mA	

AC Electrical Characteristic (Note 5)

Symbol	Parameter	Conditions	LF411A			LF411			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
SR	Slew Rate	V _S =±15V, T _A =25°C	10	15		8	15		V/μs
GBW	Gain-Bandwidth Product	V _S =±15V, T _A =25°C	3	4		2.7	4		MHz
e _n	Equivalent Input Noise Voltage	T _A =25°C, R _S =100Ω, f=1 kHz		25			25		nV/√Hz
i _n	Equivalent Input Noise Current	T _A =25°C, f=1 kHz		0.01			0.01		pA/√Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC Electrical Characteristic (Note 5) (Continued)

Symbol	Parameter	Conditions	LF411A			LF411			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
THD	Total Harmonic Distortion	$A_V=+10$, $R_L=10k$, $V_O=20$ Vp-p, $BW=20$ Hz–20 kHz		<0.02			<0.02		%

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits.

Note 2: Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

Note 3: For operating at elevated temperature, these devices must be derated based on a thermal resistance of θ_{JA} .

Note 4: These devices are available in both the commercial temperature range $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 70^\circ\text{C}$ and the military temperature range $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq 125^\circ\text{C}$. The temperature range is designated by the position just before the package type in the device number. A "C" indicates the commercial temperature range and an "M" indicates the military temperature range. The military temperature range is available in "H" package only.

Note 5: Unless otherwise specified, the specifications apply over the full temperature range and for $V_S = \pm 20\text{V}$ for the LF411A and for $V_S = \pm 15\text{V}$ for the LF411. V_{OS} , I_B , and I_{OS} are measured at $V_{CM} = 0$.

Note 6: The LF411A is 100% tested to this specification. The LF411 is sample tested to insure at least 90% of the units meet this specification.

Note 7: The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature, T_J . Due to limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation, P_D . $T_J = T_A + \theta_{JA} P_D$ where θ_{JA} is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.

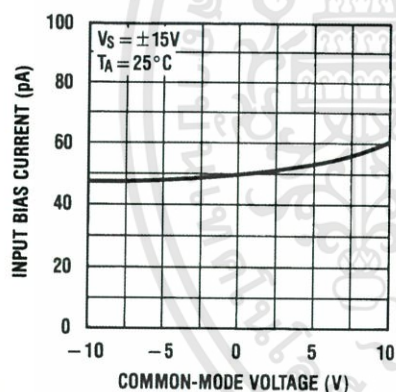
Note 8: Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practice, from $\pm 15\text{V}$ to $\pm 5\text{V}$ for the LF411 and from $\pm 20\text{V}$ to $\pm 5\text{V}$ for the LF411A.

Note 9: RETS 411X for LF411MH and LF411MJ military specifications.

Note 10: Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.

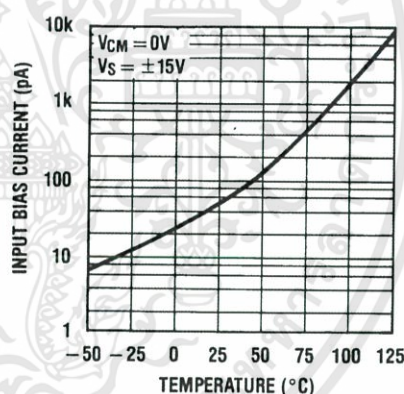
Typical Performance Characteristics

Input Bias Current



00565511

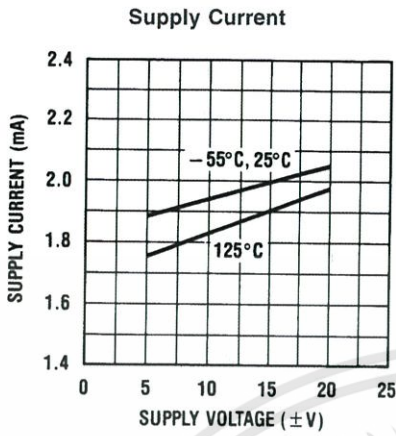
Input Bias Current



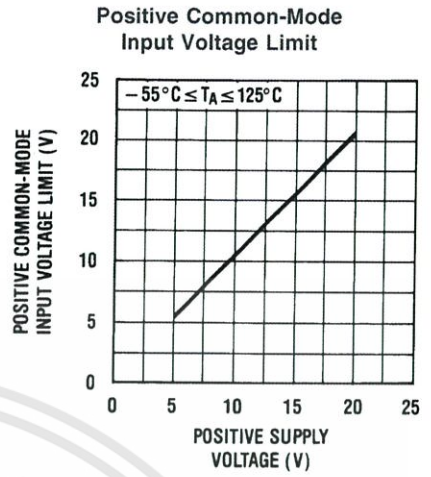
00565512

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

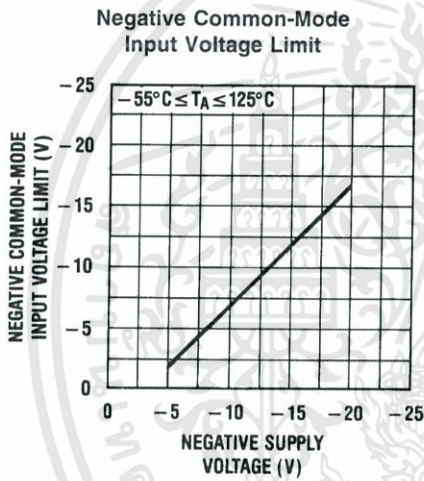
Typical Performance Characteristics (Continued)



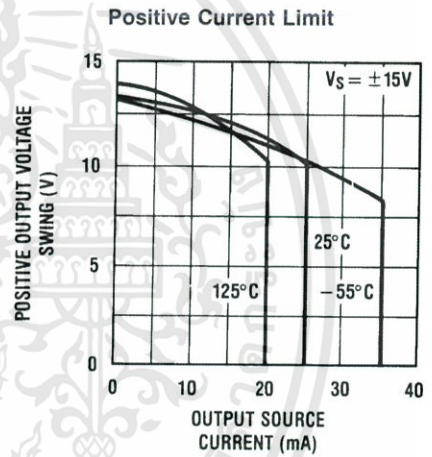
00565513



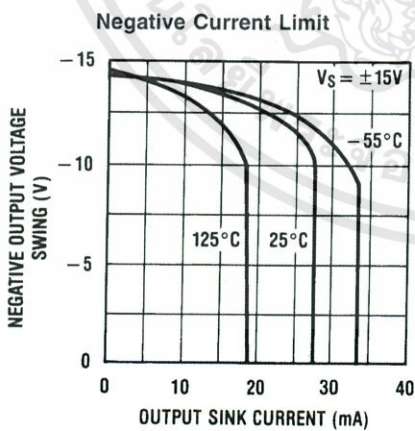
00565514



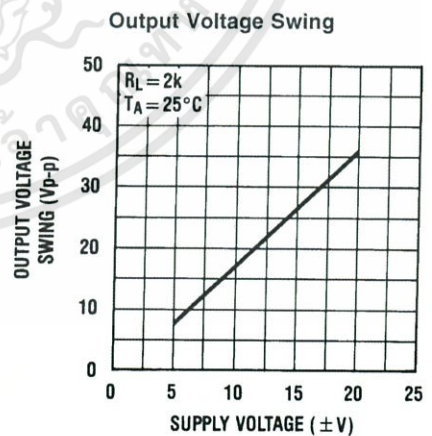
00565515



00565516



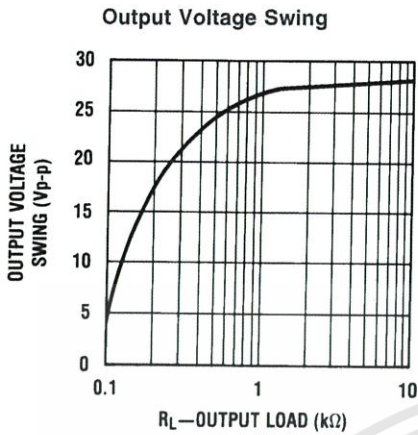
00565517



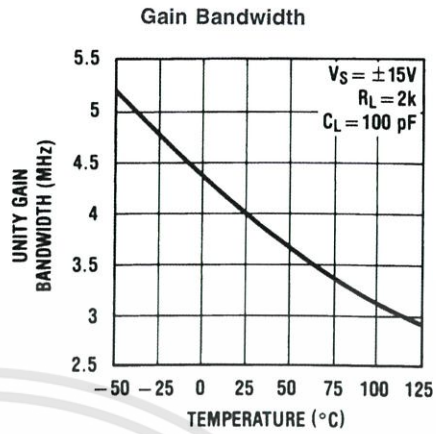
00565518

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

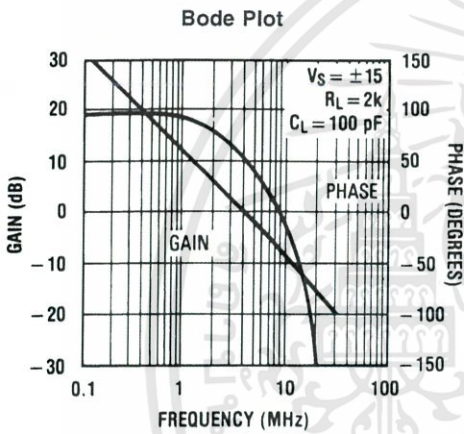
Typical Performance Characteristics (Continued)



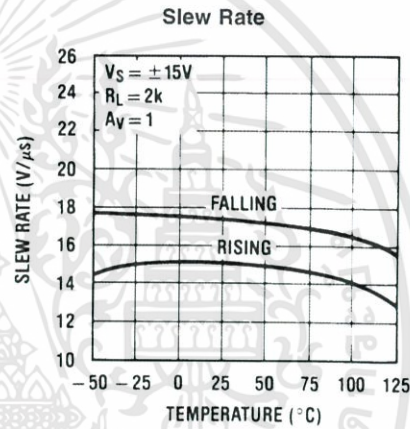
00565519



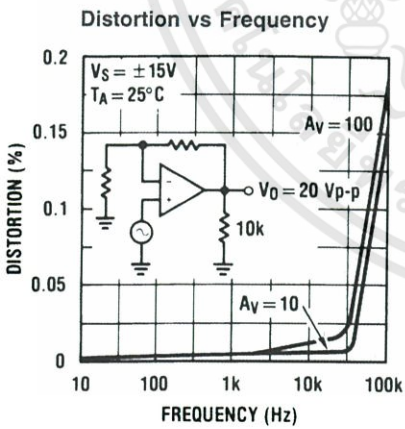
00565520



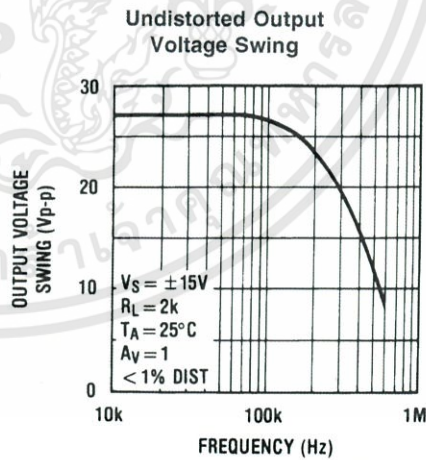
00565521



00565522



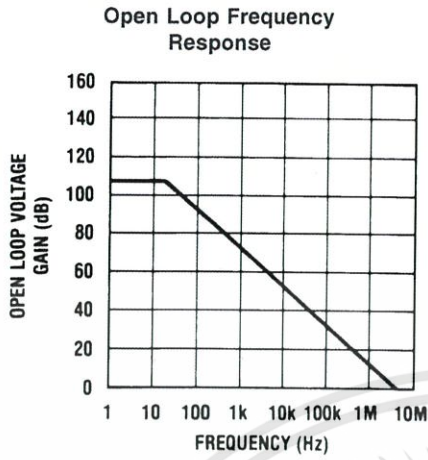
00565523



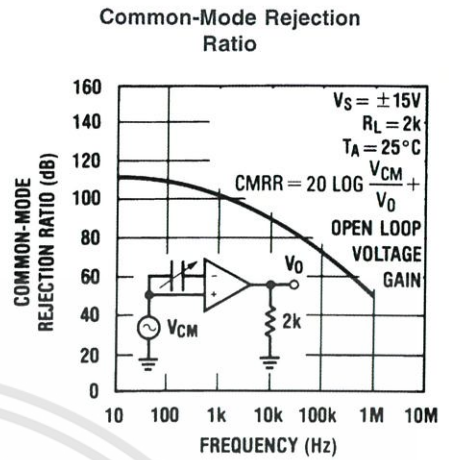
00565524

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

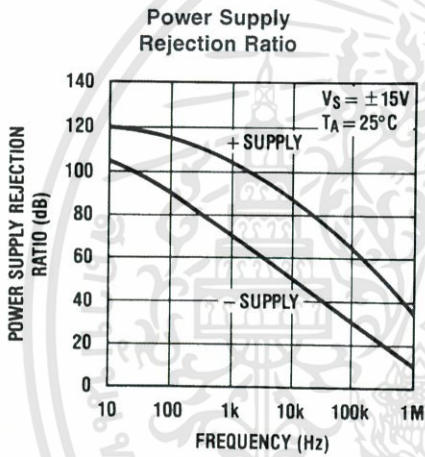
Typical Performance Characteristics (Continued)



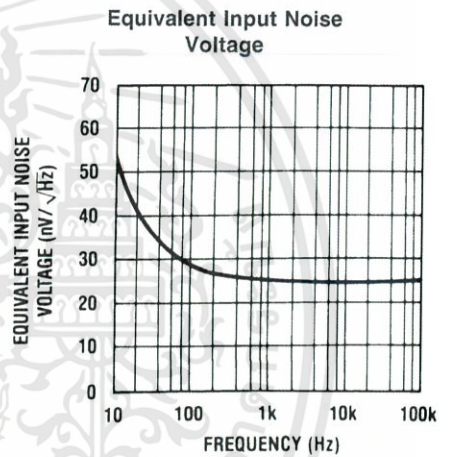
00565525



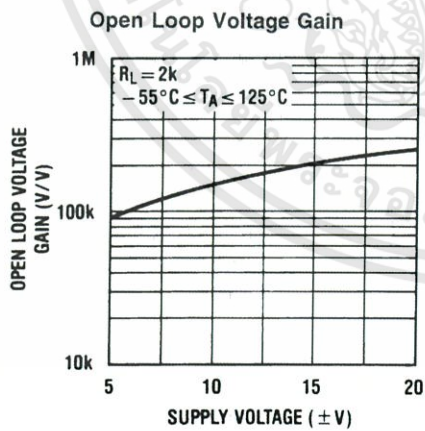
00565526



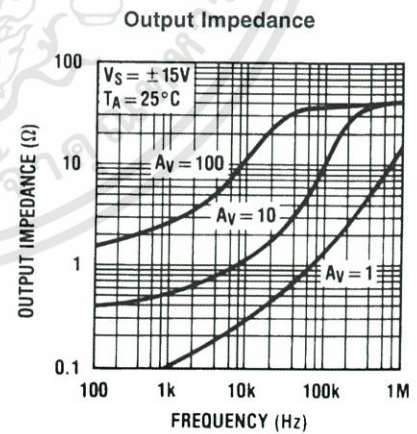
00565527



00565528



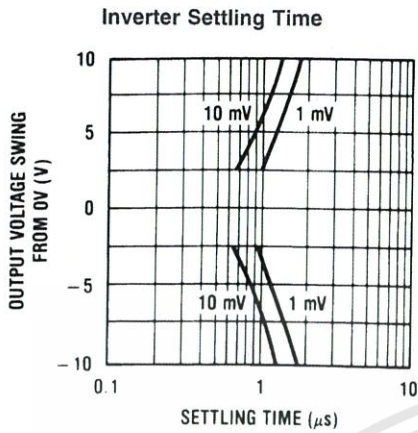
00565529



00565530

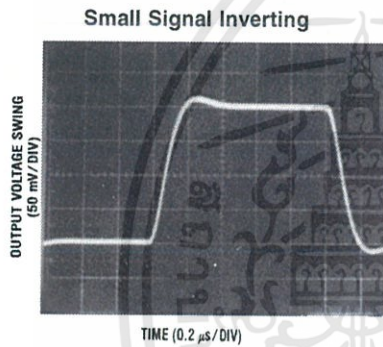
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics (Continued)

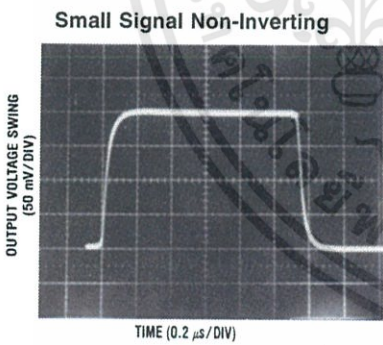


00565531

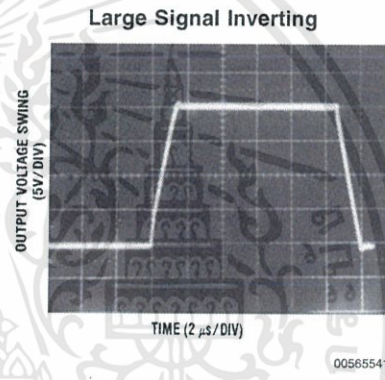
Pulse Response $R_L=2\text{ k}\Omega$, $C_L=10\text{ pF}$



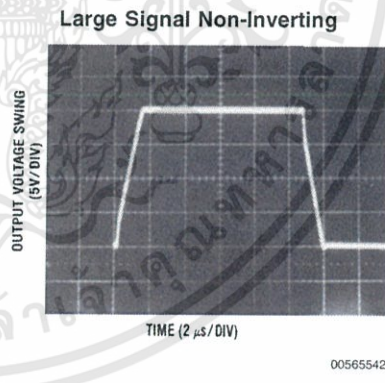
00565539



00565540



00565541

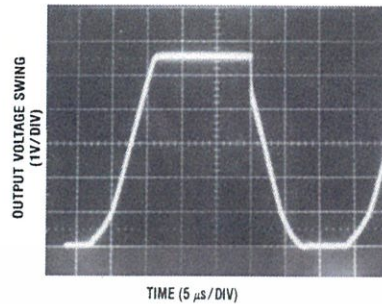


00565542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pulse Response $R_L=2\text{ k}\Omega$, $C_L=10\text{ pF}$ (Continued)

Current Limit ($R_L=100\Omega$)



Application Hints

The LF411 series of internally trimmed JFET input op amps (BI-FET II™) provide very low input offset voltage and guaranteed input offset voltage drift. These JFETs have large reverse breakdown voltages from gate to source and drain eliminating the need for clamps across the inputs. Therefore, large differential input voltages can easily be accommodated without a large increase in input current. The maximum differential input voltage is independent of the supply voltages. However, neither of the input voltages should be allowed to exceed the negative supply as this will cause large currents to flow which can result in a destroyed unit.

Exceeding the negative common-mode limit on either input will force the output to a high state, potentially causing a reversal of phase to the output. Exceeding the negative common-mode limit on both inputs will force the amplifier output to a high state. In neither case does a latch occur since raising the input back within the common-mode range again puts the input stage and thus the amplifier in a normal operating mode.

Exceeding the positive common-mode limit on a single input will not change the phase of the output; however, if both inputs exceed the limit, the output of the amplifier may be forced to a high state.

The amplifier will operate with a common-mode input voltage equal to the positive supply; however, the gain bandwidth and slew rate may be decreased in this condition. When the negative common-mode voltage swings to within 3V of the negative supply, an increase in input offset voltage may occur.

The LF411 is biased by a zener reference which allows normal circuit operation on $\pm 4.5\text{V}$ power supplies. Supply voltages less than these may result in lower gain bandwidth and slew rate.

The LF411 will drive a $2\text{ k}\Omega$ load resistance to $\pm 10\text{V}$ over the full temperature range. If the amplifier is forced to drive heavier load currents, however, an increase in input offset voltage may occur on the negative voltage swing and finally reach an active current limit on both positive and negative swings.

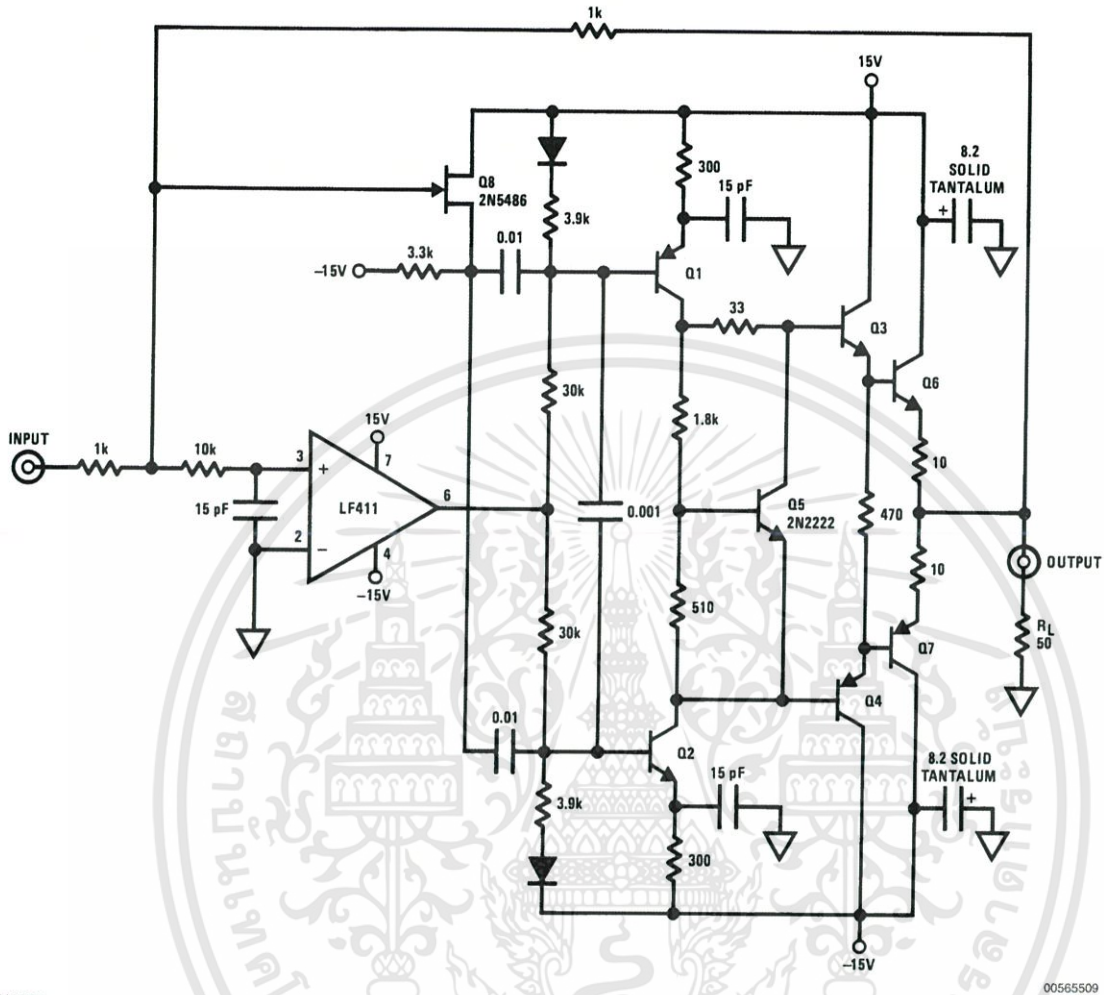
Precautions should be taken to ensure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed backwards in a socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

As with most amplifiers, care should be taken with lead dress, component placement and supply decoupling in order to ensure stability. For example, resistors from the output to an input should be placed with the body close to the input to minimize "pick-up" and maximize the frequency of the feedback pole by minimizing the capacitance from the input to ground.

A feedback pole is created when the feedback around any amplifier is resistive. The parallel resistance and capacitance from the input of the device (usually the inverting input) to AC ground set the frequency of the pole. In many instances the frequency of this pole is much greater than the expected 3 dB frequency of the closed loop gain and consequently there is negligible effect on stability margin. However, if the feedback pole is less than approximately 6 times the expected 3 dB frequency, a lead capacitor should be placed from the output to the input of the op amp. The value of the added capacitor should be such that the RC time constant of this capacitor and the resistance it parallels is greater than or equal to the original feedback pole time constant.

Typical Applications

High Speed Current Booster



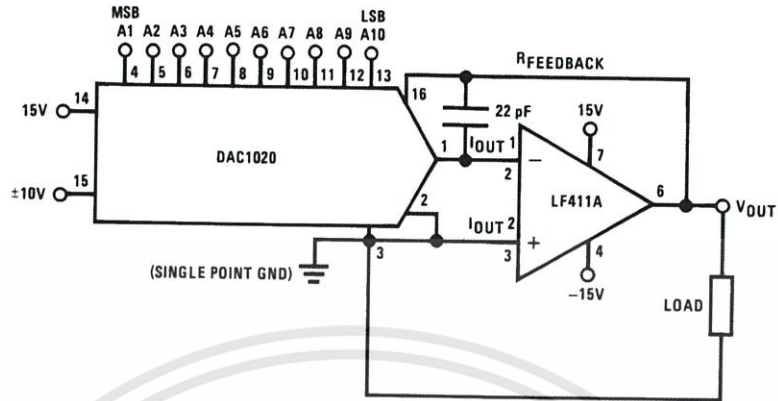
PNP=2N2905
 NPN=2N2219 unless noted
 TO-5 heat sinks for Q6-Q7

00565509

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

10-Bit Linear DAC with No V_{OS} Adjust



00565532

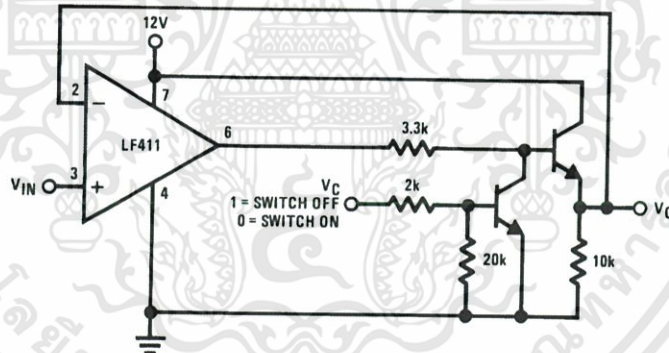
$$V_{OUT} = -V_{REF} \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \frac{A_3}{8} + \dots + \frac{A_{10}}{1024} \right)$$

$$-10V \leq V_{REF} \leq 10V$$

$$0 \leq V_{OUT} \leq -\frac{1023}{1024} V_{REF}$$

where $A_N=1$ if the A_N digital input is high
 $A_N=0$ if the A_N digital input is low

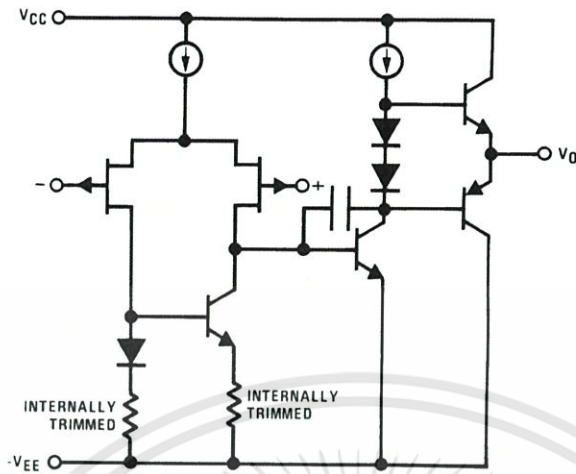
Single Supply Analog Switch with Buffered Output



00565533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

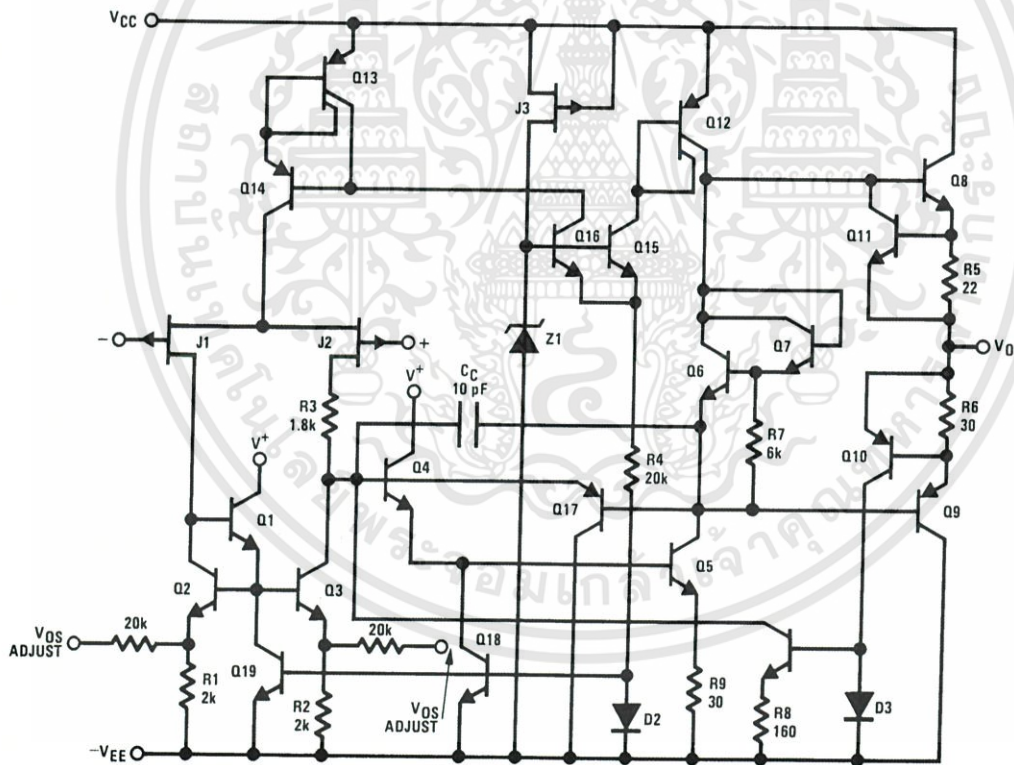
Simplified Schematic



00565506

Note 11: Available per JM38510/11904

Detailed Schematic



00565534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Notes

**LIFE SUPPORT POLICY**

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

BANNED SUBSTANCE COMPLIANCE

National Semiconductor certifies that the products and packing materials meet the provisions of the Customer Products Stewardship Specification (CSP-9-111C2) and the Banned Substances and Materials of Interest Specification (CSP-9-111S2) and contain no "Banned Substances" as defined in CSP-9-111S2.



National Semiconductor
Americas Customer
Support Center
Email: new.feedback@nsc.com
Tel: 1-800-272-9959

National Semiconductor
Europe Customer Support Center
Fax: +49 (0) 180-530 85 86
Email: europe.support@nsc.com
Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor
Asia Pacific Customer
Support Center
Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor
Japan Customer Support Center
Fax: 81-3-5639-7507
Email: jpn.feedback@nsc.com
Tel: 81-3-5639-7560

www.national.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายวิทวัส สุกุวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 16 มิถุนายน พ.ศ. 2535

จังหวัดเชียงใหม่

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2553

ฝึกงานที่: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดเชียงใหม่

อีเมล: tw.skwt@gmail.com



นางสาวพัชรี ทองอินดี๊ เกิดเมื่อวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2535

จังหวัดพิษณุโลก

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2553

ฝึกงานที่: บริษัทคอลเกต-ปาล์มโอลิฟ จังหวัดชลบุรี

อีเมล: sunshines_blossom@hotmail.com



นางสาวพัชรีภรณ์ โคตนันท์ เกิดเมื่อวันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2535

จังหวัดสระบุรี

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย
สระบุรี

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2553

ฝึกงานที่: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (แม่เมาะ) จังหวัดลำปาง

อีเมล: tangtang_tang_wow@hotmail.com



นางสาวพิรุฬร สุดเสรี เกิดเมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2535

จังหวัดสมุทรปราการ

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีสมุทรปราการ

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2553

ฝึกงานที่: บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) กรุงเทพมหานคร

อีเมล: alonez_gmz@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้