

ตัวรับ-ส่งสัญญาณไซคลิกชิปเซิร์ป
TRANSCIEVER OF CYCLIC SHIFT CHIRP



โดย
นางสาว ชนาภัทร แก้วอินทร์
นางสาว ธนารีย์ วันประเสริฐ
นางสาว ปณิตารีย์ พิลีก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวรับ-ส่งสัญญาณไซคลิกชิปเซิร์ป
TRANSCIVER OF CYCLIC SHIFT CHIRP

โดย

นางสาวชนาภัทร	แก้วอินทร์	63010191
นางสาวธนารีย์	วันประเสริฐ	63010441
นางสาวปณิตาธิ์	พิลึก	63010589

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ. ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร. พีระเมศร์ โชติทวีกิจญาตา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2566

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ทัวรับ-ส่งสัญญาณไซคลิกชิฟเซิร์ป

TRANSCEIVER OF CYCLIC SHIFT CHIRP

ผู้จัดทำ

1. นางสาวชนาภัทร แก้วอินทร์ 63010191
2. นางสาวธนารีย์ วันประเสริฐ 63010441
3. นางสาวปิ่นทาร์ย์ พิลึก 63010589

ปราโมทย์

(ศ. ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน)

อาจารย์ที่ปรึกษา

พีระเมศร์

(ดร. พีระเมศร์ โชติกวีกิจญาดา)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินปริญญานิพนธ์เรื่อง “ตัวรับ-ส่งสัญญาณไซคลิซิปเซิร์ป” สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ที่เกี่ยวข้องในส่วนต่าง ๆ ทางผู้จัดทำขอขอบคุณ ศ. ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน และ ดร. พิระเมศร์ โชติกวีกิจญาติ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ความรู้ ชี้แนะแนวคิดและนำแนวทางที่ดีที่เป็นประโยชน์ต่อการแก้ไขปัญหาในการทำงาน รวมถึงสอดแทรกทักษะประสบการณ์ต่าง ๆ ให้กับผู้จัดทำ ทางผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ และประสบการณ์ให้แก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน ความรัก ความห่วงใย รวมถึงกำลังใจที่สำคัญเสมอมา และที่สำคัญคือสนับสนุนให้โอกาสทางด้านการศึกษ อันมีค่ายิ่งแก่ผู้จัดทำ

นางสาวชนาภัทร

แก้วอินทร์

นางสาวธนารีย์

วันประเสริฐ

นางสาวปัทมาธิ์

พิสิฏ

ผู้จัดทำ

ตัวรับ-ส่งสัญญาณไซคลิกชิปเซิร์ป
TRANSCEIVER OF CYCLIC SHIFT CHIRP

โดย นางสาวนาภภัทร แก้วอินทร์ 63010191
นางสาวธนารีย์ วันประเสริฐ 63010441
นางสาวปัทมาธิ์ พิลิก 63010589

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ. ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. พีระเมศร์ โชติทวีกิจญาติ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างตัวรับ-ส่งสัญญาณไซคลิกชิปเซิร์ป ที่ย่านความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ ในส่วนของภาคส่งจะทำการสร้างตัวส่งสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป ที่เลียนแบบระบบของลอรา (LoRa) ที่ย่านความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ และทำการสร้างสัญญาณเอฟเอ็มผ่านวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน สำหรับส่วนของภาครับจะนำสัญญาณจากทางภาคส่งมาตีมอดูเลตด้วยการดาวน์คอนเวอร์เตอร์ จากสัญญาณเอฟเอ็มให้เป็นสัญญาณไอเอฟ ที่ความถี่ 910 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นทำการตีมอดูเลตเอฟเอ็มแบบโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

ABSTRACT

This project presents the fabrication of a cyclic shift chirp transmitter and receiver at 433 MHz. In the part of the transmitter will create a 4-cyclic shift chirp symbol at 433 MHz for identical with LoRa. For generating FM voltage-controlled oscillator is employed. In the part of the receiver will get a signal from the transmitter to demodulate with a down converter at 910 kHz and demodulate FM based on a monostable multivibrator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1	
บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์	1
บทที่ 2	
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไซคลิกชิปเซิร์ป	2
2.2 โมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน	8
2.3 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์	11
2.4 วงจรบัฟเฟอร์	14
2.5 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	14
2.6 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	15
2.7 วงจรควบคุมแรงดัน	15
2.8 วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	16
2.9 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน	17
2.10 วงจรมิตต์ทริกเกอร์	17
2.11 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง	18
2.12 โมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์ (AD831 HIGH FREQUENCY RF MIXER)	20
2.13 อุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาานิพนธ์	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
บทที่ 3	การออกแบบและการจัดทำปฏิญญานិพนธ์	
	3.1 การออกแบบ การสร้างวงจรและลายพิมพ์วงจร	26
	3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	43
	3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	45
บทที่ 4	ผลการทดลอง	
	4.1 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมการสร้างสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป	58
	4.2 ผลการทดสอบวงจรบัฟเฟอร์และวงจรมีแรงดันสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป	58
	4.3 ผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน	61
	4.4 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง	62
	4.5 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรมิกเซอร์	63
	4.6 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรมอดูเลตเอฟเอ็ม ด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์	64
	4.7 ผลการทดสอบวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	66
	4.8 ผลการทดสอบวงจรบัฟเฟอร์และวงจรมีสัญญาณผลต่าง	67
	4.9 ผลการทดสอบวงจรมิตต์ทริกเกอร์	68
	4.10 ผลการทดสอบวงจรมีเปรียบเทียบแรงดัน	69
	4.11 ผลการทดสอบวงจรรวมระบบ	70
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
	5.1 สรุปผล	75
	5.2 ข้อเสนอแนะ	76
	บรรณานุกรม	77
	ภาคผนวก	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ของสัญญาณและสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป	3
2.2 บล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญญาณไค้ดดิ้งเฟส	4
2.3 ตัวอย่างสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของบล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญญาณส่วนไค้ดดิ้งเฟส	4
2.4 บล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญญาณส่วนเรฟเฟอเรนซ์เฟส	5
2.5 ตัวอย่างสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของบล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญญาณเรฟเฟอเรนซ์เฟส	6
2.6 บล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป	7
2.7 ตัวอย่างสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของบล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป	7
2.8 โมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน	8
2.9 วงจรภายในโมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน	8
2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับศักย์ดาไฟฟ้าปรับค่า	9
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานเอาต์พุตกับศักย์ดาไฟฟ้าปรับค่า	10
2.12 วงจรภายในของวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์	11
2.13 การทำงานของวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์	12
2.14 วงจรบัฟเฟอร์	14
2.15 วงจรขยายสัญญาณกลับเฟส	14
2.16 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	15
2.17 วงจรควบคุมแรงดัน	15
2.18 ตัวอย่างวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	16
2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอบสนองทางขนาดกับความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	16
2.20 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน	17

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.21	วงจรมิตต์ทริกเกอร์	18
2.22	กราฟคุณสมบัติของวงจรมิตต์ทริกเกอร์	18
2.23	วงจรมิตต์ทริกเกอร์ผลต่าง	19
2.24	โมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์	20
2.25	กระบวนการการทำงานดาวนคอนเวอร์เตอร์	21
2.26	ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP WROOM-32 รุ่น 30 ขา	22
2.27	ตำแหน่งและหน้าที่ขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP WROOM-32	22
2.28	ลักษณะภายนอกและโครงสร้างภายในของ LM13700	23
2.29	ลักษณะภายนอกของ ไอซี 7805	24
3.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงภาพรวมของปริยญาณีพนธ์	25
3.2	วงจรรวมระบบของปริยญาณีพนธ์	26
3.3	วงจรมิตต์ทริกเกอร์	27
3.4	วงจรมิตต์ทริกเกอร์	27
3.5	วงจรมิตต์ทริกเกอร์และวงจรมิตต์ทริกเกอร์แรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์บ	28
3.6	กราฟความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์กับค่าศักย์ดาไฟฟ้า	28
3.7	แผนภาพการสร้างเงื่อนไขรูปแบบของสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์บ	31
3.8	วงจรมิตต์ทริกเกอร์แรงดัน	31
3.9	วงจรมิตต์ทริกเกอร์ผลต่างและวงจรมิตต์ทริกเกอร์เอเอ็มด้วยวงจรมิตต์ทริกเกอร์ เบิลล์ลิตัวเบเรเตอร์	33
3.10	วงจรมิตต์ทริกเกอร์ความถี่ต่ำผ่าน	33
3.11	วงจรมิตต์ทริกเกอร์และวงจรมิตต์ทริกเกอร์ผลต่าง	34
3.12	วงจรมิตต์ทริกเกอร์	35
3.13	วงจรมิตต์ทริกเกอร์เทียบแรงดัน	36
3.14	วงจรมิตต์ทริกเกอร์สัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์บ ด้วยวงจรมิตต์ทริกเกอร์ ไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน	36

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 การสร้างวงจรรออาร์เอฟมิกเซอร์	37
3.16 ลายพิมพ์วงจรบัพเฟอร์และวงจรรยกระดับแรงดันของสัญลักษณ์ 4-ไซคลิก ชิปเซิร์ป	38
3.17 วงจรบัพเฟอร์และวงจรรยกระดับแรงดันของสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป ที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว	38
3.18 ลายพิมพ์วงจรควบคุมแรงดัน	39
3.19 วงจรควบคุมแรงดันที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว	39
3.20 ลายพิมพ์วงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยโมโนสเตเบิลิตีไวด์เบรเตอร์	40
3.21 วงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยโมโนสเตเบิลิตีไวด์เบรเตอร์ที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว	40
3.22 ลายพิมพ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	41
3.23 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว	41
3.24 ลายพิมพ์วงจรบัพเฟอร์ วงจรขยายสัญญาณผลต่าง วงจรมิตต์ทริกเกอร์ และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน	42
3.25 วงจรบัพเฟอร์ วงจรขยายสัญญาณผลต่าง วงจรมิตต์ทริกเกอร์และวงจร เปรียบเทียบแรงดันที่สร้างเสร็จแล้ว	42
3.26 เครื่องออสซิลโลสโคป	43
3.27 เครื่องจ่ายไฟ	43
3.28 เครื่องกำเนิดสัญญาณ	44
3.29 เครื่องวัดสเปกตรัม	44
3.30 หน้าต่างโปรแกรม ARDUINO IDE	45
3.31 เว็บไซต์ EASYEDA	45
3.32 การจัดตั้งอุปกรณ์การทำงานของโปรแกรมการสร้างสัญลักษณ์ 4-ไซคลิก ชิปเซิร์ป	46

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.33 การจัดตั้งอุปกรณ์ของวงจรบัฟเฟอร์และวงจรยกระดับแรงดันของ สัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป	47
3.34 การจัดตั้งอุปกรณ์ของวงจรถักสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน	47
3.35 การจัดตั้งอุปกรณ์ของวงจรถักควบคุมแรงดัน	48
3.36 การจัดตั้งอุปกรณ์การทำงานของโมดูลอาร์เอพมิกเซอร์	49
3.37 การจัดตั้งอุปกรณ์ของวงจรถักสัญญาณผลต่างและวงจรถักมอดูเลตเอฟ เอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์	50
3.38 การจัดตั้งอุปกรณ์วงจรถักความถี่ต่ำผ่าน	50
3.39 การจัดตั้งอุปกรณ์ของวงจรบัฟเฟอร์และวงจรถักสัญญาณผลต่าง	51
3.40 การติดตั้งอุปกรณ์ของวงจรถักมิตต์ทริกเกอร์	52
3.41 การจัดตั้งอุปกรณ์ของวงจรถักเปรียบเทียบแรงดัน	52
3.42 การจำลองการทำงานของวงจรรวมระบบ	53
3.43 วงจรรวมระบบแบบใช้สาย	54
3.44 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบวงจรรวมระบบแบบใช้สาย	55
3.45 ทดสอบวงจรรวมระบบที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วแบบใช้สาย	55
3.46 วงจรรวมระบบแบบไร้สาย	56
3.47 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบวงจรรวมระบบแบบไร้สาย	56
3.48 ทดสอบวงจรรวมระบบที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วแบบไร้สาย	57
4.1 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมการสร้างสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิป เซิร์ป (CH1)	58
4.2 ผลการทดสอบวงจรบัฟเฟอร์	59
4.3 ผลการทดสอบวงจรถักยกระดับแรงดันและลดขนาดของสัญลักษณ์ 4-ไซคลิก ชิปเซิร์ป	60
4.4 การทดสอบวงจรถักสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน	61

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 สเปกตรัมแสดงผลทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันที่ความถี่ 433 เมกะเฮิรตซ์	61
4.6 สเปกตรัมแสดงผลการมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยสัญญาณซีร์ปที่มีสัญญาณพาหะที่ 433 เมกะเฮิรตซ์	62
4.7 ผลการทดสอบวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง	63
4.8 สเปกตรัมแสดงผลการทดสอบโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์	63
4.9 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณผลต่าง	64
4.10 ผลการทดสอบวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์	65
4.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	66
4.12 ผลลัพธ์การนำเอาต์พุตของวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	66
4.13 ผลการทดสอบวงจรบัฟเฟอร์	67
4.14 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณผลต่าง	68
4.15 ผลการทดสอบวงจรขมิตต์ทริกเกอร์	69
4.16 ผลลัพธ์การนำสัญญาณเอาต์พุตวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	69
4.17 ผลการนำสัญญาณเอาต์พุตวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปผ่านวงจรเปรียบเทียบแรงดัน	70
4.18 ผลการทดสอบการจำลองการสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิปปิงซีร์ปในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	71
4.19 ผลการทดสอบการจำลองวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	71
4.20 ผลการทดสอบการจำลองการนำสัญญาณโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ผลลัพธ์การนำเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ไปผ่านวงจร กรองความถี่ต่ำผ่าน	73
4.22 ผลลัพธ์การนำเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ไปผ่านวงจร กรองความถี่ต่ำผ่าน	74



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	รายละเอียดหน้าที่แต่ละขาของโมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควมด้วยแรงดัน	9
2.2	รายละเอียดหน้าที่แต่ละขาที่ใช้งานของไอซี LM13700	23
2.3	รายละเอียดหน้าที่แต่ละขาที่ใช้งานของไอซี 7805	24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบัน IoT (Internet of Things) ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตและทรัพย์สินของเราเป็นอย่างมาก อุปกรณ์ IoT เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตเพื่อส่งและรับข้อมูล ช่วยให้เราสามารถควบคุมอุปกรณ์ และวิเคราะห์ข้อมูลจากระยะไกล ซึ่งลอรา (LoRa) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างไกล แม้ว่าลอราจะเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ แต่องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการมอดูเลตและดีมอดูเลตของลอรายังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ดังนั้นเราจึงจัดทำการศึกษาหาองค์ความรู้ เพื่อสร้างอุปกรณ์ IoT ที่เลียนแบบระบบของลอรา และสร้างองค์ความรู้ในการศึกษาการรับส่งสัญญาณลักษณะไซคลิกชิปเซิร์ปในย่านความถี่สูง ที่มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน และใช้พลังงานต่ำ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) สร้างตัวรับ-ส่งสัญญาณไซคลิกชิปเซิร์ป ที่ย่านความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ทนทานต่อสัญญาณรบกวน
- 2) สร้างตัวส่งสัญญาณไซคลิกชิปเซิร์ปที่เลียนแบบระบบของลอราที่ย่านความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

- 1) ภาคส่งได้ทำการสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป (4-Cyclic Shift Chirp) ที่ทนทานต่อสัญญาณรบกวน
- 2) สร้างสัญญาณมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรถูกกำเนิดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator) ในย่านความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์
- 3) ทำการดีมอดูเลตสัญญาณเอฟเอ็มด้วยการดาวน์คอนเวอร์เตอร์ (Down Converter) ให้เป็นไอเอฟ (Intermediate Frequency: IF) ที่ความถี่ 910 กิโลเฮิร์ตซ์ และทำการดีมอดูเลต
- 4) สร้างชุดบิตเฟรมข้อมูลด้วยสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป
- 5) ทำการมอดูเลตเอฟเอ็ม ด้วยความถี่คลื่นพาห์ 433 เมกะเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไชคลิกชิปเซิร์ป (Cyclic Shift Chirp)

สัญญาณเซิร์ปเป็นสัญญาณที่มักถูกใช้ในระบบการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ (Broadband) เนื่องจากมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนและใช้พลังงานต่ำ ซึ่งการมอดูเลตแบบเซิร์ป เป็นหนึ่งในรูปแบบการมอดูเลตความถี่ โดยที่ความถี่ของคลื่นพาห์ (Carrier frequency) จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น

ในการสื่อสารดิจิทัล สัญญาณเซิร์ปสามารถแทนบิตข้อมูลด้วยความถี่ที่เพิ่มขึ้น (Up Chirp) หรือความถี่ลดลง (Down Chirp) โดยในทางคณิตศาสตร์สัญญาณเซิร์ปเป็นสัญญาณที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแบบเชิงเส้น สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$c(t) = A \cos(\omega_c t + \frac{1}{2} \mu t^2) \quad (2.1)$$

A คือ แอมพลิจูดของสัญญาณเซิร์ป (โวลต์)

ω_c คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นพาห์ (เรเดียน/วินาที)

μ คือ อัตราเซิร์ป (เรเดียน/วินาที²)

จากสมการ (2.1) ความถี่ชั่วขณะของสัญญาณเซิร์ป แทนด้วย $\omega_i(t)$ โดยอาศัยการหาอนุพันธ์ของเฟสเชิงมุมเทียบกับเวลา สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

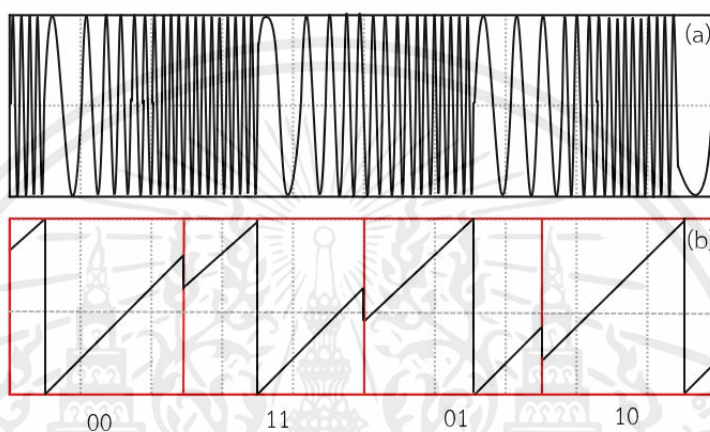
$$\omega_i(t) = \omega_c + \mu t \quad (2.2)$$

โดยค่าของ μ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณเซิร์ป

เมื่อ $\mu > 0$: ความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจากความถี่ต่ำไปความถี่สูง

$\mu < 0$: ความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจากความถี่สูงไปความถี่ต่ำ

ในการเข้ารหัสแบบไซคลิกชิปเซิร์ป หรือการมอดูเลตเฟสแบบสัญญาณฟันเลื่อย มีลักษณะเด่นของสัญญาณเข้ารหัสคือ ความถี่เริ่มต้นและความถี่สุดท้ายของสัญญาณเซิร์ปจะมีค่าเท่ากัน และแทนข้อมูลเป็นบิตด้วยการใช้ความถี่ที่เพิ่มขึ้นหรือความถี่ลดลง ซึ่งสัญลักษณ์ข้อมูลสามารถสร้างได้โดยการเข้ารหัสเฟสของสัญญาณพาหะฟันเลื่อย โดยรูปแบบของสัญลักษณ์ข้อมูลแต่ละแบบจะมีเฟสเริ่มต้นที่แตกต่างกัน แสดงได้รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของสัญญาณและสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป

(a) สัญญาณเซิร์ป (b) สัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป

จากรูปที่ 2.1 จะสังเกตได้ว่าการแบ่งสัญญาณออกเป็น 4 สัญลักษณ์ โดยแต่ละสัญลักษณ์จะมีตำแหน่งเริ่มต้นของสัญลักษณ์เซิร์ปและเฟสที่แตกต่างกัน โดยความถี่เริ่มต้นและความถี่สุดท้ายในแต่ละรูปแบบจะมีค่าที่เท่ากัน

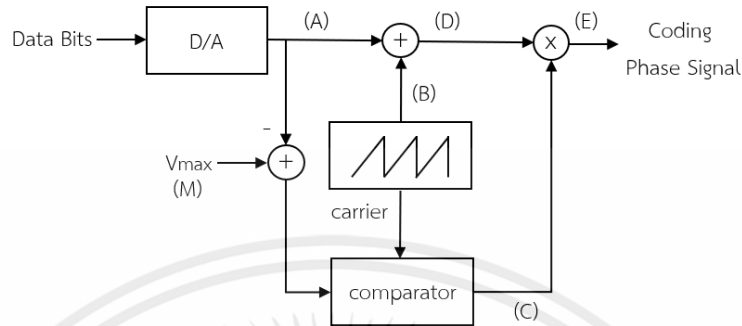
2.1.1 การสร้างสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป

ในการสร้างสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ปแบ่งออกเป็น 2 ส่วน [9] คือ

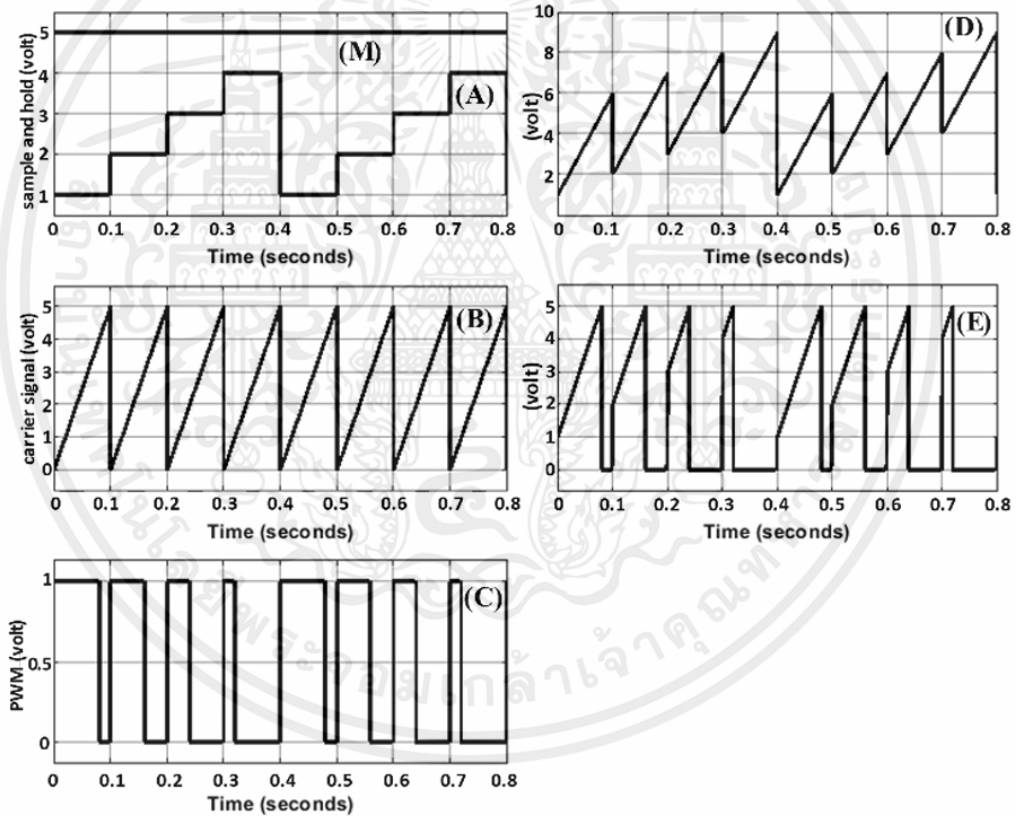
1) การสร้างสัญญาณส่วนโค้ดดิ้งเฟส (Coding phase)

การสร้างสัญญาณส่วนโค้ดดิ้งเฟส เป็นขั้นตอนแรกในการสร้างสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป แสดงบล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญญาณส่วนโค้ดดิ้งเฟส ได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งในขั้นตอนการสร้างจะประกอบไปด้วยระดับสัญญาณอนาล็อก (A) ที่มีความสัมพันธ์กับบิตข้อมูลจาก V_{max} (M) จากนั้นเปรียบเทียบผลลัพธ์กับสัญญาณพาหะแบบฟันเลื่อย (B) เพื่อให้ได้สัญญาณ PWM (C) และนำระดับสัญญาณอนาล็อกไปรวมกับสัญญาณพาหะแบบฟันเลื่อย ได้ผลลัพธ์สัญญาณ (D) จากนั้น

นำไปคูณด้วยสัญญาณ PWM เพื่อให้ได้สัญญาณโค้ดดิ้งเฟส (E) แสดงรูปคลื่น (A) ถึง (E) และ (M) ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญญาณโค้ดดิ้งเฟส

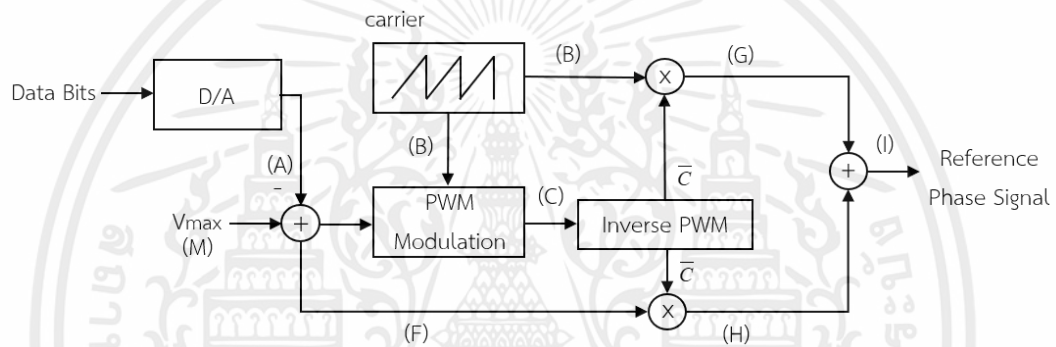


รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของบล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญญาณส่วนโค้ดดิ้งเฟส

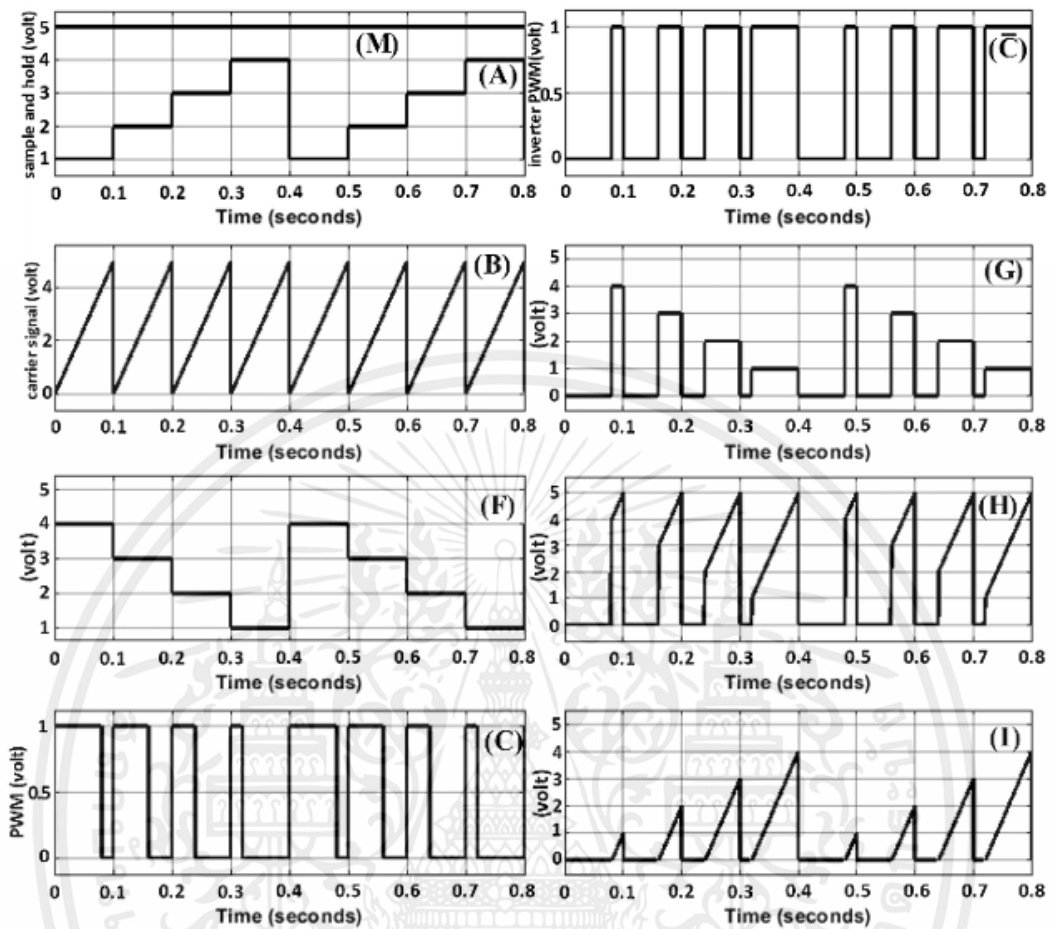
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การสร้างสัญญาณส่วนเรเฟอเรนซ์เฟส (Reference phase)

กระบวนการสร้างสัญญาณส่วนเรเฟอเรนซ์เฟส แสดงบล็อกไดอะแกรม ได้ดังรูปที่ 2.4 โดยในขั้นตอนแรก สัญญาณ (F) ได้จากการลบกันของระดับสัญญาณอนาล็อก (A) กับระดับสูงสุดของสัญญาณชั๊วคคลิกชิปเซิร์ป (M) จากนั้นนำไปคูณกับสัญญาณ Inverse PWM (\bar{C}) เพื่อให้ได้สัญญาณ (H) และนำสัญญาณ (H) ที่ได้ไปลบกับสัญญาณ (G) โดยที่สัญญาณ (G) คือสัญญาณที่ได้จากการคูณกันของสัญญาณพาหะแบบฟันเลื่อย (B) และสัญญาณ Inverse PWM (\bar{C}) ซึ่งจากการลบกันของสัญญาณ (H) กับสัญญาณ (G) ทำให้ได้สัญญาณเรเฟอเรนซ์เฟส (I) แสดงสัญญาณในแต่ละขั้นตอนได้ดังรูปที่ 2.5

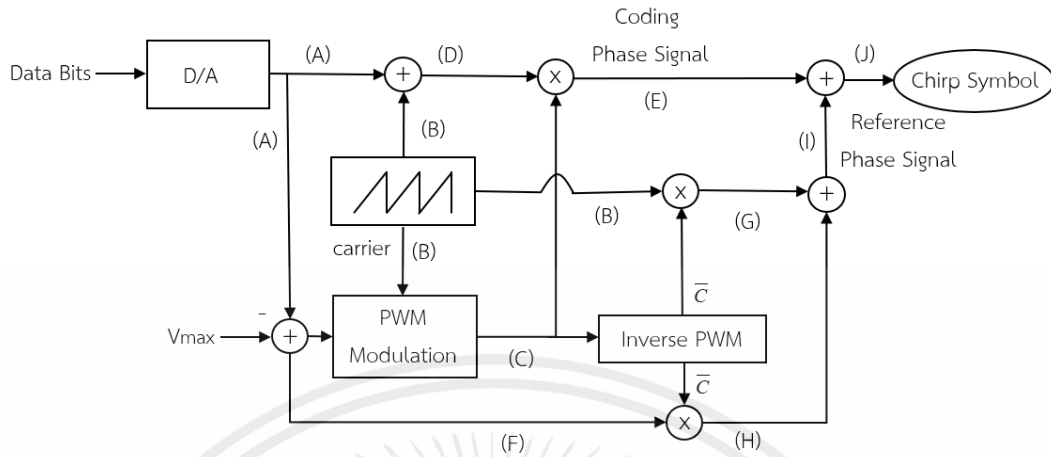


รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญญาณส่วนเรเฟอเรนซ์เฟส

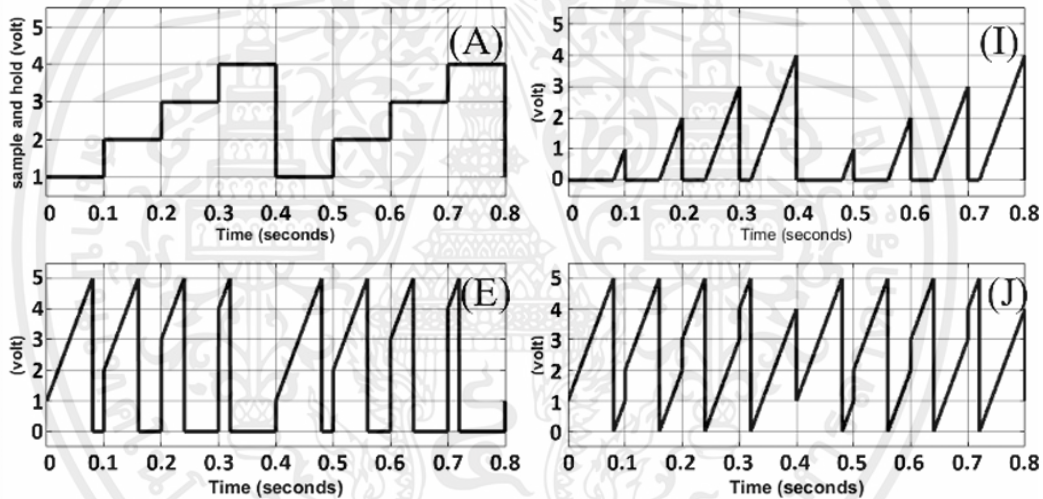


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของบล็อกไดอะแกรม
ในการสร้างสัญญาณเรฟเฟอเรนซ์เฟส

ซึ่งการสร้างสัญญาณไซคลิกชิปเซิร์ปนั้นเป็นการรวมกันของสัญญาณส่วนโค้งดิ่งเฟส กับสัญญาณส่วนเรฟเฟอเรนซ์เฟส แสดงขั้นตอนการรวมกันของสัญญาณได้ดังรูปที่ 2.6 และแสดงตัวอย่างสัญญาณ (A), (E), (I) และ (J) ได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของบล็อกไดอะแกรมในการสร้างสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป

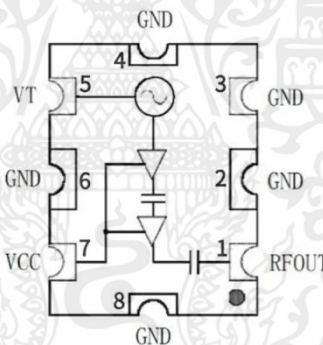
จากรูปที่ 2.7 (J) จะเห็นได้ว่าเฟสเริ่มต้นของแต่ละสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ปจะแปรผันตามบิตข้อมูล ในขณะที่ช่วงหลังของแต่ละเวลาบิต คือสัญญาณเรฟเฟอเรนซ์เฟส โดยที่เฟสของจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของแต่ละสัญลักษณ์มีค่าที่เท่ากัน ซึ่งเป็นลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์ป

2.2 โมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน (YSGM040508)

โมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันเป็นโมดูลมีช่วงความถี่มาตรฐานอยู่ที่ 410 เมกะเฮิรตซ์ถึง 530 เมกะเฮิรตซ์ มีเสถียรภาพสูง ประกอบด้วย 8 ขา ดังตารางที่ 2.1 แสดงโมดูลได้ดังรูปที่ 2.8 และแสดงวงจรภายในโมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน [10] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 โมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน

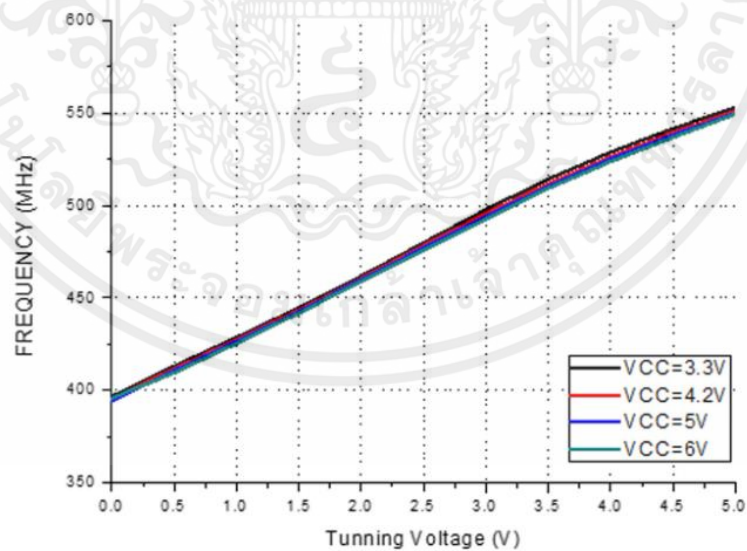


รูปที่ 2.9 วงจรภายในโมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดหน้าที่แต่ละขาของโมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน

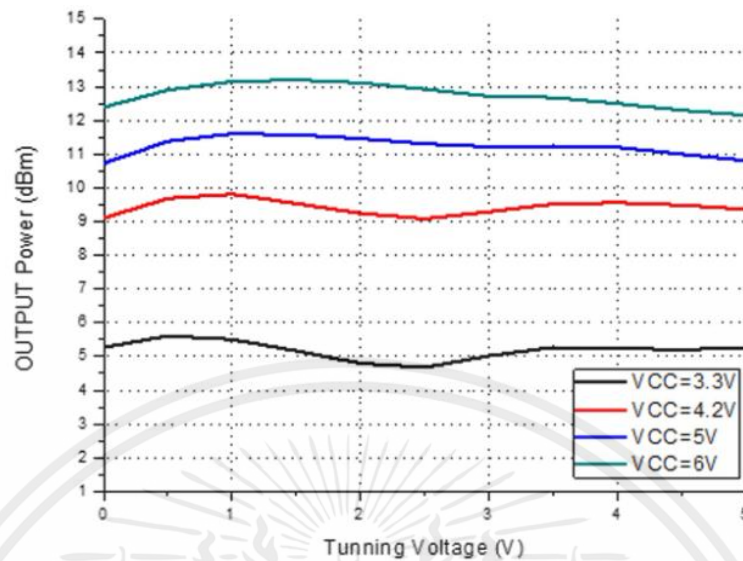
Pin Functions	
PIN	DESCRIPTION
1	RF Output
2	GND
3	GND
4	GND
5	Tune Voltage
6	GND
7	Supply Voltage
8	GND

ซึ่งคุณสมบัติโดยทั่วไปของโมดูลกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับศักย์ดาไฟฟ้าปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ภาพกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานเอาต์พุตกับศักย์ตาไฟฟ้าปรับค่า

วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันใช้สร้างสัญญาณไซน์ ประกอบด้วยองค์ประกอบการสร้างความถี่ ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) โดยคลื่นไฟฟ้าที่ออกมาส่วนใหญ่จะเป็นคลื่นรูปไซน์และคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ในไซคลิกชิปเซิร์บแรงดันควบคุมที่ใช้กับวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันเป็นสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์บ ซึ่งทำให้ความถี่เอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นตามเวลา ส่งผลให้สัญญาณขาออกของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันเป็นสัญญาณไซคลิกชิปเซิร์บที่เพิ่มความถี่เชิงเส้นตามเวลา ความถี่วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันดังสมการที่ (2.3)

$$f_{vco} = \frac{V_{in} \times K}{2\pi} \quad (2.3)$$

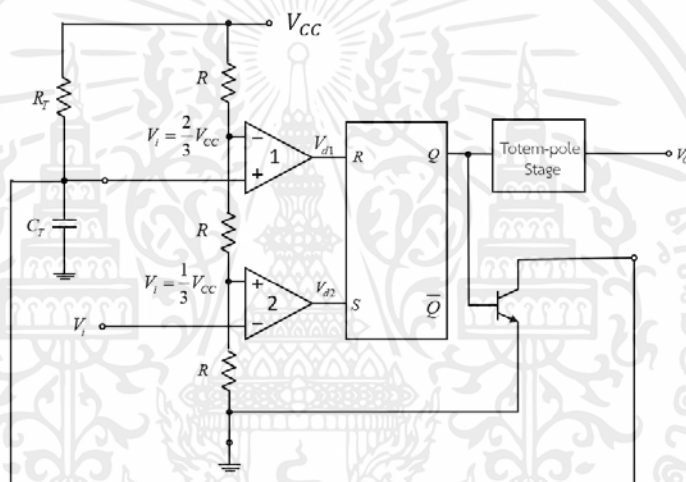
VCO gain constant (K)

$$K = \frac{\Delta f}{\Delta V} \quad (2.4)$$

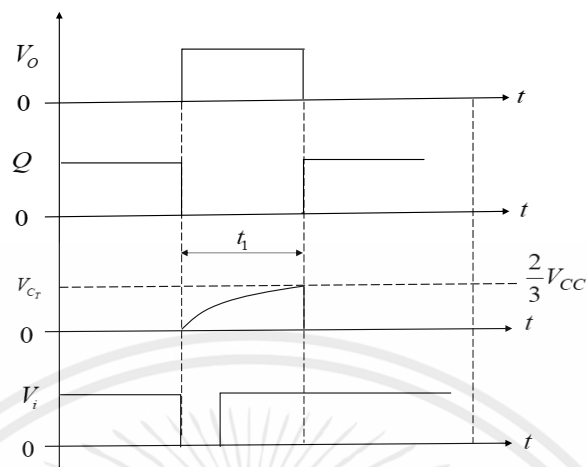
Δf คือ ค่าเบี่ยงเบนความถี่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

2.3 วงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Monostable Multivibrator)

วงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ เป็นวงจรที่มีสถานะ ON และ OFF วงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ จะเริ่มทำงานเมื่อมีสัญญาณอินพุตมากระตุ้น แล้วจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณทางเอาต์พุต เป็นระยะเวลาตามที่สามารถออกแบบได้ แล้วกลับคืนสู่สถานะเดิมเหมือนเกิดการคงตัวของสัญญาณ หลังจากการคงตัวของสัญญาณ แล้วจะมีการดีสชาร์จคืนค่า ซึ่งมีผลตามค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ และจะได้พัลส์ออกมา แสดงวงจรภายในของวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ดังรูปที่ 2.12 และแสดงการทำงานของวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ [6] ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 วงจรภายในของวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์



รูปที่ 2.13 การทำงานของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์

การทำงานของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์จะประกอบไปด้วย Comparator จำนวน 2 ตัว ซึ่งตัวที่ 1 จะมีการต่อ R_T และ C_T เป็นอินพุตของ Comparator ตัวที่ 1 และใน Comparator ตัวที่ 2 จะมี V_i คือสัญญาณทริกเป็นอินพุต ก่อนการเริ่มทริกสถานะของ V_i เป็น High หรือมีค่าเป็น V_{CC} เมื่อมีการทริกค่าของ V_i จะมีค่าเป็น 0 ซึ่งจะได้ค่า V_{d2} เป็น 0 จากนั้นพิจารณาที่ Comparator ตัวที่ 1 ค่า V_{d1} จะขึ้นอยู่กับค่า Q เมื่อค่า Q มีค่าเท่ากับ 1 จะทำการช็อตตัวเก็บประจุทำให้ V_{cT} มีค่าเป็น 0 จึงส่งผลให้ V_{d1} มีค่าเป็น 0 และเมื่อมีการทริกเกิดขึ้นค่า V_i จะมีค่าเป็น 0 จะได้ค่า V_{d2} เป็น 1 ทำให้ค่า Q มีค่าเท่ากับ 0 จึงเกิด open switch ทำให้มีการชาร์จตัวเก็บประจุ แล้วจึงจะมีการคืนค่าของสัญญาณ V_i กลับมาเป็น HIGH เหมือนเดิม จะได้ค่า V_{d2} เป็น 0 และมีสถานะการทำงานที่คงค่าเอาไว้จนกระทั่งมีการชาร์จตัวเก็บประจุจนค่า V_{cT} มีค่ามากกว่า $\frac{2}{3}V_{CC}$ จะได้ V_{d2} เป็น 1 และค่า Q มีค่าเท่ากับ 1 ทำให้ V_{cT} ที่มีการชาร์จตัวเก็บประจุไปจนถึง $\frac{2}{3}V_{CC}$ จะมีค่ากลับมาเป็น 0 เหมือนเดิม

การคำนวณหาค่าเวลาการคงตัวของสัญญาณในวงจรโมโนสเตเบิลตีไวเบเรเตอร์ สามารถแสดงได้
ดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned} \frac{V_C - V_{CC}}{R_T} + C_T \frac{dV_C}{dt} &= 0 \\ \frac{dV_C}{V_C - V_{CC}} &= -\frac{1}{C_T R_T} dt \\ \int_0^{\frac{2}{3}V_{CC}} \frac{d(V_C - V_{CC})}{(V_C - V_{CC})} &= \int_{t_0}^{t_0+t_1} -\frac{1}{C_T R_T} dt \\ \ln(V_C - V_{CC}) \Big|_0^{\frac{2}{3}V_{CC}} &= \frac{-t_1}{C_T R_T} \\ \ln\left(\frac{2}{3}V_{CC} - V_{CC}\right) - \ln(0 - V_{CC}) &= \frac{-t_1}{C_T R_T} \\ \frac{t_1}{C_T R_T} &= \ln\left(\frac{-V_{CC}}{-\frac{1}{3}V_{CC}}\right) = \ln(3) \\ t_1 &= C_T R_T \ln(3) \end{aligned} \tag{2.5}$$

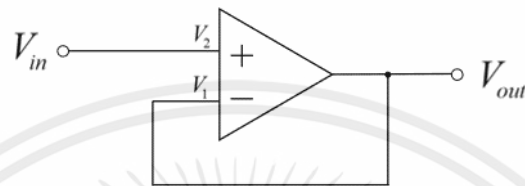
ทำการจัดรูปตัวแปรใหม่เพื่อให้สมการมีความเป็นสากล โดยกำหนดให้ $t_1 = T$ ก็จะได้สมการใน
รูปแบบสากล ดังสมการที่ (2.6)

$$T = C_T R_T \ln(3) \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer)

วงจรบัฟเฟอร์เป็นวงจรที่ไม่มีการลดทอนค่าแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์สูง นิยมใช้สำหรับเชื่อมต่อระหว่างสองวงจร เพื่อช่วยให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ แสดงลักษณะวงจรบัฟเฟอร์ที่สร้างจากออปแอมป์ [8] ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรบัฟเฟอร์

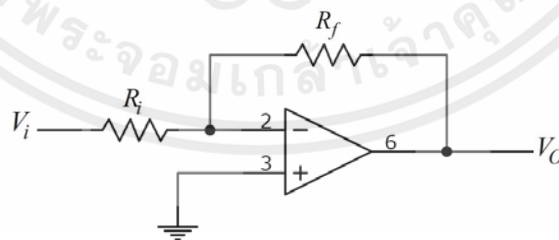
จากวงจรรูปที่ 2.14 สามารถเขียนสมการอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$V_{out} = V_{in} \quad (2.7)$$

2.5 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส เป็นวงจรที่ใช้ขยายสัญญาณ โดยมีอัตราขยายเป็นลบ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.8) สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตจะมีเฟสตรงข้ามกัน มีลักษณะการต่อวงจร [8] ดังรูปที่ 2.15

$$A_V = -\frac{V_O}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (2.8)$$

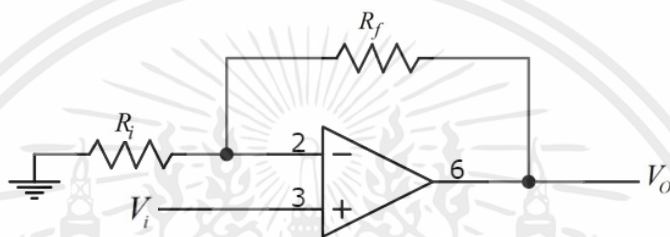


รูปที่ 2.15 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

2.6 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส เป็นวงจรที่ใช้ขยายสัญญาณ โดยมีอัตราขยายคงค่าเครื่องหมายเหมือนเดิม สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.9) สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตจะมีเฟสเดียวกัน [4] มีลักษณะการต่อวงจร ดังรูปที่ 2.16

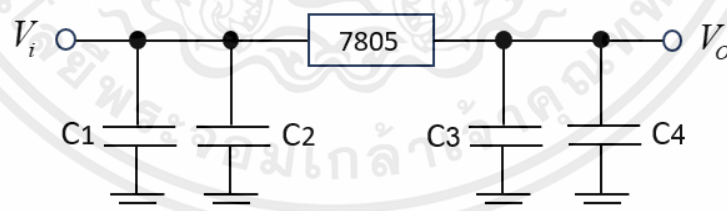
$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.16 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

2.7 วงจรควบคุมแรงดันไฟตรง (Voltage Regulator)

วงจรควบคุมแรงดันไฟตรง เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าของอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง มีลักษณะการต่อวงจร [7] ดังรูปที่ 2.17

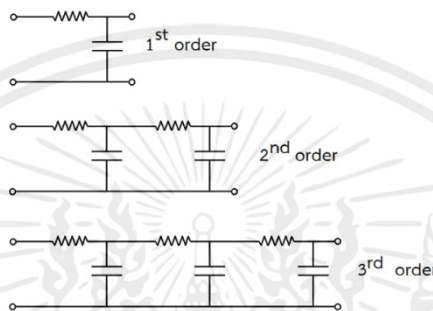


รูปที่ 2.17 วงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

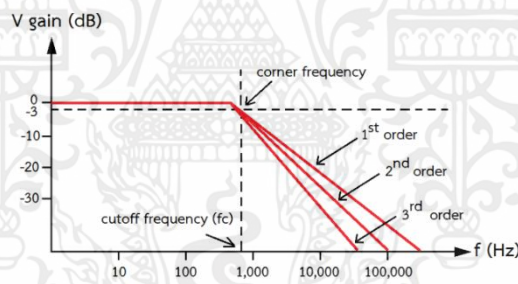
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรที่ส่งผ่านสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency) เท่านั้น ขณะเดียวกันจะลดทอนสัญญาณทั้งหมดที่อยู่สูงกว่าความถี่นั้น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ แสดงดังรูปที่ 2.18 ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร [12] แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอบสนองทางขนาดกับความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

การคำนวณหาค่าความถี่ตัดในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (2.10)$$

ω_c คือ ความถี่ตัดเชิงมุม (เรเดียน/วินาที)

f_c คือ ความถี่ตัด (เฮิรตซ์)

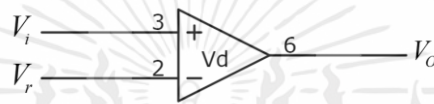
R คือ ความต้านทาน (โอห์ม)

C คือ ความจุของตัวเก็บประจุ (ฟารัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

วงจรเปรียบเทียบแรงดัน คือการเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณโดยใช้วงจรออปแอมป์ ซึ่งมีอินพุต 2 อินพุต อินพุตหนึ่งสำหรับรับค่าแรงดันอ้างอิง (V_r) ส่วนอีกขาหนึ่งสำหรับรับสัญญาณอินพุต (V_i) หากแรงดันอินพุตป้อนเข้าที่ขาบวก เรียกว่าวงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบไม่กลับเฟส และถ้าแรงดันอินพุตป้อนเข้าที่ขาลบ เรียกว่าวงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบกลับเฟส ส่วนแรงดันอ้างอิงมี 3 ลักษณะคือ แรงดันอ้างอิงเป็นบวก แรงดันอ้างอิงเป็นลบและแรงดันอ้างอิงเป็นศูนย์ [8] วงจรเปรียบเทียบแรงดัน มีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

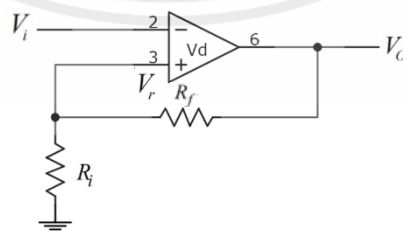
การคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุต สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.11)

$$V_d = V_i - V_r \quad (2.11)$$

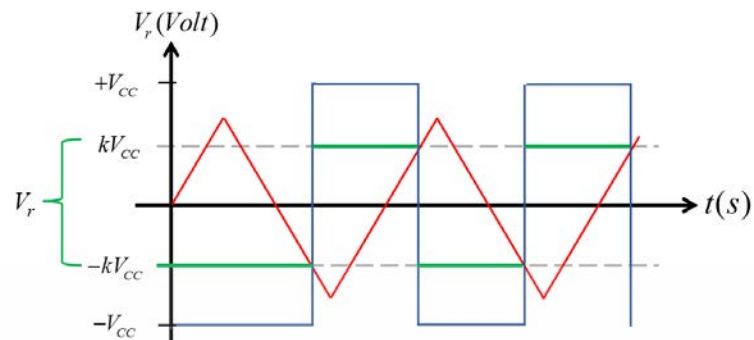
$$V_o = \begin{cases} +V_{CC} & ; V_d > 0 \\ -V_{CC} & ; V_d < 0 \end{cases}$$

2.10 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์

วงจรขมิตต์ทริกเกอร์ เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่อาศัยหลักการป้อนกลับแบบบวก โดยนำสัญญาณเอาต์พุตบางส่วนนำมาป้อนแบบย้อนกลับทางอินพุตเพื่อทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต มีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2.21 และกราฟคุณสมบัติของวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ [3] ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์



รูปที่ 2.22 กราฟคุณสมบัติของวงจรขั้วอินเวอร์ตทริกเกอร์

จากรูปที่ 2.22 กราฟคุณสมบัติของวงจรขั้วอินเวอร์ตทริกเกอร์ จะเห็นได้ว่าเมื่อ V_r มีค่ามากกว่า V_i จะทำให้ V_o มีค่าเป็นบวกจึงจะได้สัญญาณที่มีขนาดเท่ากับ $+V_{CC}$ และถ้า V_r มีค่าน้อยกว่า V_i จะทำให้ V_o มีค่าเป็นลบจึงจะได้สัญญาณที่มีขนาดเท่ากับ $-V_{CC}$

การคำนวณหาค่าคงที่ k สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\frac{V_r - 0}{R_i} + \frac{V_r - V_o}{R_f} = 0 \quad (2.12)$$

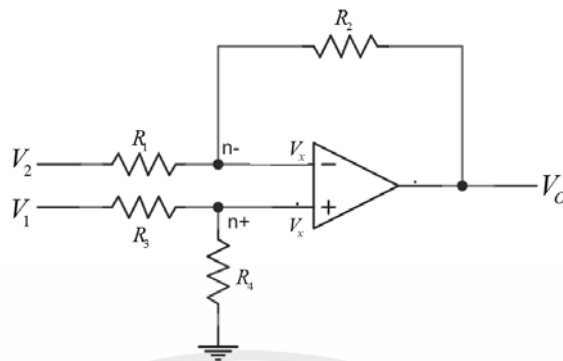
$$V_r \left[\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_f} \right] = \frac{V_o}{R_f}$$

$$\frac{V_o}{R_f} = V_r \left(\frac{R_f + R_i}{R_i R_f} \right) V_i$$

$$V_r = \frac{V_o R_i}{R_f + R_i} = k V_o ; V_o = \pm V_{CC} ; k = \frac{R_i}{R_i + R_f}$$

2.11 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

วงจรขยายสัญญาณผลต่าง คือ วงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่เกิดจากผลต่างระหว่างสัญญาณที่ป้อนเข้ามาที่อินพุตทั้งสอง มีลักษณะการต่อวงจรภายนอก [5] ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

จากรูปที่ 2.23 พิจารณาที่โหนด n+ อินพุตบวกด้วยกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\frac{V_X - V_1}{R_3} + \frac{V_X}{R_4} = 0 \quad (2.13)$$

$$V_X = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_1$$

พิจารณาที่โหนด n- อินพุตลบด้วยกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.14)

$$\frac{V_X - V_2}{R_1} + \frac{V_X - V_O}{R_2} = 0 \quad (2.14)$$

$$V_O = \left(\frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2} \right) V_X - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) V_2$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดัน แทนสมการที่ (2.13) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้ดังสมการที่ (2.15)

$$V_O = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_1 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) V_2 \quad (2.15)$$

ถ้า $R_1 = R_3 = R_f$ และ $R_2 = R_4 = R_f$ แทนในสมการที่ (2.15) จะได้ดังสมการที่ (2.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_O = \left(\frac{R_f}{R_i} \right) (V_1 - V_2) \quad (2.16)$$

2.12 โมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์ (AD831 High Frequency RF Mixer)

โมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างความถี่ใหม่จากสัญญาณสองสัญญาณ โดยสัญญาณที่รับเข้ามาจะเป็นความถี่อาร์เอฟ (Radio-Frequency) และความถี่แอลโอ (Local-Frequency) แต่สัญญาณที่ออกจากมิกเซอร์จะเป็นความถี่ไอเอฟ (Intermediate-Frequency) ซึ่งโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์สามารถผลิตความถี่ได้ตั้งแต่ 0.1 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 500 เมกะเฮิร์ตซ์ มีความเพี้ยนของสัญญาณต่ำ (Low distortion) [1] ดังรูปที่ 2.24



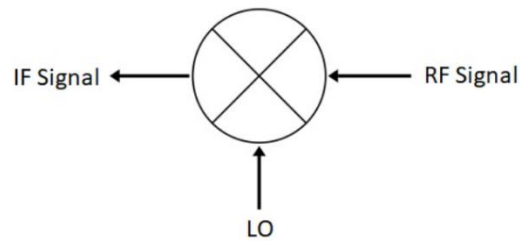
รูปที่ 2.24 โมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์

มีลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้

1. อินพุตอาร์เอฟ (Input Radio-frequency) : 0.1- 500 เมกะเฮิร์ตซ์
2. อินพุตแอลโอ (Input Local-oscillator) : 0.1-500 เมกะเฮิร์ตซ์
3. เอาต์พุตไอเอฟ (Output Intermediate Frequency) : 0.1-200 เมกะเฮิร์ตซ์
4. แรงดันไฟเลี้ยง : 5-11 โวลต์

โมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์ ประกอบไปด้วย 3 พอร์ต คือ

1. พอร์ตอินพุตความถี่อาร์เอฟ
2. พอร์ตอินพุตความถี่แอลโอ
3. พอร์ตเอาต์พุตความถี่ไอเอฟ



รูปที่ 2.25 กระบวนการการทำงานดาวนคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 2.25 กระบวนการการทำงานดาวนคอนเวอร์เตอร์ คือ การนำสัญญาณอาร์เอฟกับสัญญาณแอลโอมาคูณกัน ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ออกมาจะเป็นสัญญาณไอเอฟ โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.17)

$$\cos(2\pi f_1 t) \times \cos(2\pi f_2 t) = \frac{\cos(2\pi f_1 t + 2\pi f_2 t) + \cos(2\pi f_1 t - 2\pi f_2 t)}{2} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) จะได้สมการดาวนคอนเวอร์เตอร์ คือ

$$\cos(2\pi f_1 t - 2\pi f_2 t) = \cos(2\pi (f_1 - f_2) t) \quad (2.18)$$

f_1 คือ ความถี่อาร์เอฟ

f_2 คือ ความถี่แอลโอ

ซึ่งสามารถคำนวณหาความถี่ไอเอฟได้ดังสมการที่ (2.19)

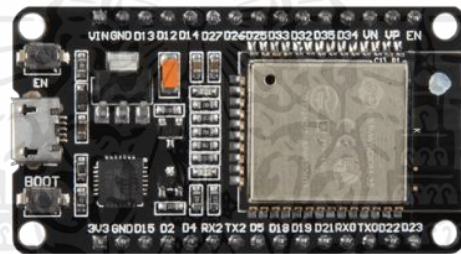
$$f_{IF} = f_1 - f_2 \quad (2.19)$$

f_{IF} คือ ความถี่ไอเอฟ

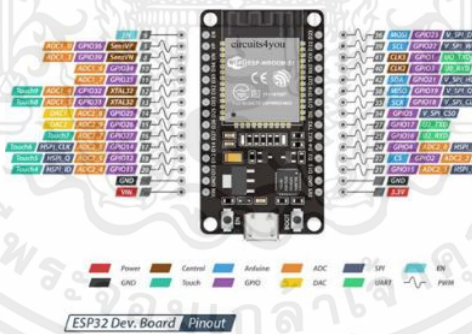
2.13 อุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท (Hardware)

2.13.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 รองรับการเชื่อมต่อ Wi-Fi และ Bluetooth 4.2 BLE ในตัว และรองรับการเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Arduino IDE โดยบอร์ดที่เป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบันคือ ESP WROOM-32 Chip ซึ่งมีการทำงานแบบสองคอร์ (Dual Core) ที่มีความเร็ว 240 เมกะเฮิรตซ์ มีขนาดแรม 512 กิโลไบต์ ในการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จำเป็นต้องจ่ายไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก มีลักษณะดังรูปที่ 2.26 และแต่ละขาจะมีหน้าที่ในการใช้งานที่แตกต่างกัน [2] ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP WROOM-32 รุ่น 30 ขา

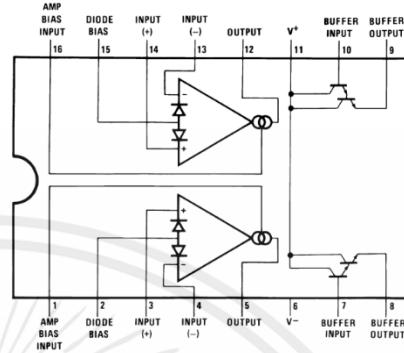


รูปที่ 2.27 ตำแหน่งและหน้าที่ขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP WROOM-32

2.13.2 ไอซี LM13700

ไอซี LM13700 เป็นอุปกรณ์แบบ Dual Operational Transconductance Amplifier หรือ OTA เป็นแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Current Source: VCCS) แต่ละตัวมีอินพุตที่เป็นรูปแบบ differential และมีเอาต์พุตแบบ push-pull ซึ่งทั้ง

สองแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันนั้นมีแหล่งจ่ายไฟร่วมกัน โดยไอซี LM13700 ประกอบด้วย 16 ขา ดังตารางที่ 2.2 และแสดงลักษณะภายนอกและโครงสร้างภายใน [11] ดังรูปที่ 2.28



(ก) ลักษณะภายนอก

(ข) โครงสร้างภายใน

รูปที่ 2.28 ลักษณะภายนอกและโครงสร้างภายในของ LM13700

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดหน้าที่แต่ละขาที่ใช้งานของไอพาร์ท

Pin Functions			
PIN		I/O	DESCRIPTION
NAME	NO.		
Amp bias input	1, 16	A	กระแสอินพุตไบอัส
Buffer input	7, 10	A	อินพุตบัฟเฟอร์
Buffer output	8, 9	A	เอาต์พุตบัฟเฟอร์
Diode bias	2, 15	A	อินพุตไบอัสไดโอดเชิงเส้น
Input+	3, 14	A	อินพุตขาบวก
Input-	4, 13	A	อินพุตขาลบ
Output	5, 12	A	เอาต์พุต
V+	11	P	แรงดันไฟฟ้าขาบวก
V-	6	P	แรงดันไฟฟ้าขาลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.3 ไอซี 7805

ไอซี 7805 เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเอาต์พุตให้เท่ากับ 5 โวลต์ โดยไม่ว่าแรงดันไฟฟ้าที่อินพุตจะมีการเพิ่มหรือลดลง แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตจะยังคงอยู่ที่ 5 โวลต์ โดยไอซี 7805 ประกอบด้วย 3 ขา ดังตารางที่ 2.3 และแสดงลักษณะภายนอก [7] ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ลักษณะภายนอกของไอซี 7805

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดหน้าที่แต่ละขาที่ใช้งานของไอซี 7805

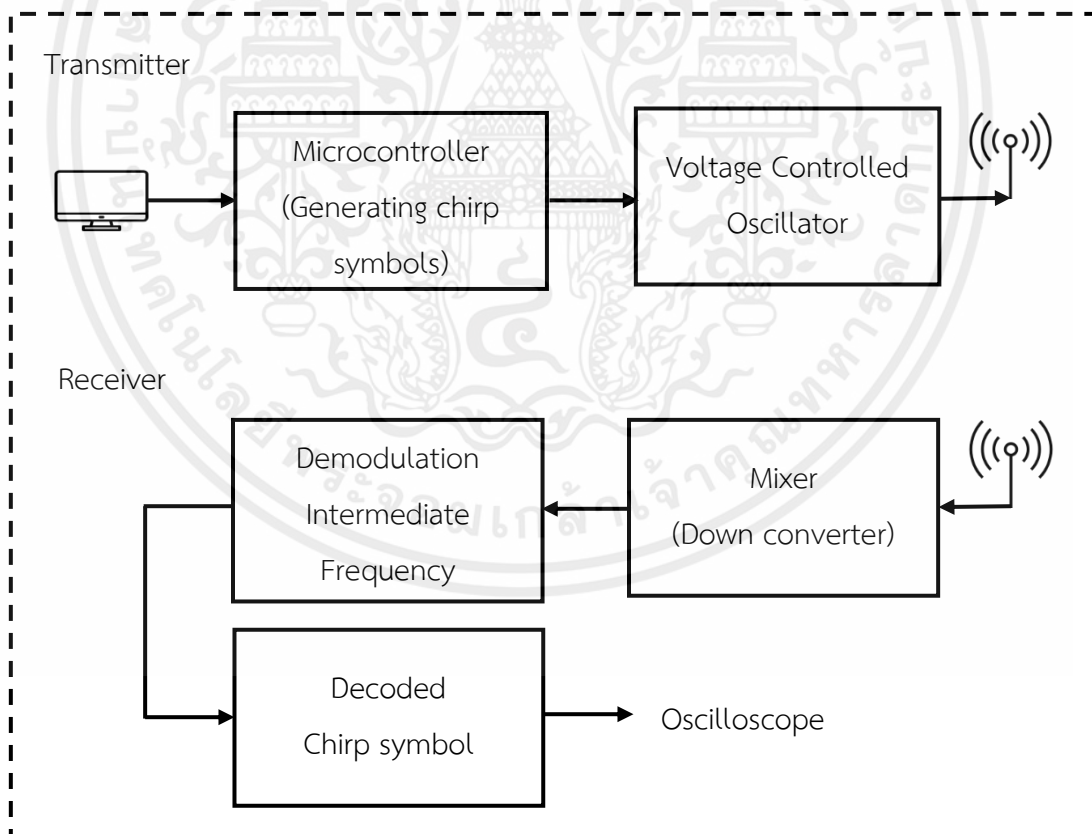
Pin Functions			
PIN		Function	DESCRIPTION
NAME	NO.		
INPUT	1	Input voltage (7V-35V)	ขานี้เป็นการกำหนดแรงดันอินพุต
GROUND	2	Ground (0V)	จุดอ้างอิงศักย์ไฟฟ้า
OUTPUT	3	Regulated output; 5V (4.8V-5.2V)	แรงดันเอาต์พุตขนาด 5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปฏิญาณนิพนธ์

ปฏิญาณนิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอตัวรับ-ส่งสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป ที่ย่านความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ภาคส่ง และภาครับ ในส่วนของภาคส่งจะทำการสร้างตัวส่งสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปที่เลียนแบบระบบของลอราที่ย่านความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะทำการออกแบบสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป โดยการเขียนชุดคำสั่งในการสร้าง 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และทำการสร้างสัญญาณมอดูเลตเอฟเอ็มผ่านวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน สำหรับส่วนของภาครับจะนำข้อมูลจากทางภาคส่งมาตีมอดูเลตด้วยการดาวน์โหลดคอนเวอร์เตอร์จากสัญญาณเอฟเอ็มให้เป็นสัญญาณไอเอฟที่ความถี่ 910 กิโลเฮิร์ตซ์ หลังจากนั้นทำการตีมอดูเลชันเพื่อกู้สัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปกลับคืนมา จากนั้นจะทำการถอดรหัสข้อมูลออกมา แสดงบล็อกไดอะแกรมของปฏิญาณนิพนธ์ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาพรวมของปฏิญาณนิพนธ์

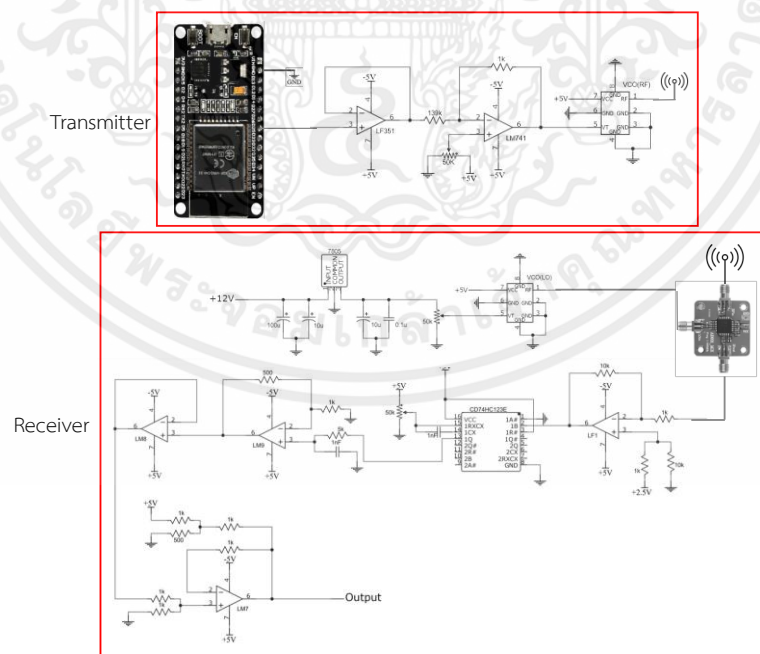
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบ การสร้างวงจรและลายพิมพ์วงจร

3.1.1 ส่วนของการออกแบบ

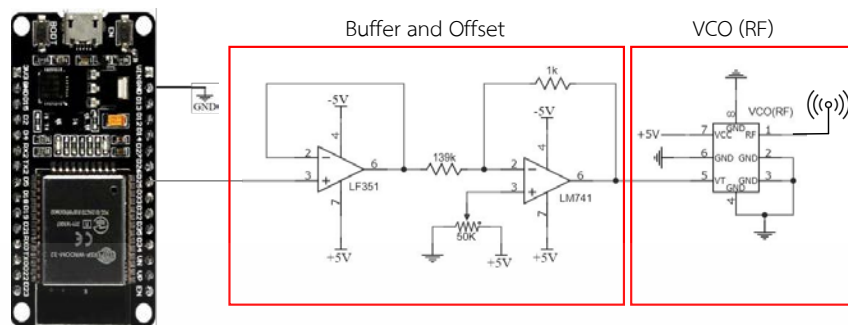
1) การออกแบบวงจรรวมระบบ

ในการออกแบบวงจรรวมระบบจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ภาคส่ง และภาครับ ในส่วนของภาคส่งจะทำการออกแบบสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์บ โดยเขียนชุดคำสั่ง ในการสร้าง 4-ไซคลิกชิปเซิร์บผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จากนั้นนำสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์บไปเชื่อมต่อกับวงจรบัฟเฟอร์และวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์บ เพื่อนำเอาต์พุตที่ได้ไปสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์บด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน สำหรับส่วนของภาครับจะรับสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันไปเป็นอินพุตของวงจรมิกเซอร์ เพื่อทำการควมคอนเวอร์เตอร์ให้ได้ความถี่ 910 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นนำเอาต์พุตที่ได้ไปทำการตีมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แล้วนำสัญญาณไปกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อให้ได้สัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์บ และทำการถอดรหัสข้อมูลออกมา แสดงการออกแบบวงจรรวมระบบดังรูปที่ 3.2 วงจรฝั่งภาคส่งดังรูปที่ 3.3 และวงจรฝั่งภาครับดังรูปที่ 3.4

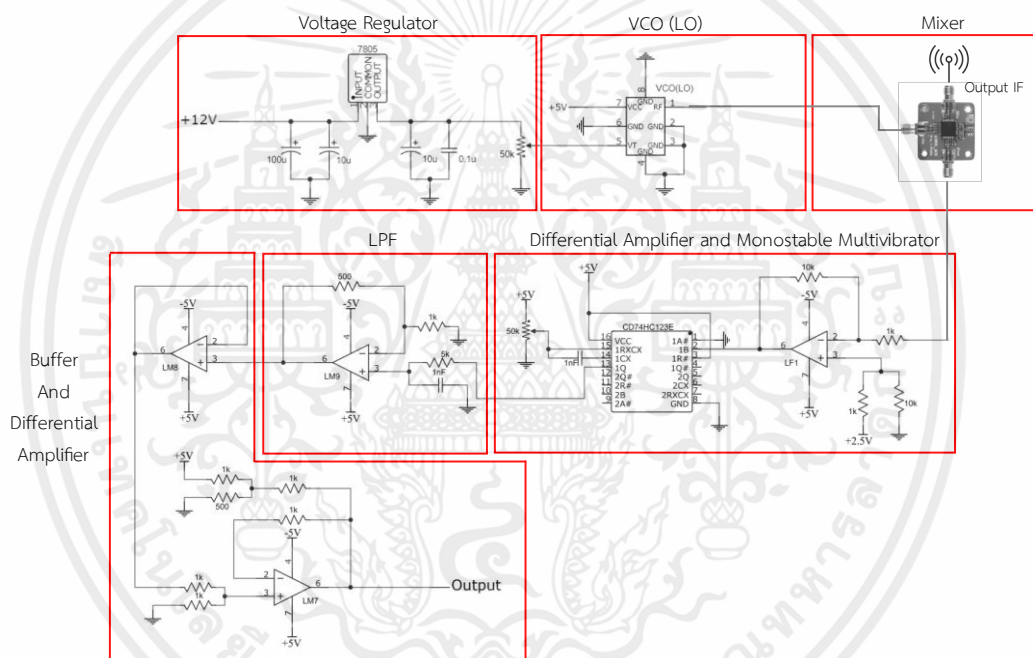


รูปที่ 3.2 วงจรรวมระบบของปริณญาณิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วงจรฝั่งภาคส่ง

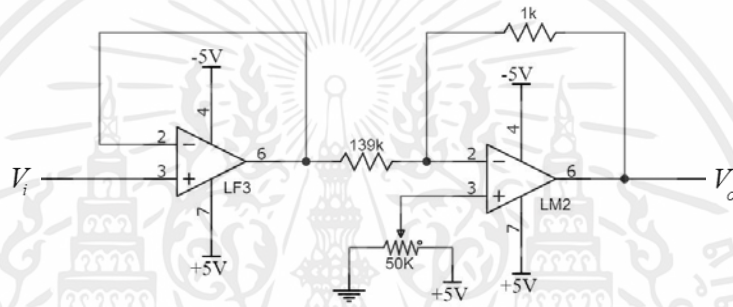


รูปที่ 3.4 วงจรฝั่งภาครับ

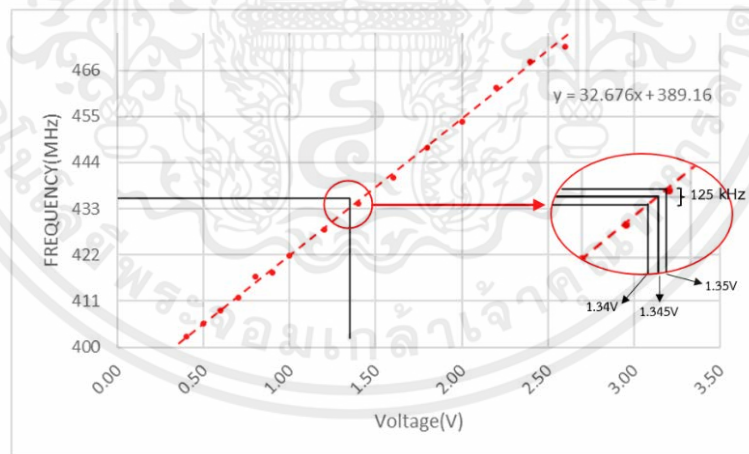
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การออกแบบวงจรบัฟเฟอร์และวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป

การออกแบบวงจรบัฟเฟอร์และวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป ซึ่งวงจรบัฟเฟอร์เลือกใช้อปแอมป์ LF351 ในการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และวงจรยกระดับแรงดันใช้ออปแอมป์ LM741 ในการยกระดับสัญญาณที่มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 และในการออกแบบวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ กับค่าศักย์ตาไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 วงจรบัฟเฟอร์และวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์กับค่าศักย์ตาไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.6 จะได้สมการที่ความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์กับค่าศักย์ตาไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.1) โดยที่แบนด์วิดท์มีค่า 125 กิโลเฮิร์ตซ์

$$y = 32.676x + 389.16 \quad (3.1)$$

y คือ ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

x คือ ศักย์ตาไฟฟ้า (โวลต์)

ที่สัญญาณพาหะความถี่ 433 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งแบนด์วิดท์มีค่า 125 กิโลเฮิรตซ์ ค่าความถี่สูงสุดหาได้จาก $433\text{MHz} + \frac{BW}{2}$ จะได้ค่าความถี่สูงสุดมีค่าเท่ากับ $433\text{MHz} + \frac{125k}{2} = 433.0625$ เมกะเฮิรตซ์ และค่าความถี่ต่ำสุดหาได้จาก $433\text{MHz} - \frac{BW}{2}$ จะได้ค่าความถี่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ $433\text{MHz} - \frac{125k}{2} = 432.9375$ เมกะเฮิรตซ์ สามารถหาค่าศักย์ตาไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด ได้ตั้งสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.3) ตามลำดับ

$$(433 \times 10^6) + (62.5 \times 10^3) = 32.676x + 389.16 \quad (3.2)$$

$$433.0625 = 32.676x + 389.16$$

$$x = 1350 \quad mV$$

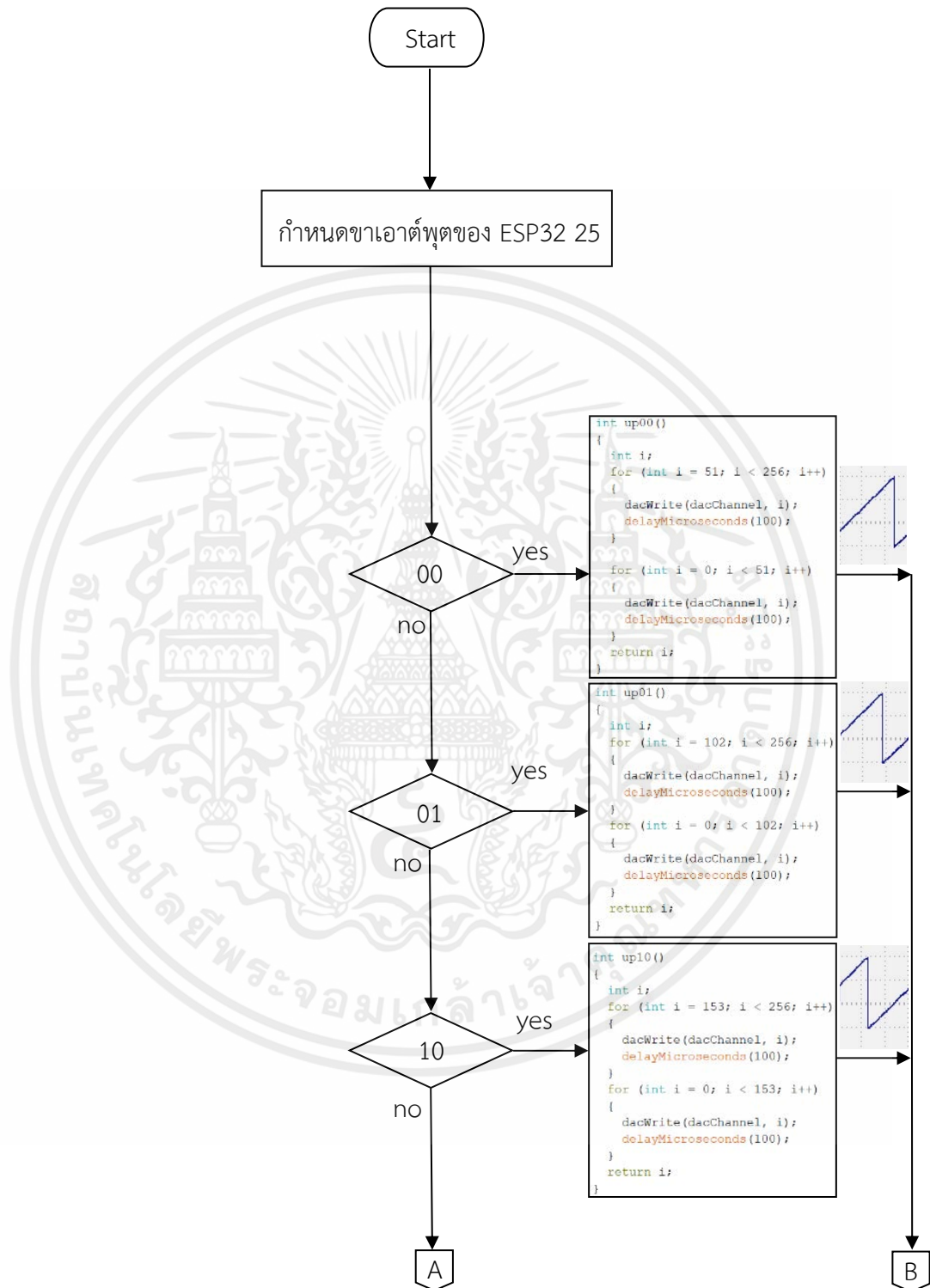
$$(433 \times 10^6) - (62.5 \times 10^3) = 32.676x + 389.16 \quad (3.3)$$

$$432.9375 = 32.676x + 389.16$$

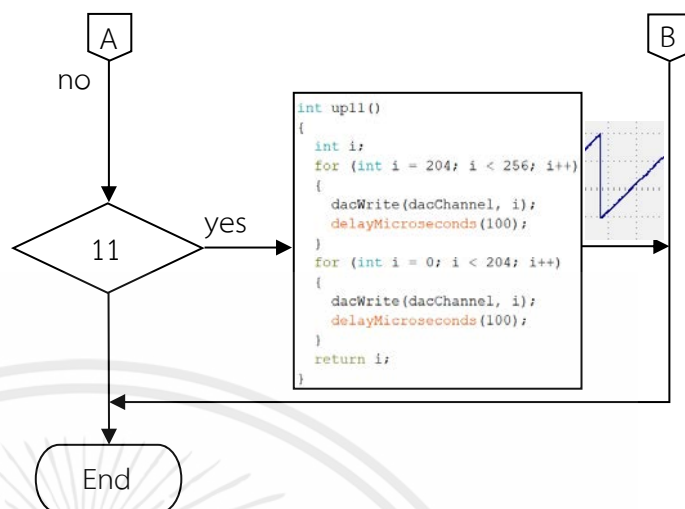
$$x = 1340 \quad mV$$

3) การออกแบบสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป โดยเขียนชุดคำสั่งในการสร้าง 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

ในส่วนนี้ทำการออกแบบสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป จากการเขียนโปรแกรม Arduino IDE สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 โดยโปรแกรมจะเริ่มจากการกำหนดขาเชื่อมต่อขาเอาต์พุตของ ESP32 ที่ขา GPIO25 จากนั้นทำการสร้างเงื่อนไขเพื่อกำหนดรูปแบบของ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



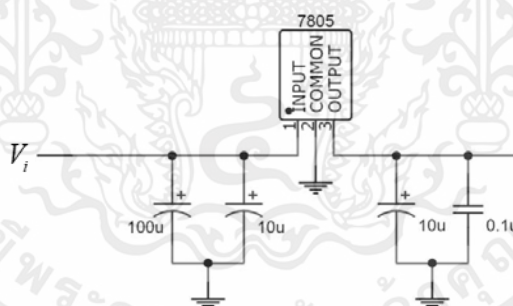
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แผนภาพการสร้างเงื่อนไขรูปแบบของสัญลักษณ์ 4-ไบนารีชิปเซิร์ฟ

4) การออกแบบวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

วงจรควบคุมแรงดัน การออกแบบวงจรควบคุมแรงดันไฟตรงเลือกใช้ไอซี 7805 ที่ทำหน้าที่เป็น Voltage Regulator เพื่อทำการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ที่ 5 โวลต์ แสดง Schematic ของวงจรควบคุมแรงดันดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

5) การออกแบบวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรตีมอดูเลตเอฟเอ็มแบบโมโนสเตเบิลมิวเบเรเตอร์

วงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรตีมอดูเลตเอฟเอ็มแบบวงจรโมโนสเตเบิลมิวเบเรเตอร์ การออกแบบวงจรขยายสัญญาณผลต่างเลือกใช้โอปแอมป์ LF351

วงจรรขยายสัญญาณผลต่างถูกออกแบบให้มีแรงดันไฟตรงเอาต์พุตเท่ากับ 2 โวลต์ เมื่อ $R_1 = R_3 = R_4$ และ $R_2 = R_4 = R_f$ สามารถหาค่า R_f ได้จากการแทนในสมการที่ (2.16)

โดยกำหนดให้ $R_1 = 1$ กิโลโอห์ม

$$V_O = \left(\frac{R_f}{R_i} \right) (V_1 - V_2)$$

$$2 = \left(\frac{R_f}{1k} \right) (2.5 - 2.3)$$

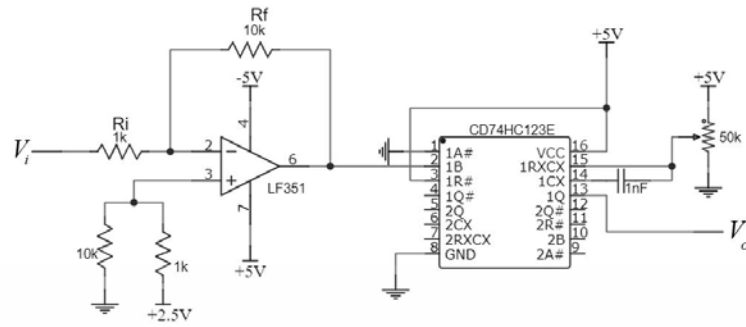
$$R_f = 10 \text{ กิโลโอห์ม}$$

สำหรับการออกแบบวงจรมอดูเลตเอฟเอ็มแบบโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เลือกใช้ ไอซี 74HC123 แสดง Schematic ของวงจรรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรมอดูเลตเอฟเอ็มแบบ โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งการคำนวณหาเวลาในการคงตัวของสัญญาณในวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.6)

$$T = C_T R_T \ln(3)$$

$$T = (1 \times 10^{-9})(123.8) \ln(3)$$

$$T = 0.136 \times 10^{-6} \text{ sec}$$



รูปที่ 3.9 วงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรตีโมดูลเตอเฟอเอ็ม แบบโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

6) การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

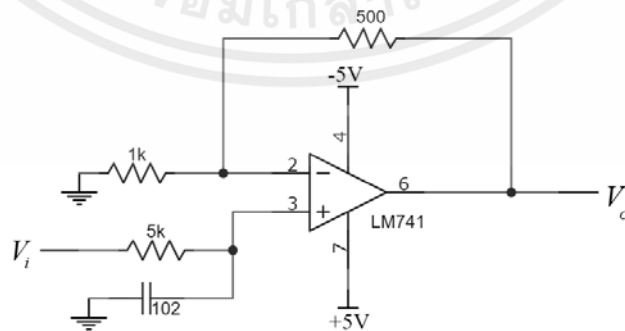
สำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเลือกใช้วงจร RC 1st Order ซึ่งค่าความถี่ตัดในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมีค่าเท่ากับ 32 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถหาค่า R ได้จากการแทนในสมการที่ (3.4) โดยกำหนดให้ C = 0.001 ไมโครฟารัด แล้วนำไปอนุกรมกับวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1.5 เท่า และแสดง Schematic ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังรูปที่ 3.10

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \tag{3.4}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$32 \times 10^3 = \frac{1}{2\pi \times R \times 0.001 \times 10^{-6}}$$

$$R = 5000 \text{ โอห์ม}$$

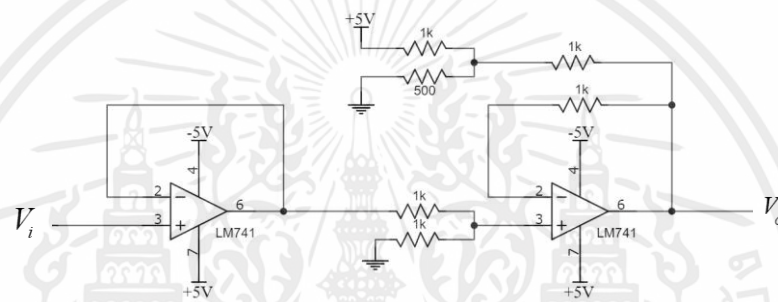


รูปที่ 3.10 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) การออกแบบวงจรบัฟเฟอร์และวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

ในการสร้างและส่งสัญญาณเชิงรีป ส่วนของการถอดรหัสสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณผลต่างถูกออกแบบมาเพื่อลดระดับสัญญาณไฟตรงของสัญญาณเชิงรีปให้เป็น 0 โวลต์ ซึ่งระดับสัญญาณไฟตรงของสัญญาณเชิงรีปที่มีค่าเท่ากับ +1.6 โวลต์ และมีอัตราขยายเท่ากับ 1 สามารถคำนวณหาค่า R_f ได้จากการแทนในสมการที่ (2.16) เมื่อ $R_1 = R_3 = R_4$ และ $R_2 = R_4 = R_f$ โดยกำหนดให้ $R_i = 1$ กิโลโอห์ม และแสดง Schematic ของวงจรบัฟเฟอร์และวงจรขยายสัญญาณผลต่างได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรบัฟเฟอร์และวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

$$V_O = \left(\frac{R_f}{R_i} \right) (V_1 - V_2); V_1 = V_C + 1.6V; V_C = \text{ระดับแรงดันสัญญาณเชิงรีป}$$

$$V_O = \left(\frac{R_f}{1k} \right) (V_C + 1.6V - 1.6)$$

$$R_f = 1 \text{ กิโลโอห์ม}$$

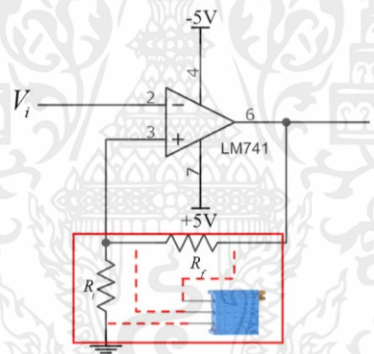
8) การออกแบบวงจรขมิตต์ทริกเกอร์

การออกแบบวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ เพื่อให้ได้สัญญาณพัลส์บวกที่มีขนาดเท่ากับ +5.00 โวลต์ และพัลส์ลบที่มีขนาดเท่ากับ -5.00 โวลต์ ผู้จัดทำเลือกใช้ความต้านทานปรับค่าได้ 50 กิโลโอห์ม แทน R_f และ R_i จากรูปที่ 2.16 ซึ่งจะได้ $R_f = 44.3$ กิโลโอห์ม และ $R_i = 7$ กิโลโอห์ม สามารถคำนวณหาค่า k ได้จากสมการที่ (2.12) และแสดง Schematic ของวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ได้ดังรูปที่ 3.12

$$k = \frac{R_i}{R_i + R_f}$$

$$k = \frac{7k}{7k + 44.3k} = 0.14$$

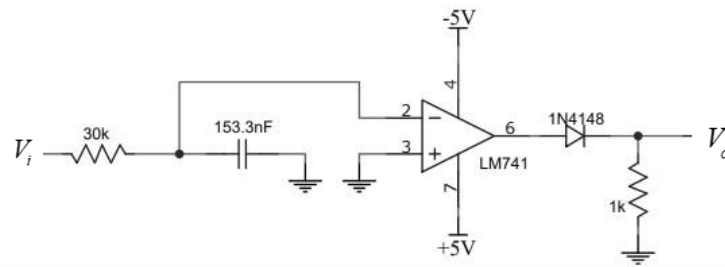
คำนวณหาค่า V_r ซึ่งจะได้ค่า $V_r = 0.14(\pm 5V) = \pm 0.7V$



รูปที่ 3.12 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์

9) การออกแบบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรขมิตต์ทริกเกอร์มีสัญญาณรบกวน จึงทำการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยต่อตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เพื่อให้เกิดการชาร์จ ดิสชาร์จของสัญญาณ แล้วนำไปต่อกับวงจรเปรียบเทียบแรงดัน การออกแบบวงจรเปรียบเทียบแรงดันเพื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณ โดยให้แรงดันอินพุตป้อนเข้าที่ขาบวกของออปแอมป์ LM741 และแรงดันอ้างอิงเป็นศูนย์ที่ขาลบของออปแอมป์ ซึ่งสามารถแสดงการต่อวงจรภายนอกของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ได้ดังรูปที่ 3.13

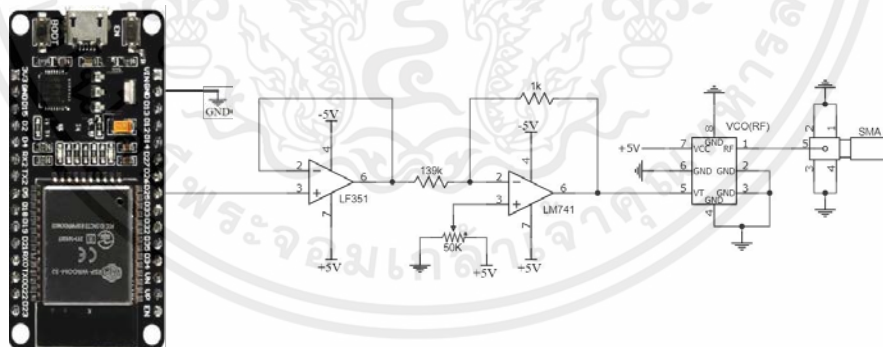


รูปที่ 3.13 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

3.1.2 ส่วนของการสร้างวงจร

1) การสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ปด้วยวงจรถ้าเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน

การสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ปด้วยวงจรถ้าเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน จะนำเอาต์พุตจากวงจรบัฟเฟอร์และวงจรรยะดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ปที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แล้ว นำไปต่อเข้ากับขา VT ของวงจรถ้าเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน เพื่อเปลี่ยนสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ปไปเป็นสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ปในย่านความถี่อาร์เอฟ และจ่ายไฟจากเครื่องจ่ายไฟ +5.00 โวลต์ ที่ขาพอร์ต +V_{CC} แสดงได้ดังรูปที่ 3.14

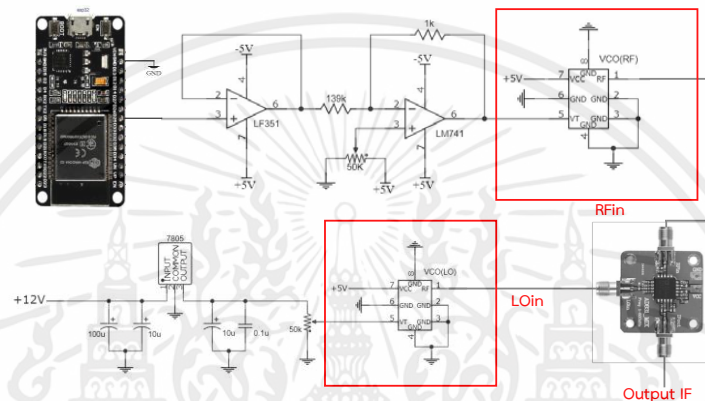


รูปที่ 3.14 วงจรในการสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป ด้วยวงจรถ้าเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การสร้างวงจรอาร์เอฟมิกเซอร์

การสร้างวงจรอาร์เอฟมิกเซอร์ ในปริยญาณิพนธ์นี้จะเลือกใช้โมดูล AD831 High Frequency RF Mixer โดยจะนำสัญญาณเอาต์พุตจากรูปที่ 3.14 มาต่อเข้ากับขา RFin และนำวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันที่มีสัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณแอลโอมาต่อเข้ากับขา LOin แสดงได้ดังรูปที่ 3.15



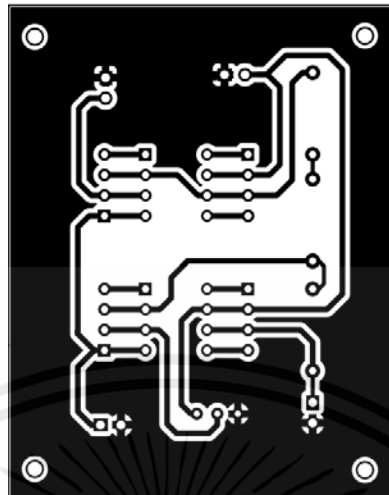
รูปที่ 3.15 การสร้างวงจรอาร์เอฟมิกเซอร์

3.1.3 ส่วนของการสร้างลายพิมพ์วงจร

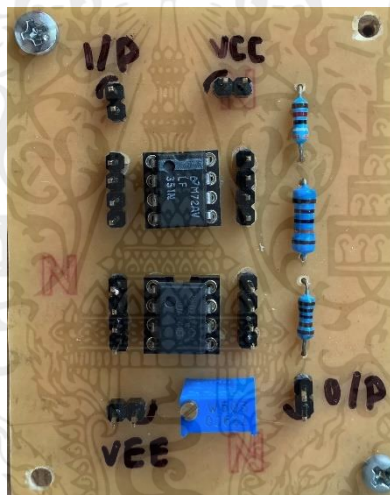
1) การสร้างวงจรบัฟเฟอร์และวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ

4-ไซคลิกชิปเซิร์ป

นำวงจรบัฟเฟอร์และวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปที่ออกแบบไว้แล้ว มาสร้างลายพิมพ์วงจรที่เว็บไซต์ EasyEDA ซึ่งจะได้ลายพิมพ์และบอร์ดที่สร้างเสร็จแล้วของวงจรบัฟเฟอร์และวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป ได้ดังรูปที่ 3.16 และดังรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



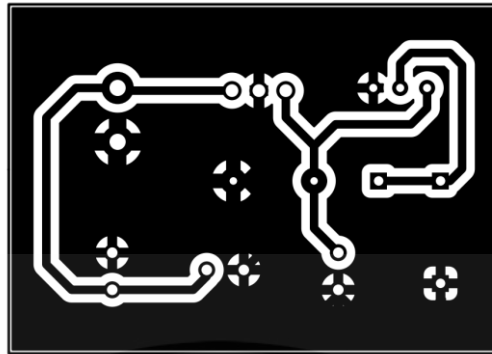
รูปที่ 3.16 ลายพิมพ์วงจรบัพเฟอร์และวงจรรายกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไชนคลิกชิปเซิร์บ



รูปที่ 3.17 วงจรบัพเฟอร์และวงจรรายกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไชนคลิกชิปเซิร์บ
ที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว

2) การสร้างวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

นำวงจรควบคุมแรงดันไฟตรงที่ออกแบบไว้แล้วมาสร้างลายพิมพ์วงจรที่เว็บไซต์ EasyEDA ซึ่งจะได้ลายพิมพ์และบอร์ดที่สร้างเสร็จแล้วของวงจรควบคุมแรงดันไฟตรงได้ดังรูปที่ 3.18 และดังรูปที่ 3.19 ตามลำดับ



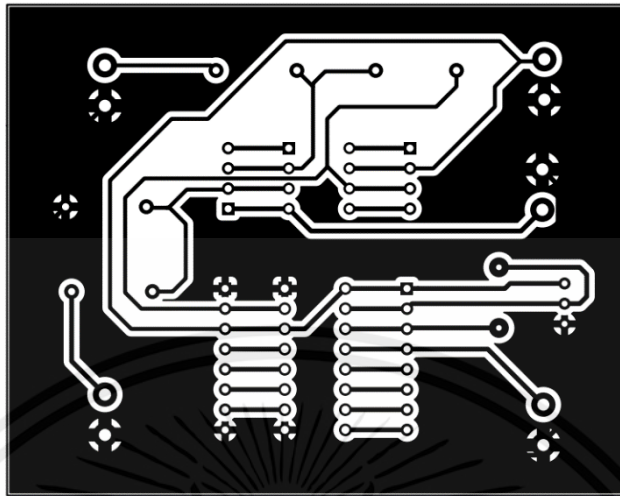
รูปที่ 3.18 ลายพิมพ์วงจรควบคุมแรงดันไฟตรง



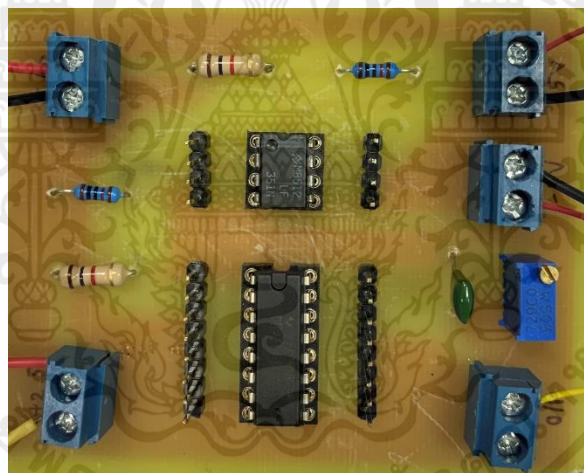
รูปที่ 3.19 วงจรควบคุมแรงดันไฟตรงที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว

3) การสร้างวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรตีมอดูเลตเอฟเอ็ม ด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมิวเบเรเตอร์

นำวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรตีมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมิวเบเรเตอร์ที่ออกแบบไว้แล้ว มาสร้างลายพิมพ์วงจรที่เว็บไซต์ EasyEDA ซึ่งจะได้ลายพิมพ์และบอร์ดที่สร้างเสร็จแล้วของวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรตีมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมิวเบเรเตอร์ได้ดังรูปที่ 3.20 และดังรูปที่ 3.21 ตามลำดับ



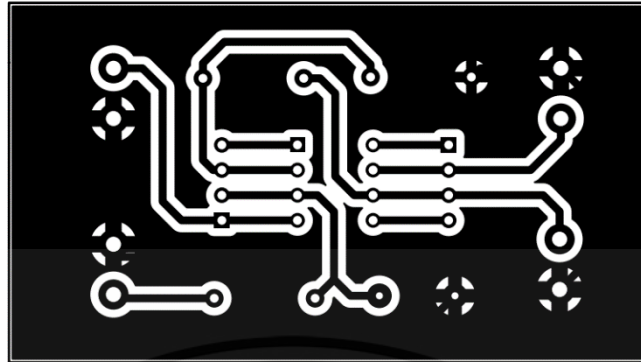
รูปที่ 3.20 ลายพิมพ์วงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรตีมอดูเลตเอฟเอ็ม ด้วยวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์



รูปที่ 3.21 วงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรตีมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรมอนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว

4) การสร้างวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

นำวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบไว้แล้วมาสร้างลายพิมพ์วงจรที่เว็บไซต์ EasyEDA ซึ่งจะได้ลายพิมพ์และบอร์ดที่สร้างเสร็จแล้วของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านได้ดังรูปที่ 3.22 และดังรูปที่ 3.23 ตามลำดับ



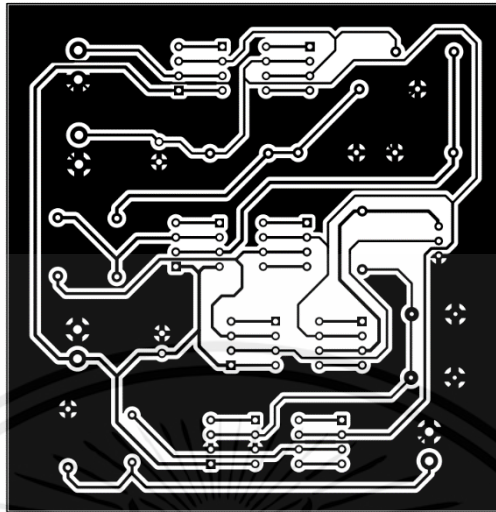
รูปที่ 3.22 ลายพิมพ์วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน



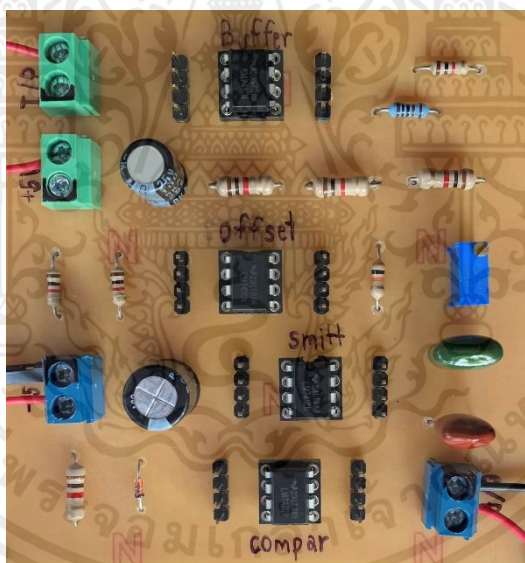
รูปที่ 3.23 วงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว

5) การสร้างวงจรบัฟเฟอร์ วงจรขยายสัญญาณผลต่าง วงจรชนิดต์ทริกเกอร์ และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

นำวงจรบัฟเฟอร์ วงจรขยายสัญญาณผลต่าง วงจรชนิดต์ทริกเกอร์ และวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่ออกแบบไว้แล้วมารวมกัน จากนั้นนำมาสร้างลายพิมพ์วงจรที่เว็บไซต์ EasyEDA ซึ่งจะได้ลายพิมพ์และบอร์ดที่สร้างเสร็จแล้วของวงจรบัฟเฟอร์ วงจรขยายสัญญาณผลต่าง วงจรชนิดต์ทริกเกอร์และวงจรเปรียบเทียบแรงดันได้ดังรูปที่ 3.24 และดังรูปที่ 3.25 ตามลำดับ



รูปที่ 3.24 ลายพิมพ์วงจรบัฟเฟอร์ วงจรขยายสัญญาณผลต่าง วงจรขมิตต์ทริกเกอร์ และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน



รูปที่ 3.25 วงจรบัฟเฟอร์ วงจรขยายสัญญาณผลต่าง วงจรขมิตต์ทริกเกอร์ และวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่สร้างเสร็จแล้ว

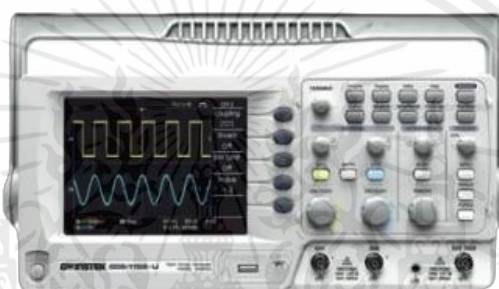
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ในปฏิญานพนธ์นี้มีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

3.2.1 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

เครื่องออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดองค์ประกอบของสัญญาณต่าง ๆ ให้ออกมาเป็นรูปร่างของสัญญาณไฟฟ้า เช่น ลักษณะรูปร่างของสัญญาณ, การวัดขนาดของสัญญาณ, การวัดความถี่ของสัญญาณ รวมถึงวัดกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 เครื่องออสซิลโลสโคป

3.2.2 เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply)

เครื่องจ่ายไฟเป็นอุปกรณ์ที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับโหลดไฟฟ้าของวงจร ซึ่งจะเป็นการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง สามารถควบคุมแรงดันหรือกระแสเอาต์พุตให้มีค่าที่คงที่ แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 เครื่องจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เครื่องสร้างสัญญาณ (Signal Generator)

เครื่องสร้างสัญญาณเป็นเครื่องมือทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณรูปแบบต่าง ๆ โดยสามารถปรับได้ทั้งความถี่และแอมพลิจูดตามที่ต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

3.2.4 เครื่องวัดสเปกตรัม (Spectrum analyzer)

เครื่องวัดสเปกตรัมเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการวัดและวิเคราะห์สัญญาณในย่านความถี่สูง โดยสามารถแสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่มีค่าความถี่และค่าความแรงของสัญญาณที่แตกต่างกันในแต่ละความถี่ แสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 เครื่องวัดสเปกตรัม

3.2.5 โปรแกรม Arduino IDE

เป็นโปรแกรมสำหรับการเขียนโปรแกรมควบคุม ที่รองรับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C/C++ ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับบอร์ด Arduino โดยใช้เขียนเพื่อให้โปรแกรมสั่งให้บอร์ดสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 3.30



```

sketch_new1a
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3 }
4
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8 }
9

```

รูปที่ 3.30 หน้าต่างโปรแกรม Arduino IDE

3.2.6 เว็บไซต์ EasyEDA

โปรแกรมบนเว็บเบราว์เซอร์สำหรับออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่สำหรับออกแบบวงจร (Schematic) และออกแบบ PCB (Printed Circuit Board) แบบ EDA (Electronic Design Automation) ที่มีขนาดเล็กและประสิทธิภาพสูง แสดงได้ดังรูปที่ 3.31



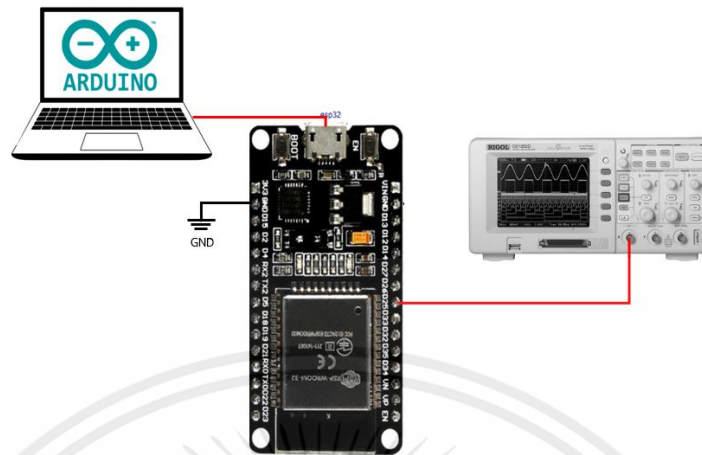
รูปที่ 3.31 เว็บไซต์ EasyEDA

3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

3.3.1 การทดสอบการทำงานของโปรแกรมการสร้างสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป

ทำการอัปโหลดโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จากนั้นทำการติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 กับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยให้ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (CH1) ต่อเข้ากับขาที่ 25 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และทำการดูสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.32

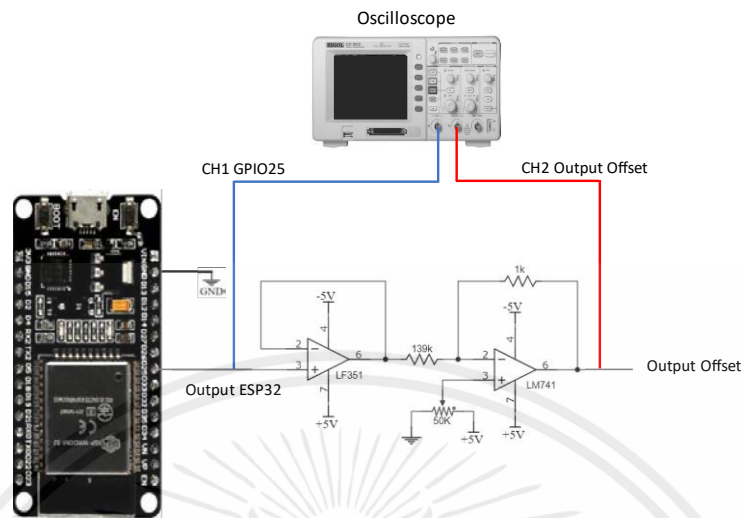
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 การติดตั้งอุปกรณ์การทำงานของโปรแกรมการสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป

3.3.2 การทดสอบวงจรบัฟเฟอร์และวงจรระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป

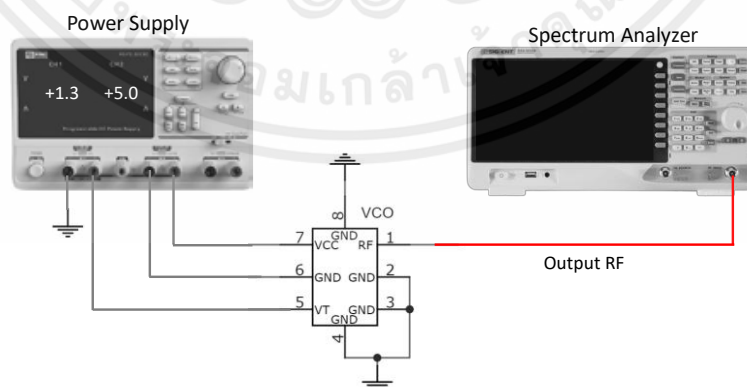
ทำการติดตั้งวงจรบัฟเฟอร์และวงจรระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป ที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว นำไปต่อเข้ากับเครื่องจ่ายไฟสำหรับจ่ายไฟ +5.00 และ -5.00 โวลต์ ที่พอร์ต $+V_{CC}$ และ $-V_{CC}$ ตามลำดับ แล้วเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ขาที่ 25 เข้ากับพอร์ต อินพุตของวงจรบัฟเฟอร์และต่อกับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยใช้ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (CH1) ต่อเข้ากับขาที่ 25 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และช่องสัญญาณที่สอง (CH2) ต่อเข้ากับขาที่ 6 ของพอร์ตเอาต์พุตวงจรระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป จากนั้นทำการสังเกตสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ปที่มีการขยายรูปสัญญาณบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 การติดตั้งอุปกรณ์ของวงจรบัฟเฟอร์และวงจรระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ฟ

3.3.3 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน

ทำการปรับค่าศักย์ดาไฟฟ้าตั้งแต่ 0.10 โวลต์ ถึง 3.00 โวลต์ ที่ขา VT ของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน เพื่อทำการหาความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์กับค่าศักย์ดาไฟฟ้า จากนั้นทำการจ่ายไฟ +5.00 และ +1.30 โวลต์ ที่พอร์ต V_{CC} และพอร์ต VT ตามลำดับ จากนั้นนำขาเอาต์พุต RF ต่อเข้ากับเครื่องวัดสเปกตรัม และทำการดูแท่งสเปกตรัมของข้อมูลบนหน้าจอแสดงเครื่องวัดสเปกตรัม ซึ่งสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.34

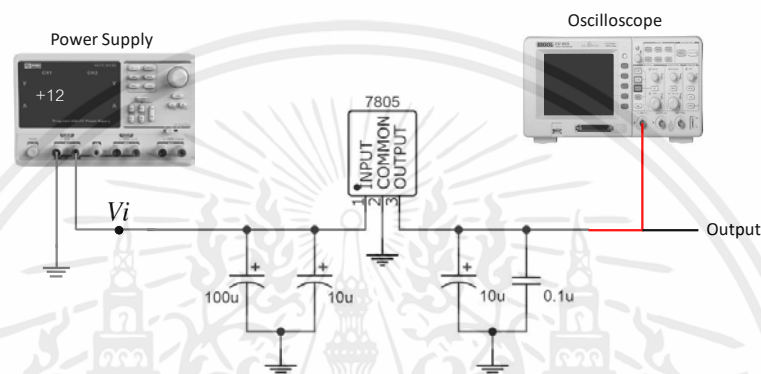


รูปที่ 3.34 การติดตั้งอุปกรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

ทำการติดตั้งวงจรควบคุมแรงดันไฟตรงที่สร้างเสร็จสิ้นแล้ว นำไปต่อเข้ากับเครื่องจ่ายไฟสำหรับจ่ายไฟ +12.00 โวลต์ ที่ขาพอร์ต V_i แล้วนำเอาต์พุตไปต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป จากนั้นสังเกตสัญญาณบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.35

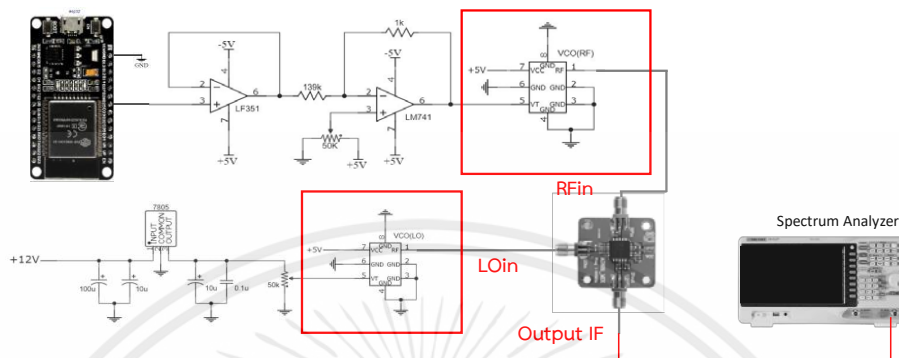


รูปที่ 3.35 การติดตั้งอุปกรณ์ของวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

3.3.5 การทดสอบการทำงานของโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์

ทำการต่อวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันจำนวน 2 ตัวเข้ากับโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์เพื่อทำการดาวน์โหลดคอนเวอร์เตอร์สัญญาณ โดยแบ่งวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันออกเป็น 2 ฝั่ง คือ ฝั่งความถี่อาร์เอฟ (Radio-Frequency) และฝั่งความถี่แอลโอ (Local-Frequency) และจะทำการจ่ายไฟเลี้ยง +5.00 โวลต์เข้าที่ขา $+V_{CC}$ ของโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์และวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันทั้ง 2 ตัว ในส่วนของฝั่งความถี่อาร์เอฟจะทำการจ่ายไฟจากเครื่องจ่ายไฟ +5.00 โวลต์ ที่ขาพอร์ต $+V_{CC}$ และนำข้อมูลจากเอาต์พุตของวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์บ ป้อนเป็นแรงดันควบคุมไฟฟ้าให้กับขาพอร์ต VT จากนั้นนำเอาต์พุตอาร์เอฟ (RFout) ทางฝั่งความถี่อาร์เอฟไปเข้าที่ขาอินพุตอาร์เอฟของโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์ และในฝั่งความถี่แอลโอจะทำการต่อเข้ากับวงจรควบคุมแรงดันเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ โดยจ่ายไฟจากเครื่องจ่ายไฟ +6.00 โวลต์เข้าที่ขาพอร์ต VS และ +5.00 โวลต์ ที่ขาพอร์ต $+V_{CC}$ จากนั้นนำเอาต์พุตอาร์เอฟทางฝั่งความถี่แอลโอไปเข้าที่ขาอินพุตแอลโอของโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์ สุดท้ายนำเครื่องวัดสเปคตรัมไปต่อเข้าที่

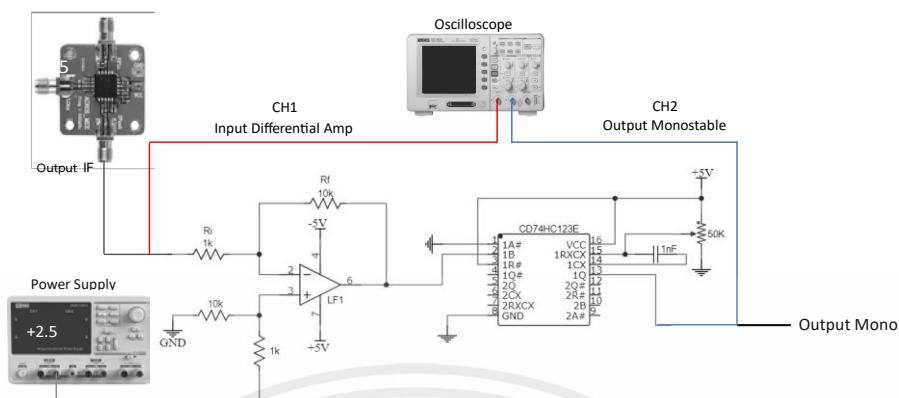
ขาเอาต์พุตไอเอฟ เพื่อวัดสัญญาณที่ออกมาซึ่งจะได้ความถี่ไอเอฟที่ 910 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 การติดตั้งอุปกรณ์การทำงานของมอดูเลเตอร์เอพมิกเซอร์

3.3.6 การทดสอบวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรมอดูเลตเอพเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

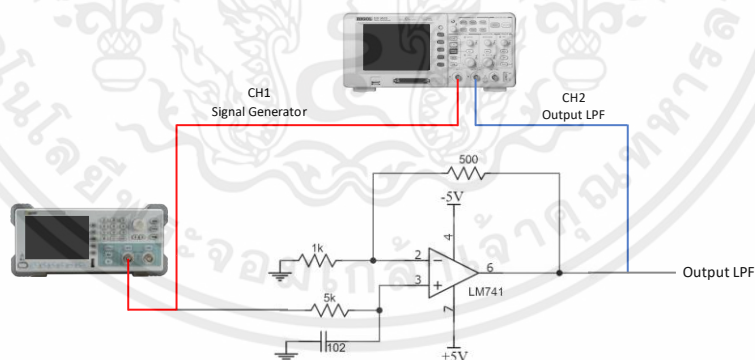
ทำการติดตั้งวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรมอดูเลตเอพเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟสำหรับจ่ายไฟ +5.00 และ -5.00 โวลต์ ที่พอร์ต $+V_{CC}$ และ $-V_{CC}$ ตามลำดับ แล้วทำการเชื่อมต่อกับมอดูเลเตอร์เอพมิกเซอร์ที่ขาเอาต์พุตไอเอฟเข้ากับพอร์ตอินพุตของวงจรขยายสัญญาณผลต่าง จากนั้นนำสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณผลต่างไปเข้าที่พอร์ตอินพุตของวงจรมอดูเลตเอพเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ และต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยให้ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (CH1) ต่อเข้ากับขาที่ 2 ของพอร์ตอินพุตวงจรขยายสัญญาณผลต่าง และช่องสัญญาณที่สอง (CH2) ต่อเข้ากับขาที่ 13 ของพอร์ตเอาต์พุตวงจรมอดูเลตเอพเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ จากนั้นสังเกตดูสัญญาณที่มีการมอดูเลตแล้วบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 การติดตั้งอุปกรณ์ของวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรตีโมดูลเตอเพอเอ็ม ด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์

3.3.7 การทดสอบวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

ทำการติดตั้งวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟสำหรับจ่ายไฟ +5.00 และ -5.00 โวลต์ ที่พอร์ต $+V_{CC}$ และ $-V_{CC}$ ตามลำดับ จากนั้นทำการป้อนสัญญาณอินพุตจากเครื่องสร้างสัญญาณ ซึ่งสัญญาณอินพุตคือ สัญญาณไซน์ ที่ความถี่ตั้งแต่ 100 เฮิรตซ์ - 100 กิโลเฮิรตซ์ มีแอมพลิจูดขนาด $1 V_{pp}$ และสังเกตดูสัญญาณเอาต์พุตบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.38

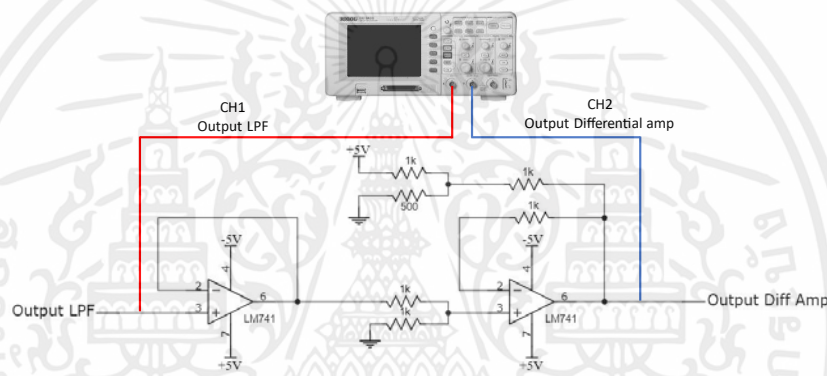


รูปที่ 3.38 การติดตั้งอุปกรณ์วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.8 การทดสอบวงจรบัฟเฟอร์และวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

ทำการติดตั้งวงจรบัฟเฟอร์และวงจรขยายสัญญาณผลต่างที่สร้างเสร็จแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟสำหรับจ่ายไฟ +5.00 และ -5.00 โวลต์ ที่พอร์ต $+V_{CC}$ และ $-V_{CC}$ ตามลำดับ จากนั้นนำสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไปเข้าที่พอร์ตอินพุตของวงจรบัฟเฟอร์ และต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยให้ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (CH1) ต่อเข้ากับขาที่ 6 ของออปแอมป์ LM741 วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน และช่องสัญญาณที่สอง (CH2) ต่อเข้ากับขาที่ 6 ของออปแอมป์ LM741 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง จากนั้นสังเกตดูสัญญาณบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.39

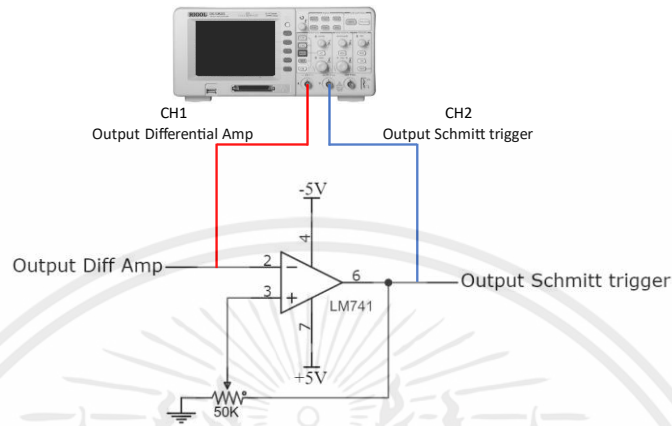


รูปที่ 3.39 การติดตั้งอุปกรณ์ของวงจรบัฟเฟอร์และวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

3.3.9 การทดสอบวงจรขมิตต์ทริกเกอร์

ในปริณยานิพนธ์นี้ นอกจากการสร้างสัญลักษณ์ไซคลิกชิปเซิร์บ ยังมีการสร้างและส่งสัญลักษณ์เซิร์บในรูปแบบที่เป็นบล็อกข้อมูลแบบอะซิงโครนัส โดยมีวงจรขมิตต์ทริกเกอร์เป็นส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนสัญลักษณ์เซิร์บให้เป็นระดับสัญญาณบิตข้อมูลของตัวบล็อกข้อมูลแบบอะซิงโครนัส ดังนั้นจึงมีการทดสอบการทำงานของวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ โดยทำการติดตั้งวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ที่สร้างเสร็จแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟสำหรับจ่ายไฟ +5.00 และ -5.00 โวลต์ ที่พอร์ต $+V_{CC}$ และ $-V_{CC}$ ตามลำดับ จากนั้นนำสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณผลต่างไปเข้าที่พอร์ตอินพุตของวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ และต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยให้ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (CH1) ต่อเข้ากับขาที่ 6 ของออปแอมป์ LM741 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง และช่องสัญญาณที่สอง (CH2) ต่อเข้ากับขาที่ 6 ของออปแอมป์ LM741 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์

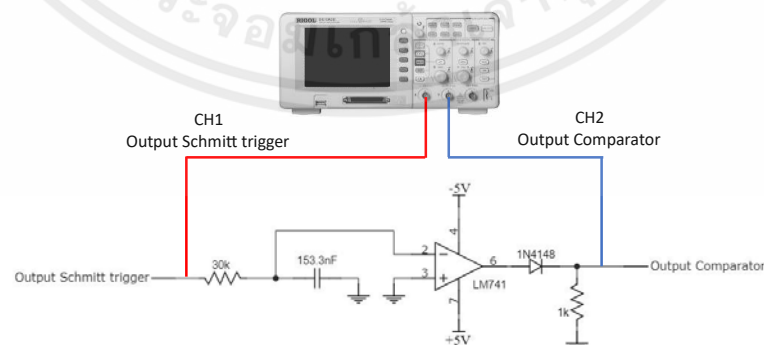
จากนั้นสังเกตดูสัญญาณที่มีการถดรหัสข้อมูลบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 การติดตั้งอุปกรณ์ของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์

3.3.10 การทดสอบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

ทำการติดตั้งวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟสำหรับจ่ายไฟ +5.00 และ -5.00 โวลต์ ที่พอร์ต $+V_{CC}$ และ $-V_{CC}$ ตามลำดับ จากนั้นนำสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ไปเข้าที่พอร์ตอินพุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน และต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยให้ช่องสัญญาณที่หนึ่ง (CH1) ต่อเข้ากับขาที่ 6 ของพอร์ตเอาต์พุตวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ และช่องสัญญาณที่สอง (CH2) ต่อเข้ากับขาที่ 6 ของพอร์ตเอาต์พุตวงจรเปรียบเทียบแรงดัน จากนั้นสังเกตดูสัญญาณที่มีการเปรียบเทียบแรงดันบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.41



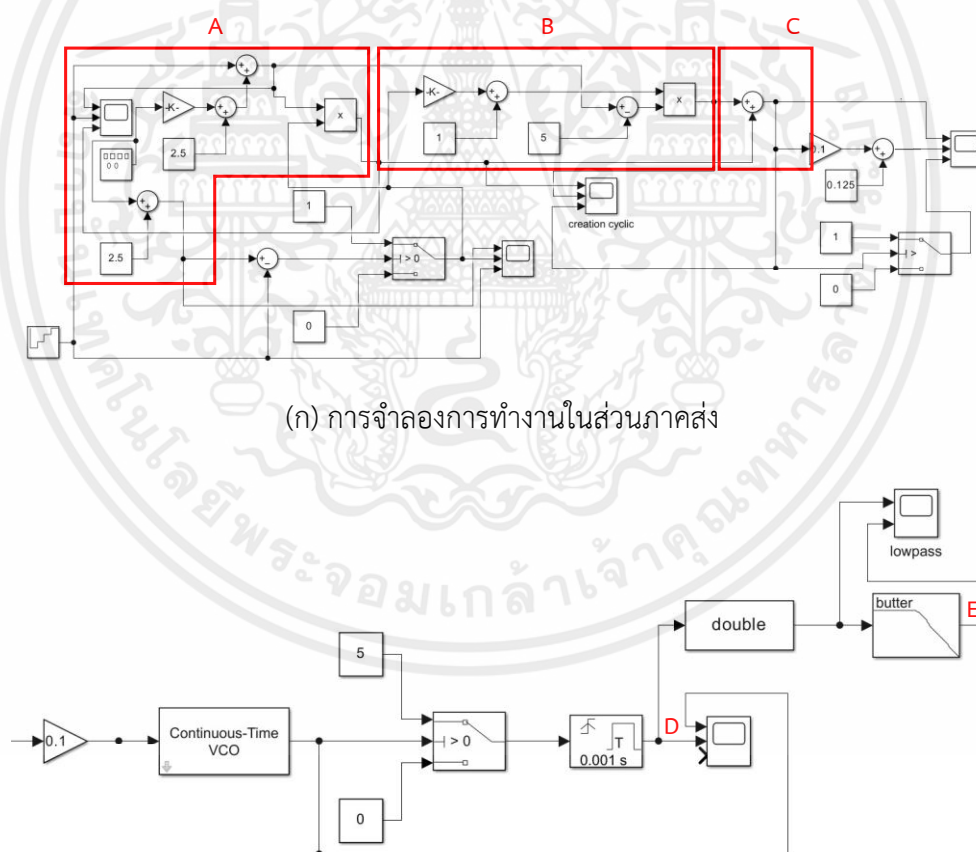
รูปที่ 3.41 การติดตั้งอุปกรณ์ของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.11 การทดสอบวงจรรวมระบบ

1) ทดสอบการจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink

ในการทดสอบวงจรรวมระบบได้ทำการจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink สามารถทดสอบสัญลักษณ์ 4-ไซคลิปปิซเซอร์ปได้ดังบล็อก C โดยการสร้างสัญลักษณ์ 4-ไซคลิปปิซเซอร์ปจะใช้หลักการเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.1 ซึ่งสามารถทดสอบได้ดังบล็อก A และ B ตามลำดับ จากนั้นนำสัญลักษณ์ 4-ไซคลิปปิซเซอร์ปที่ได้ไปผ่านวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน เพื่อให้ได้สัญญาณ 4-ไซคลิปปิซเซอร์ป จากนั้นนำไปตีมอดูเลตผ่านวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ทดสอบได้ที่จุด D แล้วนำสัญญาณไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านทดสอบได้ที่จุด E แสดงแผนภาพการจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ดังรูปที่ 3.42



(ก) การจำลองการทำงานในส่วนภาคส่ง

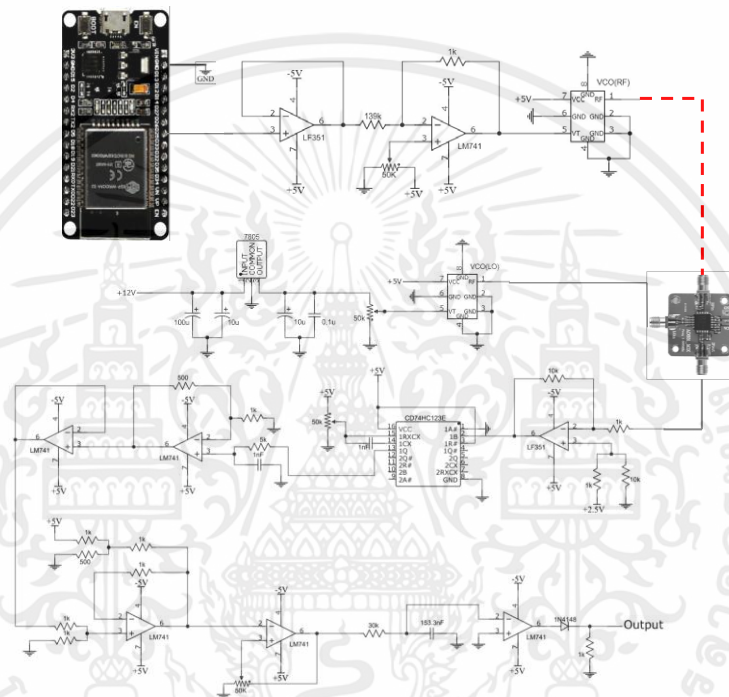
(ข) การจำลองการทำงานในส่วนภาครับ

รูปที่ 3.42 การจำลองการทำงานวงจรรวมระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

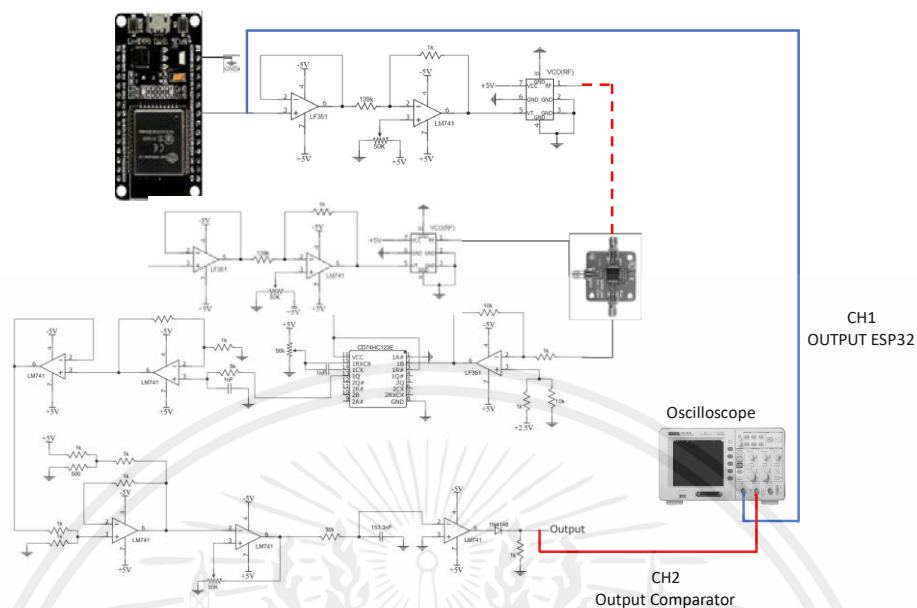
2) ทดสอบวงจรรวมระบบแบบใช้สาย

การทดสอบวงจรรวมระบบแบบใช้สายจะนำวงจรทางฝั่งส่งและฝั่งรับดังรูปที่ 3.3 และดังรูปที่ 3.4 มาต่อรวมกันโดยใช้สายดังรูปที่ 3.43 ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบวงจรรวมระบบแบบใช้สายดังรูปที่ 3.44 และแสดงการทดสอบวงจรรวมระบบที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วแบบใช้สายดังรูปที่ 3.45

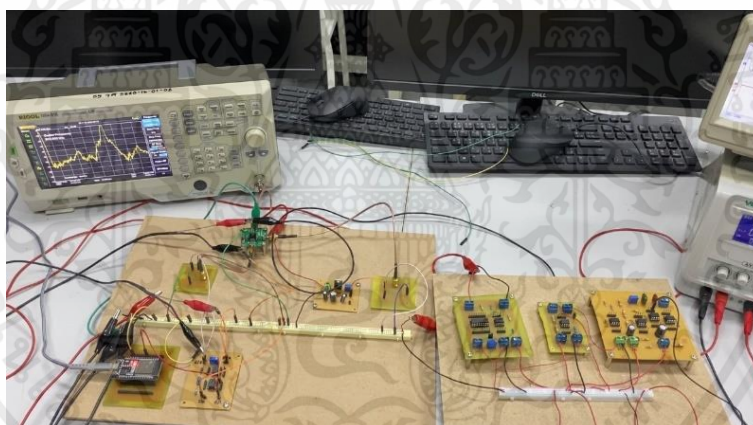


รูปที่ 3.43 วงจรรวมระบบแบบใช้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.44 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบวงจรรวมระบบแบบใช้สาย

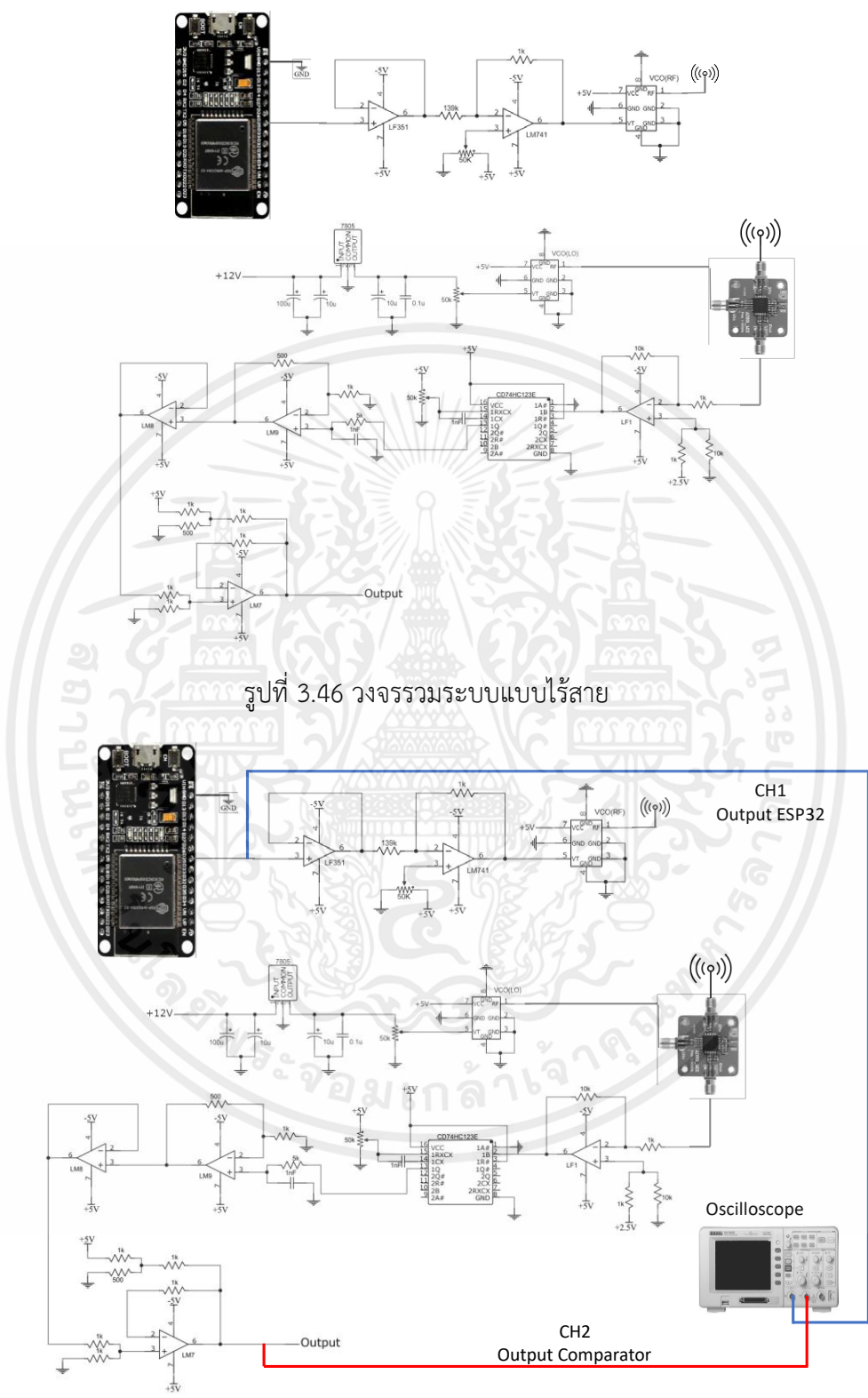


รูปที่ 3.45 ทดสอบวงจรรวมระบบที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วแบบใช้สาย

3) ทดสอบวงจรรวมระบบแบบไร้สาย

การทดสอบวงจรรวมระบบแบบไร้สายจะนำวงจรทางฝั่งส่งและฝั่งรับดังรูปที่ 3.3 และดังรูปที่ 3.4 มาต่อรวมกันโดยใช้สายอากาศที่มีความยาวขนาด 17 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.46 ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบวงจรรวมระบบแบบไร้สายดังรูปที่ 3.47 และแสดงการทดสอบวงจรรวมระบบที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วแบบไร้สายดังรูปที่ 3.48

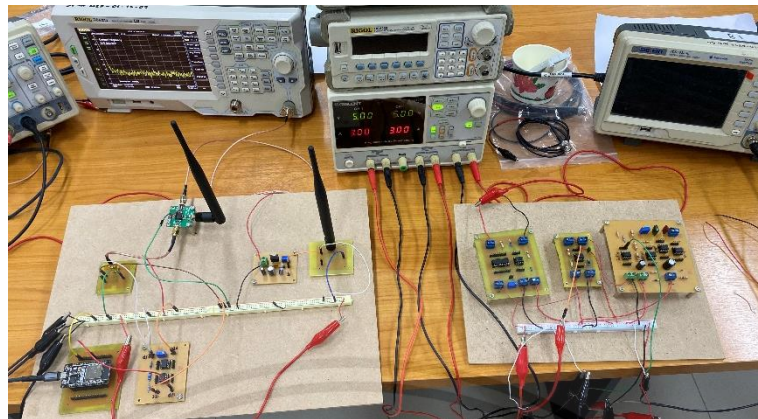
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.46 วงจรรวมระบบแบบไร้สาย

รูปที่ 3.47 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบวงจรรวมระบบแบบไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.48 ทดสอบวงจรรวมระบบที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วแบบไร้สาย

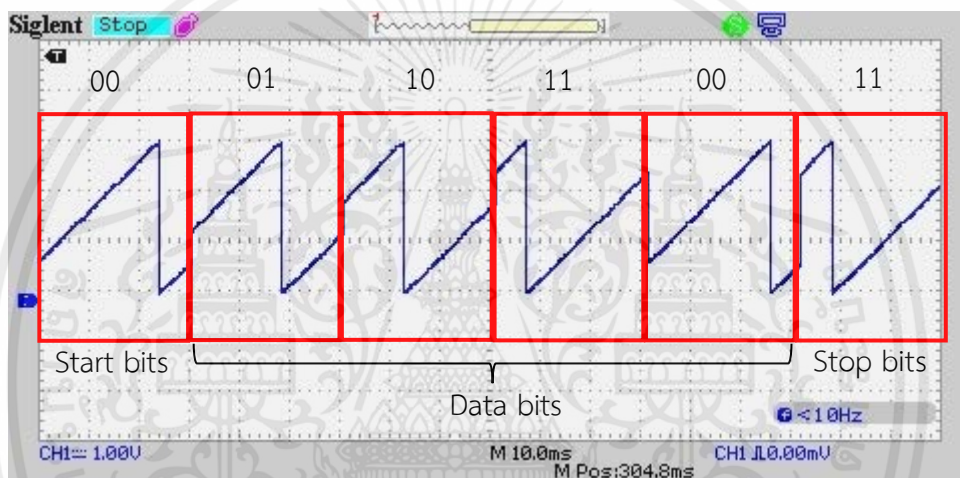
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมการสร้างสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป

ทำการอัปโหลดโปรแกรมลงไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จากนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.32 และทำการวัดผลการทดสอบด้วยออสซิลโลสโคป ดังแสดงผลการทดสอบได้ ดังรูปที่ 4.1

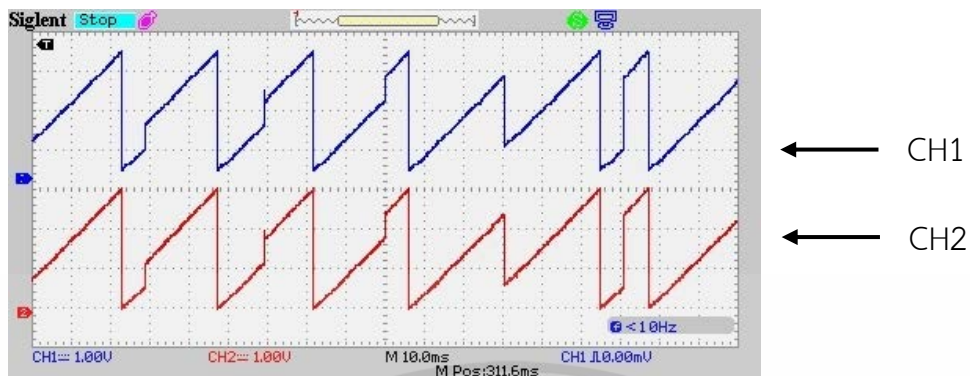


รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมการสร้างสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป (CH1)

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบการสร้างสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป ที่ได้จาก Arduino IDE โดยทำการส่งตัวอักษร “I” พร้อมบิตเริ่มต้นและบิตสุดท้าย โดยกำหนดให้บิตเริ่มต้นมีไบนารีบิตคือ “00” และไบนารีบิตสุดท้ายคือ “11”

4.2 ผลการทดสอบวงจรบัฟเฟอร์และวงจรรักษาแรงดันของสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์วงจรบัฟเฟอร์และวงจรรักษาแรงดันของสัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟ แล้วเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 โดยการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.33 โดยมีผลการทดสอบวงจรบัฟเฟอร์แสดงดังรูปที่ 4.2



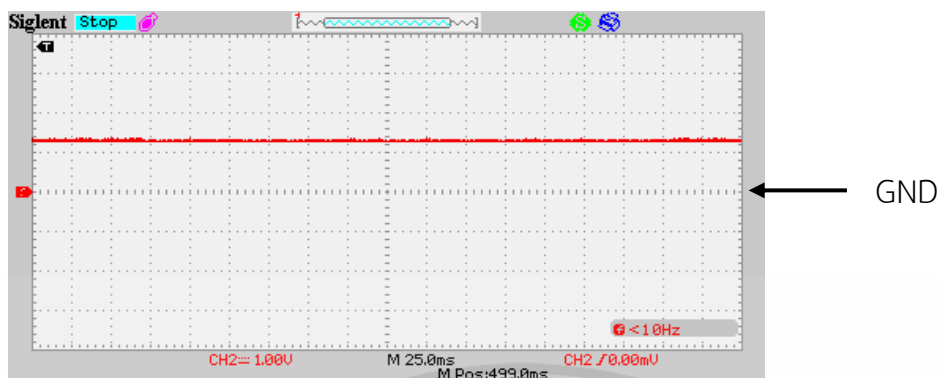
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรบัฟเฟอร์

(CH1) สัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Arduino IDE

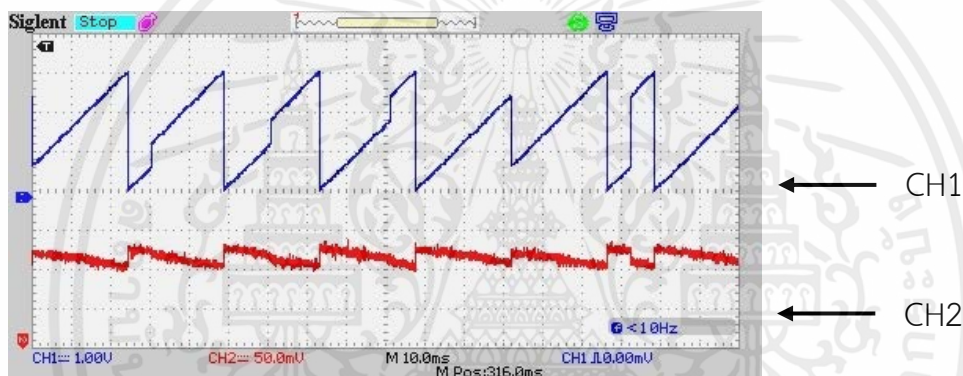
(CH2) เอาต์พุตของวงจรบัฟเฟอร์

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าสัญญาณ CH1 ที่เป็นอินพุตของวงจรบัฟเฟอร์ และ CH2 ที่เป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรบัฟเฟอร์ มีลักษณะสัญญาณที่เหมือนกัน

สำหรับผลการทดสอบวงจรระดับแรงดันและลดขนาดของสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป แสดงผลการทดสอบการยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปและการลดขนาดของสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปได้ดังรูปที่ 4.3



(ก) ผลการทดสอบการยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป
ที่ยังไม่มีการขยายดูรายละเอียดของสัญญาณ



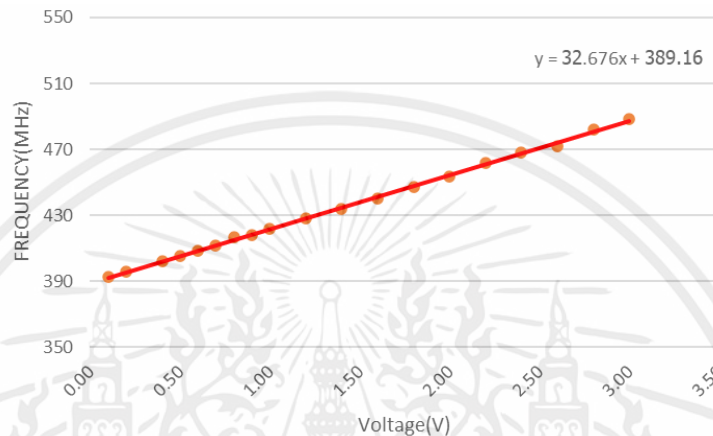
(ข) ผลการทดสอบการลดขนาดของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบวงจรยกระดับแรงดันและลดขนาดของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป
(CH1) สัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป
(CH2) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ป

จากรูปที่ 4.3 (ก) ระดับแรงดันของสัญญาณมีการยกระดับขึ้นไป +1.34 โวลต์ และ
จากรูปที่ 4.3 (ข) CH2 ขนาดของสัญญาณ 4-ไซคลิกซิปเซิร์ปจากค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของ
สัญญาณมีขนาดต่างกัน 10 มิลลิโวลต์

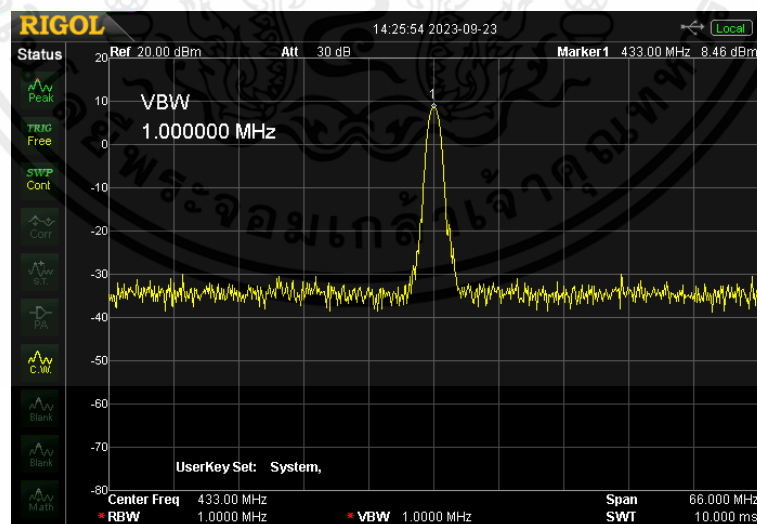
4.3 ผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.34 และทำการปรับค่าศักย์ดาไฟฟ้าตั้งแต่ 0.1 โวลต์ ถึง 3.0 โวลต์ ที่ขา VT ของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน เพื่อทำการหาความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์กับค่าศักย์ดาไฟฟ้า แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน

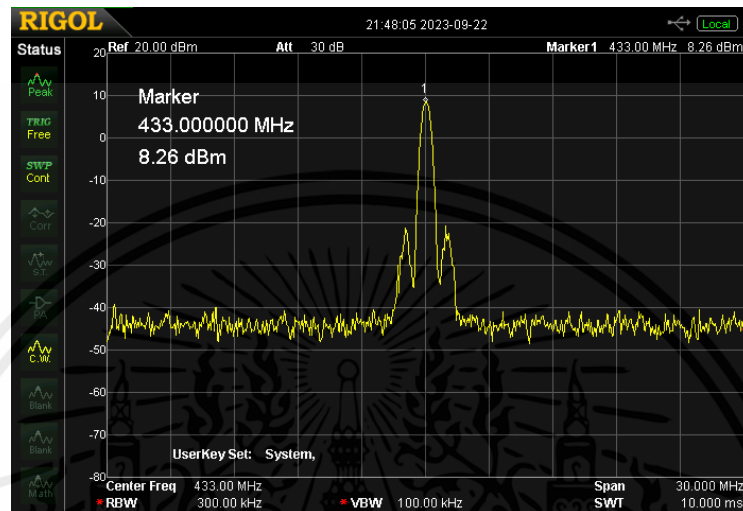
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าศักย์ดาไฟฟ้าที่ 1.3 โวลต์ จะทำให้วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันมีความถี่ที่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ และสามารถแสดงแท่งสเปกตรัมยืนยัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมแสดงผลทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน
ที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป ไปผ่านวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน จะเกิดการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม โดยมีสัญญาณพาหะที่ความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ และมีไซด์แบนด์ (Side band) แสดงได้ดังรูปที่ 4.6

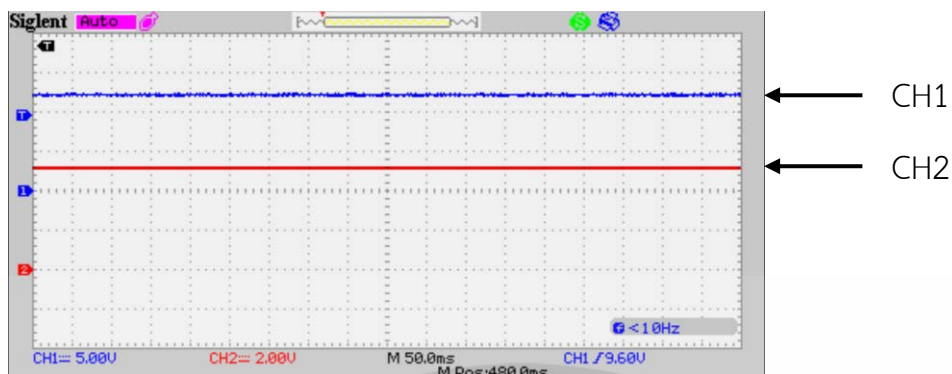


รูปที่ 4.6 สเปกตรัมแสดงผลการมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยสัญญาณเซิร์ปที่มีสัญญาณพาหะที่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์

จากรูป 4.6 สเปกตรัมแท่งกลางจะมีค่าความถี่ที่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์ สเปกตรัมแท่งซ้ายมีค่าความถี่ 432.05 เมกะเฮิร์ตซ์ และสเปกตรัมแท่งขวามีค่าความถี่ 433.95 เมกะเฮิร์ตซ์ สรุปได้ว่ามีแบนด์วิดท์เท่ากับ 190 กิโลเฮิร์ตซ์

4.4 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.35 แสดงสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างอินพุตวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง (CH1) กับเอาต์พุตของวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง (CH2) ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

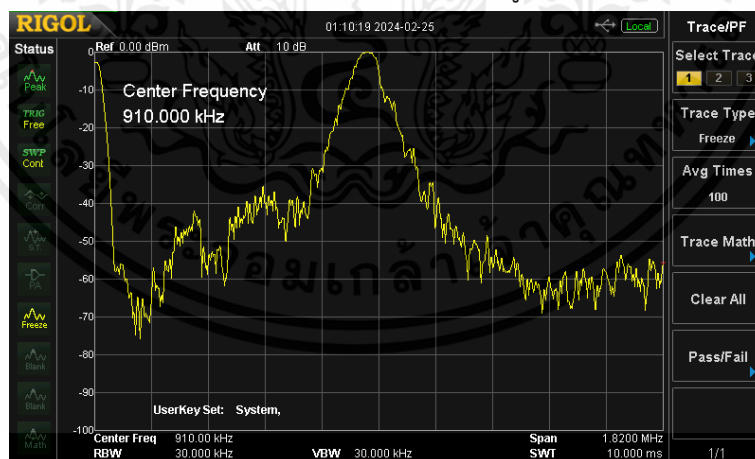
(CH1) สัญญาณอินพุตวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

(CH2) เอาต์พุตของวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง

จากรูปที่ 4.7 อินพุตวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง (CH1) มีค่า 12 โวลต์ จะได้เอาต์พุตของวงจรควบคุมแรงดันไฟตรง (CH2) มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเป็นไปตามการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของไอซี 7805

4.5 ผลการทดสอบการทำงานของโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.36 เพื่อทำการดาวน์โหลดคอนเวอร์เตอร์สัญญาณ ให้ได้ความถี่ไอเอฟที่ 910 กิโลเฮิร์ตซ์ จะได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8



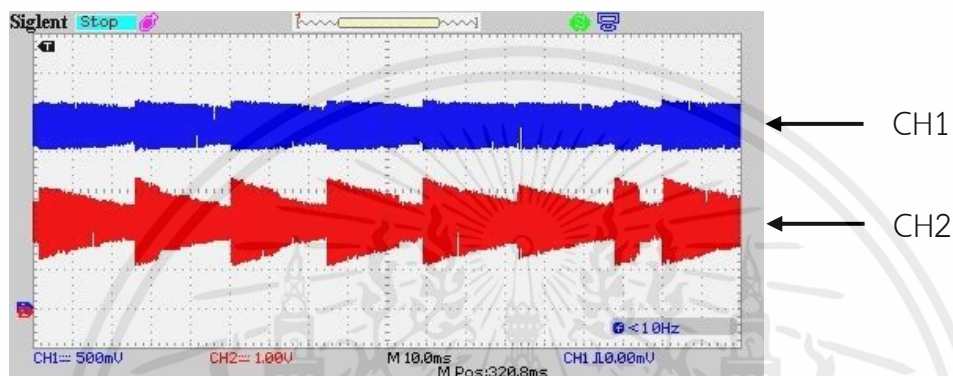
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมแสดงผลการทดสอบโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าแท่งสเปกตรัมที่สูงสุดมีค่าความถี่ที่ 910 กิโลเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรดีมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

เมื่อทำการติดตั้งวงจรขยายสัญญาณผลต่างและวงจรดีมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟ แล้วเชื่อมต่อกับโมดูลอาร์เอฟมิกเซอร์ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.37 แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.9



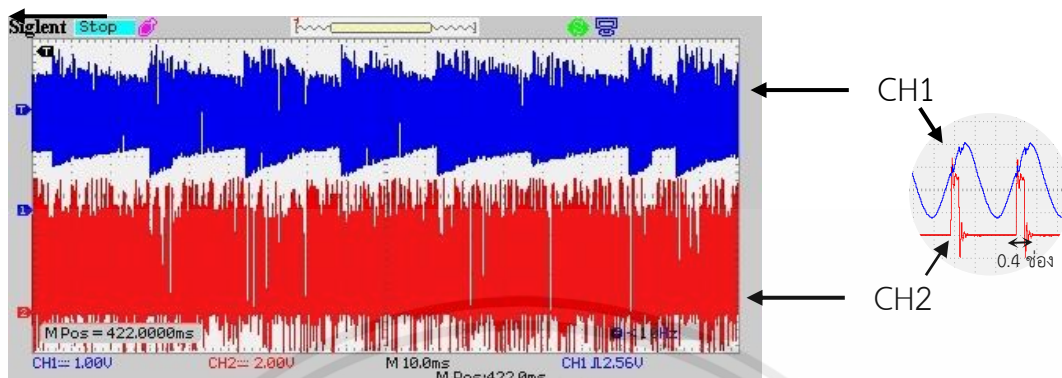
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

(CH1) สัญญาณเอาต์พุตไอเอฟ

(CH2) เอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

จากรูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุตไอเอฟมีระดับแรงดันไฟตรง +2.3 โวลต์ แล้วเมื่อไปทำการลบด้วยไฟตรง +2.5 โวลต์ และมีอัตราการขยายของสัญญาณ 10 เท่า ตามการออกแบบตั้งหัวข้อที่ 3.1.1 หัวข้อย่อยที่ 5

ส่วนผลการทดสอบของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์

(CH1) สัญญาณเอาต์พุตวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

(CH2) เอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์

จากรูปที่ 4.10 เมื่อทำการขยายลงไปจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์เกิดการทรักที่ขอบขาขึ้น

การคำนวณหาค่าเวลาการคงตัว (T) ของสัญญาณในวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์จากออสซิลโลสโคป

$$T = \text{ค่าเวลาการคงค่าของเอาต์พุต} \times \text{Time / div}$$

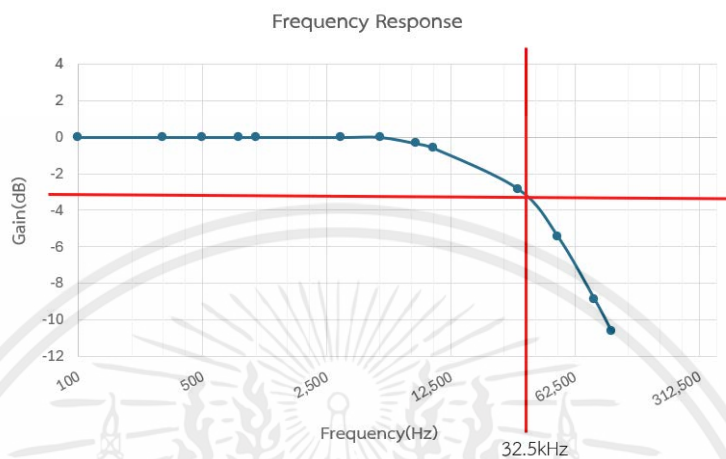
$$T = 0.4 \times 500 \times 10^{-9} \text{ sec}$$

$$T = 0.2 \times 10^{-6} \text{ sec}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

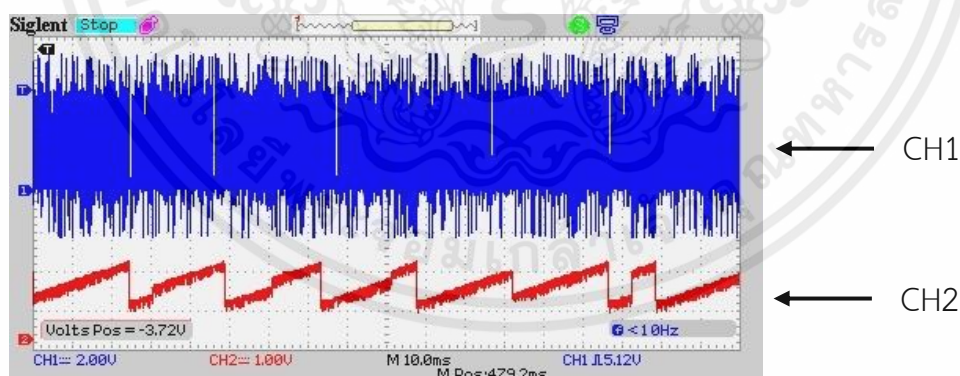
ผลการตอบสนองทางความถี่ แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูปที่ 4.11 เมื่อทำการหาค่าความถี่ตัด จะได้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 32.5 กิโลเฮิรตซ์

แล้วเมื่อนำเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งมีผลการตอบสนองทางความถี่ข้างต้น โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.38 และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์การนำเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

(CH1) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

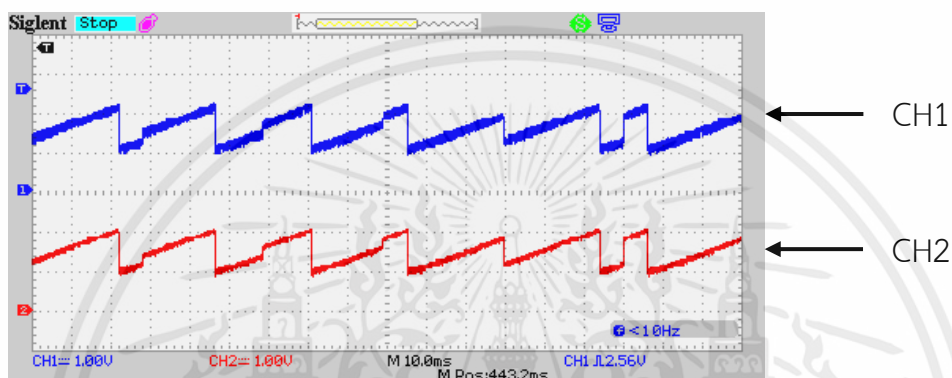
(CH2) เอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะได้สัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปออกมา

4.8 ผลการทดสอบวงจรบัฟเฟอร์และวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

เมื่อทำการติดตั้งวงจรบัฟเฟอร์และวงจรขยายสัญญาณผลต่างที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.39 แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.13



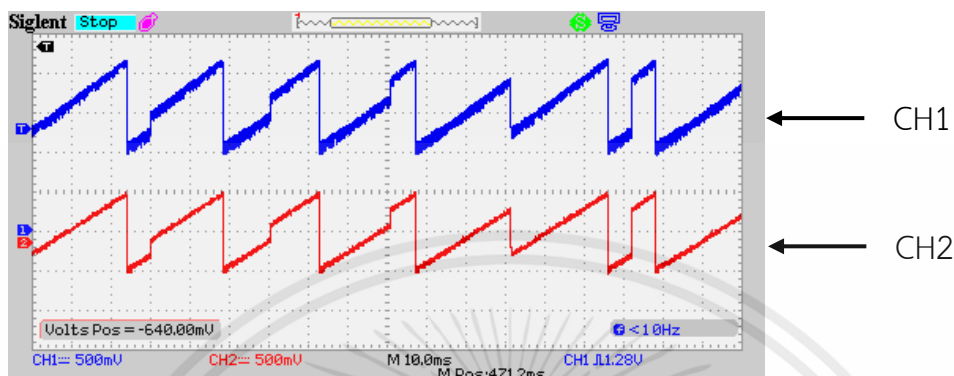
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบวงจรบัฟเฟอร์

(CH1) เอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

(CH2) เอาต์พุตวงจรบัฟเฟอร์

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าสัญญาณ CH1 ที่เป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และ CH2 ที่เป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรบัฟเฟอร์ มีลักษณะสัญญาณที่เหมือนกับสัญญาณอินพุต

สำหรับผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณผลต่าง แสดงผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณผลต่างได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

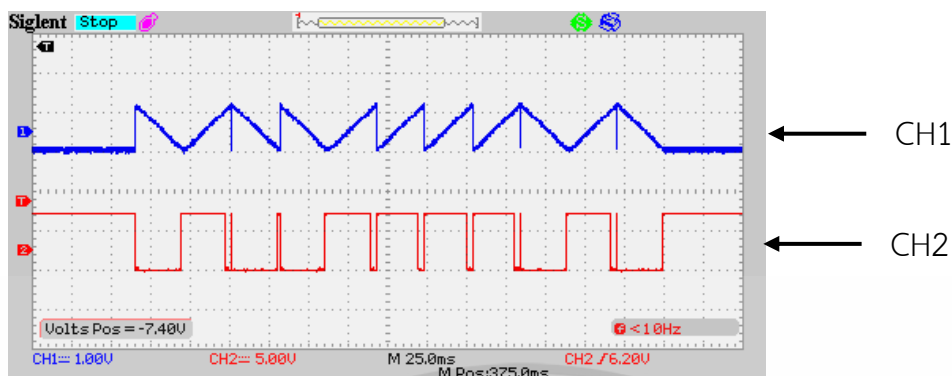
(CH1) เอาต์พุตวงจรบัฟเฟอร์

(CH2) เอาต์พุตวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า (CH1) ที่เป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรบัฟเฟอร์ มีระดับแรงดันไฟตรง +1.6 โวลต์ แล้วเมื่อไปทำการลบด้วยไฟตรง +1.6 โวลต์จากวงจรขยายสัญญาณผลต่าง จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีระดับแรงดันไฟตรงเป็น 0 โวลต์ (CH2)

4.9 ผลการทดสอบวงจรขมิตต์ทริกเกอร์

เมื่อทำการติดตั้งวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.40 แสดงสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างเอาต์พุตวงจรขยายสัญญาณผลต่าง (CH1) กับเอาต์พุตของวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ (CH2) ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบวงจรชนิดตรีกรเกอร์

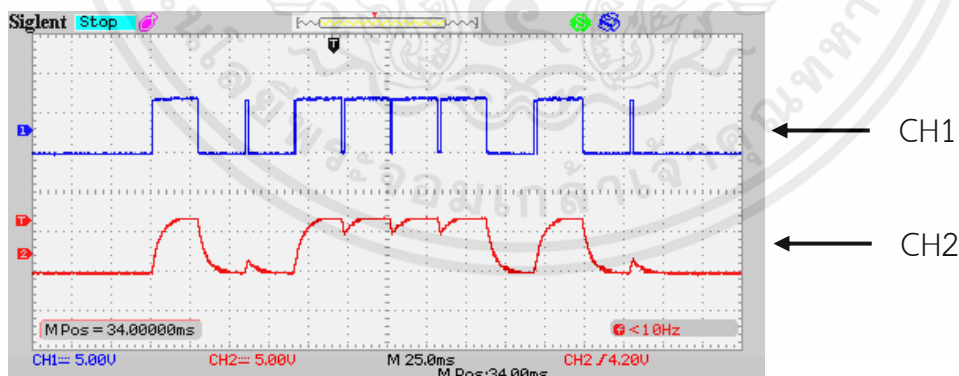
(CH1) สัญญาณเอาต์พุตวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

(CH2) เอาต์พุตของวงจรชนิดตรีกรเกอร์

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าเอาต์พุตของวงจรชนิดตรีกรเกอร์เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยสัญญาณเอาต์พุตจะอยู่ในสถานะ HIGH เมื่อมีสัญญาณอินพุตเป็น Up Chirp และอยู่ในสถานะ LOW เมื่อมีสัญญาณอินพุตเป็น Down Chirp

4.10 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

เมื่อทำการติดตั้งวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่สร้างเสร็จสิ้นแล้วเข้ากับเครื่องจ่ายไฟ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.41 แสดงสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างเอาต์พุตวงจรชนิดตรีกรเกอร์ (CH1) กับเอาต์พุตของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน (CH2) ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลลัพธ์การนำสัญญาณเอาต์พุตวงจรชนิดตรีกรเกอร์ไปผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

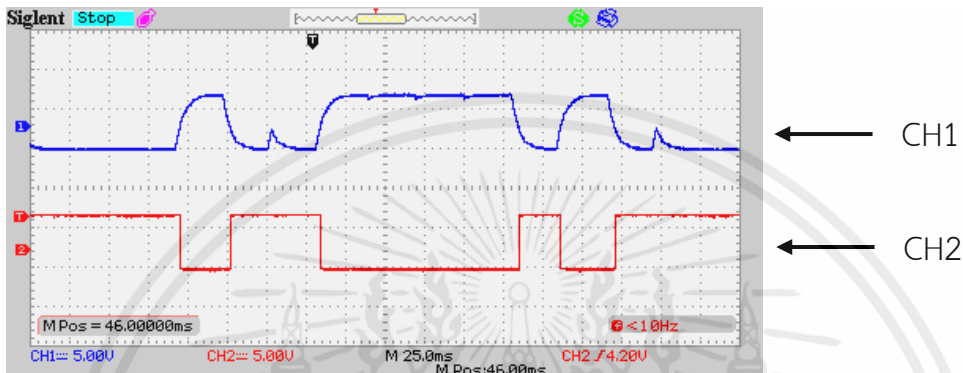
(CH1) สัญญาณเอาต์พุตวงจรชนิดตรีกรเกอร์

(CH2) เอาต์พุตของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำเอาต์พุตของวงจรชนิดตรีกรเกอร์ ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีการกำจัดสัญญาณรบกวน

สำหรับการนำสัญญาณเอาต์พุตวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปผ่านวงจรเปรียบเทียบแรงดัน แสดงผลลัพธ์ได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ผลการนำสัญญาณเอาต์พุตวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปผ่านวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

(CH1) สัญญาณเอาต์พุตวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

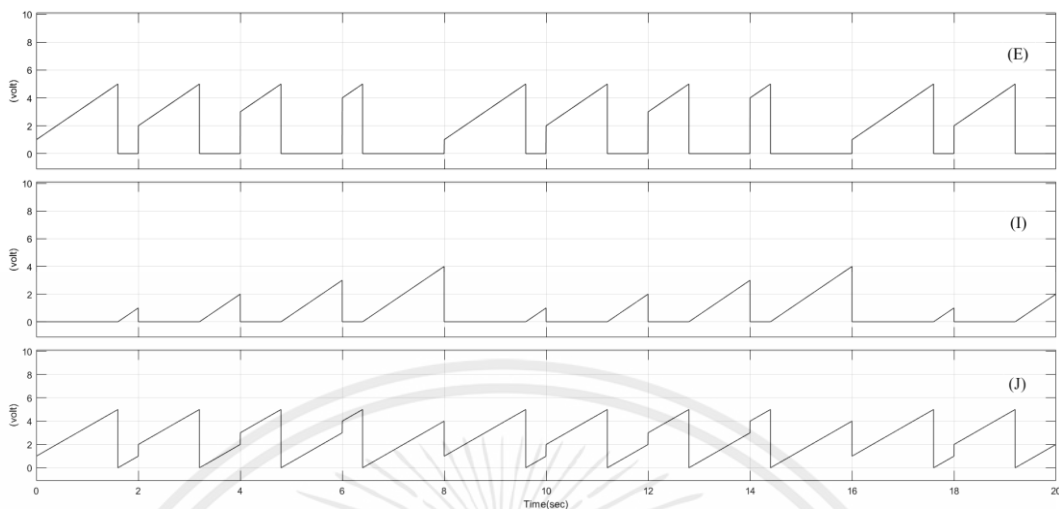
(CH2) เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (CH2) เป็นสัญญาณบิตข้อมูลดิจิทัลที่สมบูรณ์

4.11 ผลการทดสอบวงจรรวมระบบ

4.11.1 ผลการทดสอบการจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink

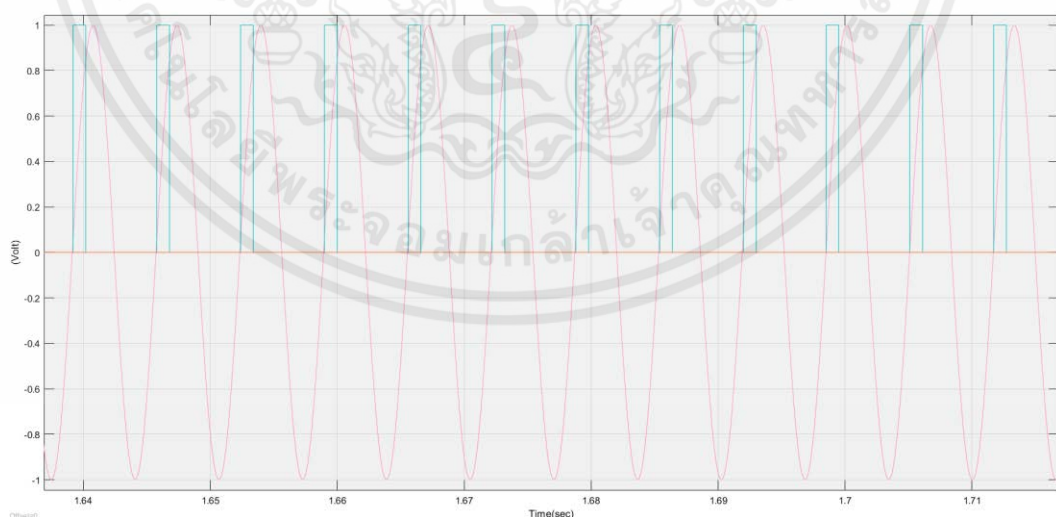
ในการทดสอบวงจรรวมระบบดังหัวข้อที่ 3.3.11 แสดงสัญญาณส่วนโวลต์ดิฟเฟอเรนเชียล (E) เปรียบเทียบกับสัญญาณส่วนเรเฟอเรนซ์เฟส (I) และสัญญาณไซน์คลิกชิปเซิร์บ (J) ได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการจำลองการสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ป
ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากรูปที่ 4.18 สัญญาณสี่ไซคลิกชิปเซิร์ป (J) เป็นการรวมกันของสัญญาณส่วนโค้งตั้งเฟส (E) กับสัญญาณส่วนเรฟเฟอเรนซ์เฟส (I) ซึ่งสัญญาณสี่ไซคลิกชิปเซิร์ป (J) จะมีเฟสของจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของแต่ละสัญญาณมีค่าที่เท่ากัน

ในส่วนของภาครับที่นำสัญญาณไปตีמודูเลตผ่านวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ แสดงผลการทดสอบการจำลองได้ดังรูปที่ 4.19

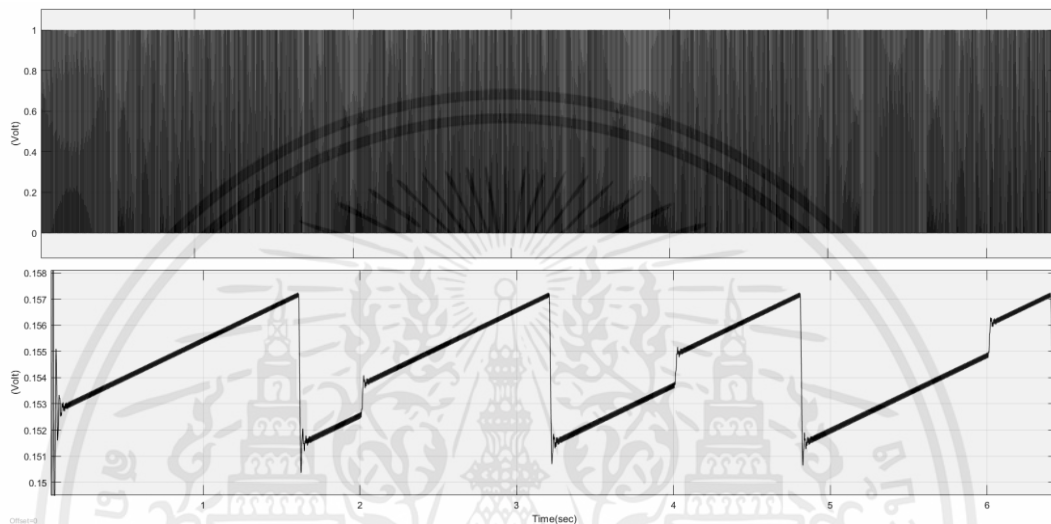


รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบการจำลองวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ในโปรแกรม
MATLAB/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เกิดการทรักที่ขอบขาขึ้น

สำหรับผลการทดลองการนำสัญญาณเอาต์พุตโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แสดงผลการทดสอบการจำลองได้ดังรูปที่ 4.20

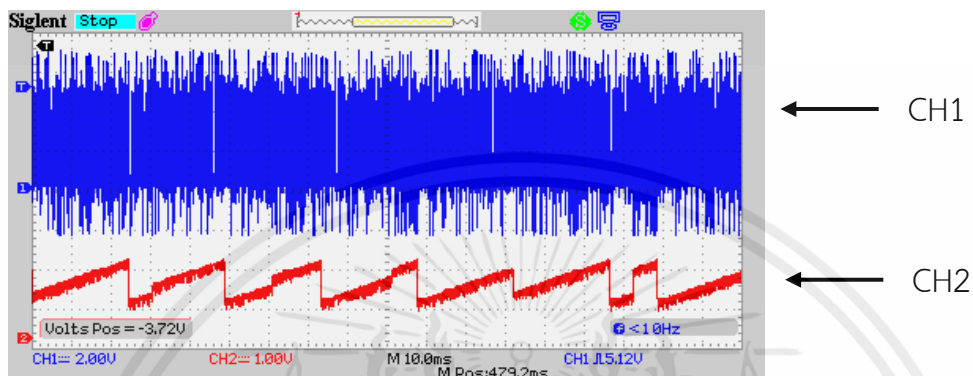


รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบการจำลองการนำสัญญาณโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะได้สัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปออกมา

4.11.2 ผลการทดสอบวงจรรวมระบบแบบใช้สาย

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.44 แสดงผลการทดสอบวงจรรวมระบบแบบใช้สายในผังภาครับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ผลลัพธ์การนำเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

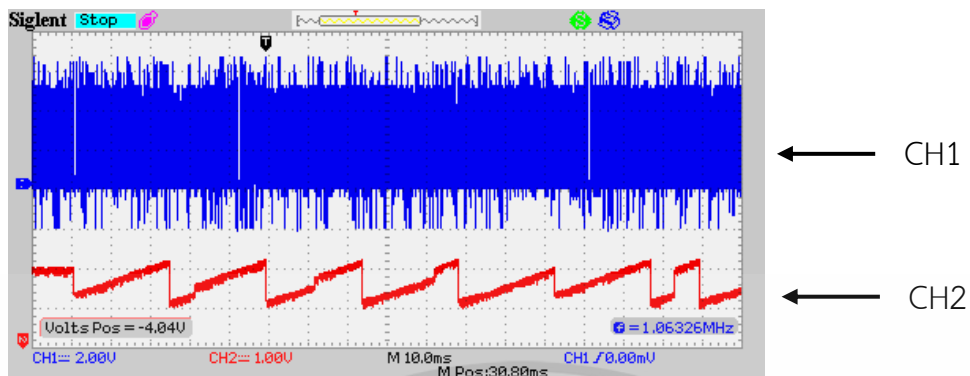
(CH1) สัญญาณเอาต์พุตวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์

(CH2) เอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะได้สัญญาณ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปออกมา

4.11.3 ทดสอบวงจรรวมระบบแบบไร้สาย

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.47 แสดงผลการทดสอบวงจรรวมระบบแบบไร้สายในผังภาครับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์การนำเอาต์พุตของวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์
ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

(CH1) สัญญาณเอาต์พุตวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

(CH2) เอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเอาต์พุตของวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะได้สัญลักษณ์ 4-ไซคลิกชิปเซิร์ปออกมา

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์เรื่องตัวรับ-ส่งสัญญาณ 4-ไซคลิกซีพีซีพี จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ภาคส่ง และภาครับ ในส่วนของภาคส่งจะทำการออกแบบสัญญาณ 4-ไซคลิกซีพีซีพี โดยเขียนชุดคำสั่งในการสร้าง 4-ไซคลิกซีพีซีพีผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จากนั้นนำสัญญาณ 4-ไซคลิกซีพีซีพีไปเชื่อมต่อกับวงจรบัฟเฟอร์และวงจรยกระดับแรงดันของสัญญาณ 4-ไซคลิกซีพีซีพี เพื่อนำเอาต์พุตที่ได้ไปสร้างสัญญาณซีพีด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน สำหรับส่วนของภาครับจะทำการดาวน์โหลดซอฟต์แวร์สัญญาณให้ได้ความถี่ 910 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นนำเอาต์พุตที่ได้ไปทำการตีมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ และทำการต่อวงจรเปรียบเทียบแรงดันเพื่อถอดรหัสสัญญาณ โดยได้ทำการศึกษาลักษณะต่าง ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ และสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

- 1) ในส่วนของภาคส่งสามารถออกแบบและสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิกซีพีซีพี
- 2) สามารถสร้างสัญญาณ 4-ไซคลิกซีพีซีพีด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดัน ที่สามารถใช้งานได้ถึงความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์
- 3) สามารถออกแบบการดาวน์โหลดซอฟต์แวร์สัญญาณเพื่อให้ได้ความถี่ไอเอฟ 910 กิโลเฮิร์ตซ์
- 4) สำหรับ 4-ไซคลิกซีพีซีพีสามารถออกแบบและสร้างวงจรตีมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์
- 5) สามารถถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณตั้งต้นกลับคืนมา
- 6) สามารถรับ-ส่งสัญญาณ 4-ไซคลิกซีพีซีพีแบบไร้สายได้

ในปริญญานิพนธ์นี้ นอกจากการสร้างและส่งสัญญาณ 4-ไซคลิกซีพีซีพี ยังมีการสร้างและส่งสัญญาณซีพีในรูปแบบที่เป็นบล็อกข้อมูลแบบอะซิงโครนัส และสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

- 1) ในส่วนของภาคส่งสามารถออกแบบและสร้างสัญญาณซีพี
- 2) สามารถสร้างสัญญาณซีพีด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันที่สามารถใช้งานได้ถึงความถี่ 433 เมกะเฮิร์ตซ์

3) สามารถออกแบบการดาวน์โหลดคอนเวอร์เตอร์สัญญาณเพื่อให้ได้ความถี่ไอเอฟ 910 กิโลเฮิรตซ์

4) สำหรับสัญญาณซีร์ปสามารถออกแบบและสร้างวงจรตีมอดูเลตเอฟเอ็มด้วยวงจรโมโนสเตเบิลมีลติไวเบรเตอร์ และสามารถถอดรหัสสัญญาณซึ่งจะได้สัญญาณบิตข้อมูลดิจิทัลที่สมบูรณ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในปฏิญยานิพนธ์นี้มีการใช้วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันที่นำไอซีประเภท SMD หรือ Surface Mount Device มาใช้ จึงอาจทำให้เกิดการเสียหายของอุปกรณ์ได้ง่าย เช่น การกระแทกหรือการโดนสะเก็ดผ่านพื้นผิวต่าง ๆ อีกทั้งวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควบคุมด้วยแรงดันที่เลือกใช้ในปฏิญยานิพนธ์นี้ มีการใช้ศักย์ดาไฟฟ้าปรับค่า ซึ่งทำให้เกิดปัญหาของการไหลที่กระแสไม่คงที่ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรควบคุมแรงดันเข้ามาช่วย

บรรณานุกรม

- [1] Aideepen, “AD831 High Frequency RF Mixer Frequency Converter 0.1-500MHz.”
<https://www.aideepen.com/products/ad831-high-frequency-rf-mixer-frequency-converter-0-1-500mhz-board-module-9-11v>.
- [2] ARTRONSHOP. “แนะนำ ESP32.”
<https://www.artronshop.co.th/article/51/esp32>.
- [3] Basic Electronics Tutorials. “Inverting Schmitt Trigger.”
<https://www.electronics-tutorial.net/analog-integrated-circuits/schmitt-trigger/inverting-schmitt-trigger/>.
- [4] Elec-Bannok. “ออปแอมป์.”
<https://bannok-elec.blogspot.com/2013/05/operational-amplifiersop-amp.html>.
- [5] Electronics Hub. “Operational Amplifier as Differentiator.”
<https://www.electronicshub.org/operational-amplifier-as-differentiator/>.
- [6] Electronics Tutorials. “Monostable Multivibrator.”
<https://www.electronics-tutorials.ws/waveforms/monostable.html>.
- [7] FMUSER. “7805.”
<https://th.fmuser.net/content/?20868.html>.
- [8] G-tech “Op-amp.”
<https://pws.npru.ac.th/thawatchait/data/files/Lecture%208%20Op-amp.pdf>.
- [9] Lerson Kirasamuthranon, Paramote Wardkein and Jeerasuda Koseeyaporn.
Coding and Coherent Decoding Techniques for Continuous Single Slope Cyclic Shift Chirp Signal, 2023, p. 273-276.
- [10] SZHUASHI. “Standard Voltage Controlled Oscillator (410MHz-530MHz).”
<https://dutch.alibaba.com/product-detail/szhuashi-100-new-vco-voltage-controlled-oscillator-with-buffer-amplifier-for-410mhz-530mhz-433mhz--1600802125795.html>.

[11] Texas Instruments. “LM13700.”

<https://www.mouser.com/datasheet/2/405/snosbw2e-317423.pdf>.

[12] WordPress. “วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit).”

<https://navapadol.files.wordpress.com/2015/09/e0b89ae0b897e0b897e0b8b5e0b988-6.pdf>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสั่งการสร้างสัญลักษณ์ 4-ไบต์คิชิปเซิร์ป

```

const int dacChannel = 25;
uint8_t bytePair[4];

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  if (Serial.available())
  {
    up();
    char utf8String[] = u8"CA"; // UTF-8 encoded string
    Serial.println("Original UTF-8 String: ");
    Serial.println(utf8String);
    Serial.println("Binary Representation: ");
    printUTF8Binary(utf8String);
    Serial.println();
    down();

    while (true)
    {
      for (int8_t j = 3; j >= 0; j--)
      {
        if (bytePair[j] == 0b00)
        {
          up00();
        }
        else if (bytePair[j] == 0b01)
        {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        up01());
    }
    else if (bytePair[j] == 0b10)
    {
        up10());
    }
    else if (bytePair[j] == 0b11)
    {
        up11());
    }
}
}
up(11);
delay(100);
up(00);
}
}
void printUTF8Binary(const char *utf8Str)
{
    uint8_t i = 0;
    while (utf8Str[i])
    {
        uint8_t binaryValue = utf8Str[i];
        // Extract the byte pairs from the 8-bit binary representation
        for (int8_t j = 0; j < 4; j++)
        {
            bytePair[j] = (binaryValue >> (j * 2)) & 0b11;
        }
        // แสดงการจับคู่บิต
        for (int8_t j = 3; j >= 0; j--)
        {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    if (bytePair[j] == 0b00)
    {
        Serial.print("A");
    }
    else if (bytePair[j] == 0b01)
    {
        Serial.print("B");
    }
    else if (bytePair[j] == 0b10)
    {
        Serial.print("C");
    }
    else if (bytePair[j] == 0b11)
    {
        Serial.print("D");
    }
}
i++;
}
Serial.println();
}
int up00()
{
    int i;
    for (int i = 51; i < 256; i++)
    {
        dacWrite(dacChannel, i);
        delayMicroseconds(100);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for (int i = 0; i < 51; i++)
{
    dacWrite(dacChannel, i);
    delayMicroseconds(100);
}
return i;
}
int up01()
{
    int i;
    for (int i = 102; i < 256; i++)
    {
        dacWrite(dacChannel, i);
        delayMicroseconds(100);
    }
    for (int i = 0; i < 102; i++)
    {
        dacWrite(dacChannel, i);
        delayMicroseconds(100);
    }
    return i;
}

int up10()
{
    int i;
    for (int i = 153; i < 256; i++)
    {
        dacWrite(dacChannel, i);
        delayMicroseconds(100);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for (int i = 0; i < 153; i++)
{
    dacWrite(dacChannel, i);
    delayMicroseconds(100);
}
return i;
}

```

```

int up11()
{
    int i;
    for (int i = 204; i < 256; i++)
    {
        dacWrite(dacChannel, i);
        delayMicroseconds(100);
    }
    for (int i = 0; i < 204; i++)
    {
        dacWrite(dacChannel, i);
        delayMicroseconds(100);
    }
    return i;
}

```

```

int up()
{
    int i;
    int j;
    for(int j=0;j<13;j++)
    {
        for (int i = 0; i < 256; i++)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{
    dacWrite(dacChannel, i);
    delayMicroseconds(100);
}
}
return i;
}
int down()
{
    int i;
    int j;
    for(int j=0;j<2;j++)
    {
        for (int i = 256; i > 0; i--)
        {
            dacWrite(dacChannel, i);
            delayMicroseconds(100);
        }
    }
    return i;
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสั่งการสร้างสัญลักษณ์ chirp

```
#include <Arduino.h>

const int dacChannel = 25;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if (Serial.available())
  {
    char utf8String[] = u8"AC"; // UTF-8 encoded string
    Serial.println("Original UTF-8 String: ");
    Serial.println(utf8String);
    Serial.println("Binary Representation: ");
    printUTF8Binary(utf8String);
    Serial.println();
    // Check each bit and print 'A' or 'B'
    for (uint8_t i = 0; utf8String[i]; i++)
    {
      uint8_t binaryValue = utf8String[i];

      for (int8_t j = 7; j >= 0; j--)
      {
        Serial.print((binaryValue >> j) & 1);
        //ทำการเช็คบิตข้อมูล ถ้าเป็นบิต 1 ให้แสดงผล A และถ้าเป็นบิตข้อมูลอื่นให้แสดงผล B
        if ((binaryValue >> j) & 1)
        {
          UpChirp();
        }
      }
    }
  }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else
{
    DOWNChirp();
}
}
}
}
void printUTF8Binary(const char* utf8Str)
{
    uint8_t i = 0;
    while (utf8Str[i])
    {
        uint8_t binaryValue = utf8Str[i];
        // Print the 8-bit binary representation
        for (int8_t j = 7; j >= 0; j--)
        {
            Serial.print((binaryValue >> j) & 1);
        }
        Serial.print(" ");
        i++;
    }
}
int UpChirp(){
    int j;
    for (int j = 0; j < 256; j++) {
        dacWrite(dacChannel, j);
        //Serial.println(j);
        delayMicroseconds(10);
    }return j;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้