

การประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่กับการทดลองทางฟิสิกส์แบบ
พื้นฐาน

AN APPLICATION OF FUNCTION GENERATOR TO A SIMPLE
PHYSICS EXPERIMENT

นางสาวพิมพ์พินัย พิงตานแสง
นางสาวเพชรรัตน์ แก้วคำปิก

โครงการพิเศษในปีที่หนึ่งของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิถียุคใหม่

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

การประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่กับการทดลองทางฟิสิกส์แบบ
พื้นฐาน

**AN APPLICATION OF FUNCTION GENERATOR TO A SIMPLE
PHYSICS EXPERIMENT**

นางสาวพิมพ์ทัย พึ่งตาแสง

นางสาวเพชรรัตน์ แก้วคำปึก

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

**AN APPLICATION OF FUNCTION GENERATOR TO A SIMPLE
PHYSICS EXPERIMENT**

MISS PIMHATHAI PUENGTASANG

MISS PETCHARAT KEAWKAMPIK

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

IN APPLIED PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2556

หัวข้อโครงการพิเศษ	การประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่กับการทดลองทางฟิสิกส์แบบพื้นฐาน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิมพ์หทัย พิงตาแสง นางสาวเพชรรัตน์ แก้วคำปิก
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ

บทคัดย่อ

เครื่องกำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้น ทำหน้าที่เป็นตัวให้กำเนิดสัญญาณรูปต่างๆ 3 รูป คือรูปไซน์ รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม เพื่อใช้ในปฏิบัติการทางด้านฟิสิกส์และอิเล็กทรอนิกส์ และทำงานได้ในช่วงความถี่ 10Hz - 1MHz ในการทดลองนำไปใช้งานกับชุดทดลองเรื่อง Quinck's Tube เพื่อหาค่าความเร็วเสียงในอากาศ พบว่าได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ มีผลการทดลองที่ให้ค่าความผิดพลาดสูงที่สุดไม่เกิน 22.89% และต่ำสุด 0.39%

คำสำคัญ: ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์

Title	An Application of Function Generator to a simple Physics Experiment
Students	Miss. Pimhathai Puengtasang Miss. Petcharat Keawkampik
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Assist Prof. Wicharn Techitdheera

ABSTRACT

We constructed function generators with 3 waveforms; i.e. sine square and triangular with frequency range from 10Hz-1MHz. When we used this function generators to Quinck's tube experiment to find speed of sound. The satisfied result were obtained with maximum error 22.89% and minimum error 0.39%

Keywords: Function Generator

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยครั้งนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระที่ได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งในการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ กำกับติดตามและให้คำแนะนำช่วยเหลือให้คำปรึกษาอย่างดียิ่ง และขอขอบพระคุณ ดร.พิชชานันท์ ธิเศรษฐ์โสภณ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย และขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการดำเนินการสอบที่ให้คำแนะนำที่ทำงานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น คณะผู้ทำงานวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา และประสบการณ์อันเป็นประโยชน์และทรงคุณค่าแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณพ่อแม่ที่คอยเป็นกำลังใจอย่างดี คอยสนับสนุนการทำวิจัยในทุกด้าน จนทำให้การทำวิจัยสำเร็จตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

ขอขอบพระคุณเพื่อน ๆ พี่ น้องสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่ให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีของการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาบุญการีผู้ให้กำเนิดและอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้แก่ผู้วิจัย

พิมพ์หทัย พึ่งตาแสง
เพชรรัตน์ แก้วคำปิก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญ(ต่อ)	V
สารบัญภาพ	VI
สารบัญภาพ(ต่อ)	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พื้นฐานเครื่องกำเนิดสัญญาณ	3
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องกำเนิดสัญญาณ	3
2.1.2 การนำไปใช้งานของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่	4
2.1.3 รูปสัญญาณ	4
2.1.4 การปรับย่านความถี่	5
2.1.5 การปรับแต่งความแรงของสัญญาณ	5
2.2 ทฤษฎีวงจรกำเนิดสัญญาณ	5
2.2.1 วงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม	5
2.2.2 วงจรกำเนิดคลื่นฟันเลื่อย	8
2.2.3 วงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยม	11
2.2.4 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์	16
2.3 การแทรกสอดของเสียง	20

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย	
	3.1 การศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่	22
	3.2 การออกแบบการดำเนินงาน โดยสรุปเป็นแผนผังการดำเนินงาน	23
	3.3 เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่	24
	3.4 Quinck's Tube	31
	3.5 วิธีการทดลอง	32
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	
	4.1 ผลการทดลอง	34
	4.1.1 ผลการทดลอง Fixed Sine Generator	34
	4.1.2 ผลการทดลอง Function Generator	37
	4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางทฤษฎี	40
	4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	59
	4.3.1 การวิเคราะห์ผลค่าความคลาดเคลื่อน	59
	4.3.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	61
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
	5.1 สรุปผลการทดลอง	66
	5.2 ข้อเสนอแนะ	68
	เอกสารอ้างอิง	69

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงบล็อก โคอะแกรมและฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์	3
2.2 แสดงลักษณะรูปคลื่นแบบต่างๆ	4
2.3 วงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม	6
2.4 กราฟแสดงแรงดันของวงจรถ่ายสัญญาณสี่เหลี่ยม	7
2.5 แสดงวงจรถ่ายสัญญาณสี่เหลี่ยม	8
2.6 วงจรแสดงที่นำทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อเดียวมาใช้เป็นสวิตช์	10
2.7 แสดงวงจรถ่ายสัญญาณสามเหลี่ยม	11
2.8 แสดงวงจรถ่ายสัญญาณสามเหลี่ยม	13
2.9 แสดงวงจรถ่ายสัญญาณและวงจรถ่ายสัญญาณเรมพ์	15
2.10 แสดงการนำออปแอมป์มาใช้ในวงจร	17
2.11 แสดงลักษณะวงจรถ่ายสัญญาณ	18
2.12 การแทรกสอดของคลื่นเสียงทำให้เกิดแนวปฏิบัพและแนวบัพ	20
3.1 เป็นแผนภาพแสดงถึงลักษณะการดำเนินงาน โดยจัดทำเป็นแผนผังการดำเนินงาน	23
3.2 แสดงการเขียน Schematic ในวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่	25
3.3 แสดงการเขียนวงจรใน โปรแกรม Orcad	26
3.4 แสดงลายวงจรที่เขียนขึ้นจากโปรแกรม Orcad	26
3.5 แสดงตัวต้านทานที่สามารถฟิกซ์ค่าความถี่ได้	28
3.6 แสดงวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณที่สามารถฟิกซ์ค่าความถี่ได้	28
3.7 แสดงวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่แบบไม่ฟิกซ์ความถี่	29
3.8 แสดงรูปกล่องแบบ Fixed Sine Generator	30
3.9 แสดงรูปกล่องแบบ Function Generator	30
3.10 แสดงลักษณะท่อ Quinck's Tube	31
3.11 แสดงการทดลองโดยการใช้ Digital multimeter	32
4.1 แสดงการทดลองแบบ Fixed Sine Generator	34

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แสดงการทดลองแบบ Function Generator	37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

สัญญาณไฟฟ้ากับชิ้นงานด้านอิเล็กทรอนิกส์เป็นสิ่งควบคู่กันจนไม่สามารถแยกจากกันได้ เพราะในการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นการทำงานที่ต้องเกี่ยวข้องกับไฟฟ้าและสัญญาณ เริ่มต้นจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่วงจร ซึ่งแรงดันไฟฟ้าก็ประกอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ารูปไซน์ เมื่อมองไปถึงวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ บางวงจรทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าสลับขึ้นมา เช่น วงจรกำเนิดความถี่ (Oscillator) วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ที่เรียกว่า วงจรมัลติไวเบรเตอร์ (Multi vibrator) เป็นต้น บางวงจรก็เกี่ยวข้องกับการทำงานร่วมกับสัญญาณ เช่น วงจรขยายเสียง (Amplifier) วงจรภาครับวิทยุ (RF Tuner) ตลอดจนการทำงานของวงจรบางส่วนถูกควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณไฟฟ้า เป็นต้น

เครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นเครื่องมือวัดและเครื่องมือทดสอบชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่เป็นตัวให้กำเนิดสัญญาณชนิดต่าง ๆ ขึ้นมา เพื่อใช้ในการทดสอบปรับแต่งและตรวจสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ถูกผลิตขึ้นมาใช้งานจะเรียกชื่อต่างกันตามค่าความถี่และชนิดของสัญญาณที่กำเนิดขึ้น เช่น ฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์ (Function Generator) ยี่ห้อที่หุมนุชย์ได้ยิน จะเรียกว่า เครื่องกำเนิดสัญญาณย่านคลื่นเสียง หรือเรียกว่า เอเอฟเจเนอเรชัน (Audio Function Generation)

การทดลองเรื่อง Quinck's tube ซึ่งเป็นท่อทรงกลมใช้ในการหาความแตกต่างของเสียง โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่หรือฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์ (Function Generator) ในการให้ความถี่ของคลื่นเสียงส่งเข้าไปในท่อ เพื่อหาค่าความถี่เสียงที่มากที่สุด โดยเมื่อฟังจากเสียงในท่อจะให้ความถี่ที่ดังที่สุดออกมาที่ค่าความถี่หนึ่ง เราจะสามารถอธิบายได้ว่า “เสียงเป็นคลื่น” ด้วยการอธิบายสมบัติการแทรกสอด (Interference)

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เราพบว่า การที่เสียงเดินทางในตัวกลางและมีการแทรกสอดแบบเสริมกัน ทำให้เกิดเสียงดังสุดที่ความถี่ค่าหนึ่ง จะทำให้สรุปได้ว่า เสียงสามารถประพฤติตัวเป็นคลื่น

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่หรือฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator)

1.2.2 เพื่อพัฒนาการทดลองขึ้นเองเพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐาน

1.2.3 เพื่อศึกษาการนำเครื่องกำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้นเองไปใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเสียง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่หรือฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ช่วงความถี่สัญญาณเสียง (AF Generator)

1.3.2 ศึกษาสมบัติการแทรกสอด (Interference) ของคลื่นเสียงที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่หรือฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ในอุปกรณ์ที่เรียกว่า Quinck's Tube เพื่อนำไปสู่การหาค่าความเร็วเสียงในอากาศ

1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่และ Quinck's tube

1.4.2 ออกแบบเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่

1.4.3 ทดลองสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ในแผงวงจร ก่อนสร้างจริง

1.4.4 นำเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ที่ได้ไปทดสอบในการทดลอง Quinck's tube

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณราคาถูก เพื่อนำไปใช้ในการทดลองระดับพื้นฐาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นฐานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ(Function Generator)

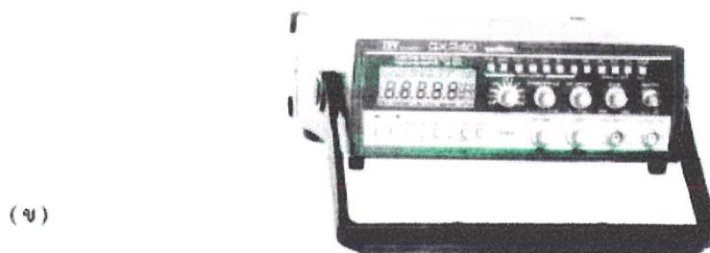
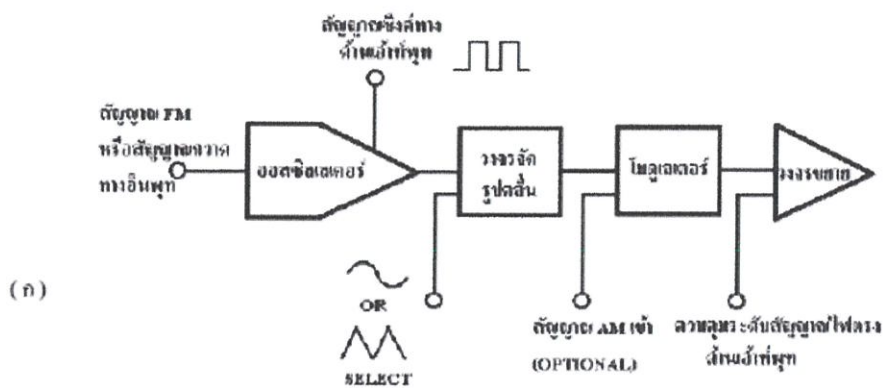
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์หรือเครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำงานได้หลายหน้าที่ โครงสร้างฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์จะมีวงจรออสซิลเลเตอร์ที่สามารถสร้างรูปคลื่นที่แน่นอน แต่ละเครื่องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังรูป (ก) คือ

- (1) วงจรออสซิลเลเตอร์ซึ่งทำหน้าที่สร้างคาบเวลา (Time period) ให้กับคลื่นหรือเรียกว่า มัลติไวเบรเตอร์หรือตัวกำเนิดความถี่อิสระแบบต่อเนื่องเป็นตัวกำเนิดรูปคลื่นแบบต่าง ๆ นั้นเอง
- (2) ตัวสร้างหรือจัดรูปแบบของคลื่น (Wave shaper)
- (3) ส่วน โมดูเลเตอร์ ใช้สำหรับสร้างสัญญาณ AM หรือ FM เอาท์พุทบัฟเฟอร์ของภาคขยาย

(Out put buffer amplifier)

(4) วงจรขยายสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณเพื่อให้ขนาดสัญญาณมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.1 แสดง ไดอะแกรมการทำงานและรูปลักษณะของฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์

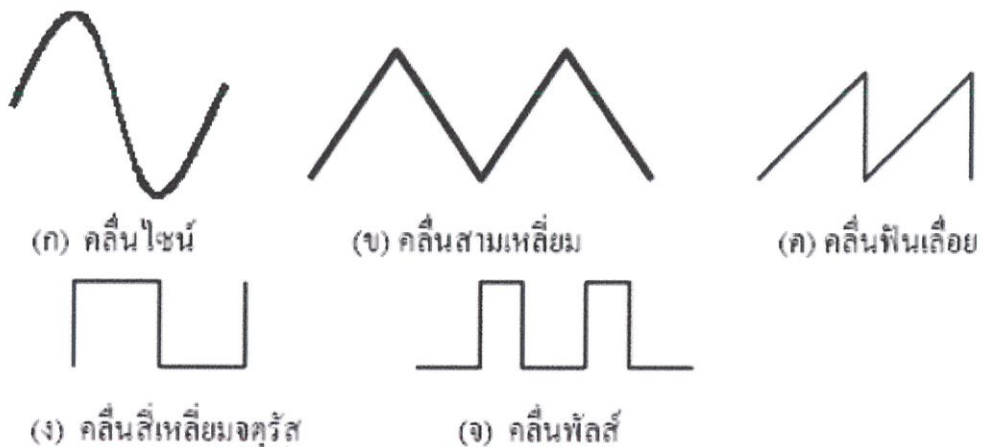
2.1.2 การนำไปใช้งานของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่

เครื่องกำเนิดความถี่สามารถสร้างรูปคลื่นเอาท์พุทได้หลายรูปคลื่นสัญญาณที่กำเนิดขึ้นมาและสามารถควบคุมได้ทั้งการปรับแต่งรูปคลื่น ปรับแต่งแอมพลิจูดและปรับแต่งความถี่ได้เพื่อใช้เป็นสัญญาณส่งออกไปยังอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆ เพื่อการตรวจสอบ ตรวจสอบ หรือวัดเปรียบเทียบค่าโดยถือว่าสัญญาณที่กำเนิดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นสัญญาณมาตรฐานหรือสัญญาณอ้างอิง ในการนำไปใช้งานเครื่องกำเนิดสัญญาณไม่ว่าจะเป็นชนิดใดก็ตาม จึงมีสมบัติในการทำงานและการใช้งานที่เหมือน ๆ กัน ดังนี้

1. ความถี่ที่ถูกผลิตขึ้นมาต้องมีความคงที่และสามารถอ่านค่าออกมาได้อย่างถูกต้อง
2. สัญญาณที่กำเนิดขึ้นมาต้องไม่ผิดเพี้ยน และไม่มีสัญญาณรบกวน
3. สามารถควบคุมความแรงของสัญญาณที่ผลิตขึ้นมาได้ตั้งแต่ความแรงสัญญาณต่ำจนถึงค่าสูง

2.1.3 รูปสัญญาณ

รูปสัญญาณที่เป็นมาตรฐานจะมีอยู่ 5 ชนิดคือ รูปคลื่นไซน์(Sine Wave) รูปคลื่นสามเหลี่ยม(Triangular Wave) รูปฟันเลื่อย(Sawtooth Wave)และรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) รูปคลื่นพัลส์(Pulse Wave) แสดงดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะรูปคลื่นแบบต่างๆ

2.1.4 การปรับย่านความถี่

การปรับความถี่มีย่านความถี่ใช้งานเริ่มตั้งแต่เศษส่วนของเฮิรตซ์ (Hz) ไปจนถึงหลายร้อยเฮิรตซ์ (KHz) พังก์ชันเจนเนอเรเตอร์จากรูป 2.1 (ข) มีความถี่เอาต์พุต ในย่าน 10 เท่า จากค่าต่ำสุด 0.2 Hz ถึง ค่าสูงสุด 2 MHz

2.1.5 การปรับแต่งความแรงของสัญญาณ

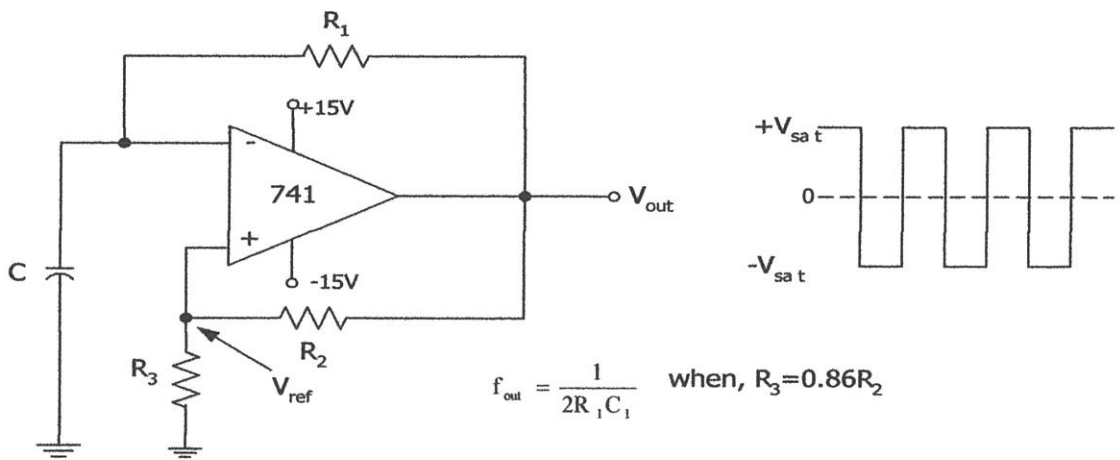
การปรับแต่งความแรงของสัญญาณ จากรูป 2.1 (ข) ขนาดของสัญญาณด้านเอาต์พุต โดยทั่วไปมีค่าพีคทูพีค (Peak to peak) เป็น 0–20 V และเปลี่ยนเป็น 0–2 V โดยใช้ปุ่มการลดทอน (Attenuation) 20 dB การเลือกความถี่มีความถูกต้องประมาณ $\pm 20\%$ ของค่าเต็มสเกลที่ย่านใด ๆ

2.2 ทฤษฎีของวงจรกำเนิดสัญญาณ

2.2.1 วงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม

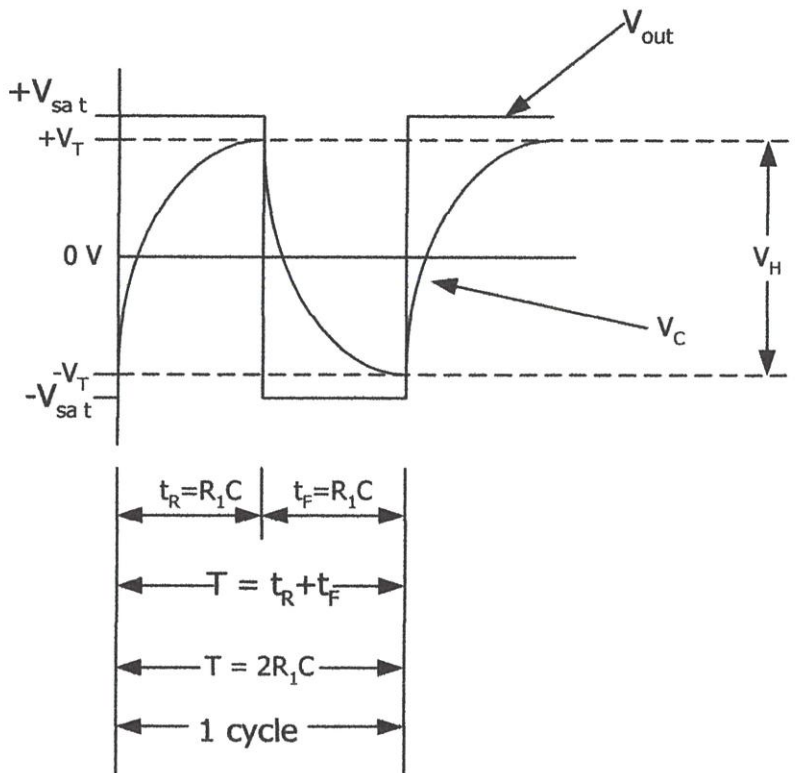
วงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยมเป็นวงจรชนิดหนึ่งซึ่งอยู่ในตระกูลของวงจรมัลติไวกเบเรเตอร์ ชนิดอะสแตเบิ้ล (astable) นั่นคือสัญญาณที่นำออกจากวงจรมีจะไม่คงที่แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะตลอดเวลา (ระดับสูงหรือต่ำ) โดยปราศจากสัญญาณอินพุตใดๆ วงจรในรูปที่ 2.3 เป็นวงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยมแบบพื้นฐานจะเห็นได้ว่าการนำสัญญาณจากเอาต์พุตมาป้อนกลับสองทาง สัญญาณเอาต์พุตที่ถูกนำออกมาผ่านตัวต้านทาน R_1 เข้าสู่ขั้วอินพุตลบและต่อกับตัวเก็บประจุ C จะเป็นภาคที่กำหนดความถี่ของคลื่นสี่เหลี่ยม ส่วนตัวต้านทาน R_2 และ R_3 เป็นภาคที่ใช้กำหนดแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ให้กับขั้วอินพุตบวกจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ถ้าเลือกใช้ R_3 ที่มีค่าเป็น 86% ของ R_2 ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะหาได้จากสมการ

$$f_{OUT} = \frac{1}{2R_1 C} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.3 วงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม

โดยเราสามารถวิเคราะห์การทำงานของวงจรคร่าวๆ ได้ดังนี้เมื่อป้อนไฟเลี้ยงให้แก่อปแอมป์จะมีแรงดันค่าน้อยๆตกคร่อมขั้วอินพุตทั้งสองของอปแอมป์ (แรงดันออฟเซต) แรงดันนี้จะมีผลทำให้แรงดันที่เอาต์พุตมีขนาดเท่ากับ $+V_{sat}$ (แรงดันอิมิต์วที่เอาต์พุต V_{sat} มีค่าประมาณ 90% ของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมาต่อในลักษณะเช่นนี้จะทำให้มีการชาร์จตัวเก็บประจุตลอดเวลาและแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ (V_C) จะค่อยๆเพิ่มค่าขึ้นสู่แรงดัน $+V_{sat}$ เป็นผลให้แรงดันที่ขั้วอินพุตลบมีค่าสูงขึ้นไปเรื่อยๆในขณะเดียวกันที่ขั้วอินพุตบวกนั้นจะมีศักดาเท่ากับการแบ่งแรงดัน $+V_{sat}$ ระหว่าง R_2 และ R_3 ซึ่งแรงดันอ้างอิง V_{ref} จะมีค่าเท่ากับ $+V_T$ (ในขณะที่ยัง $V_{out} = +V_{sat}$ จะเท่ากับ $+V_T$ เมื่อ $V_{out} = -V_{sat}$ $V_{ref} = -V_T$) จากการศึกษาเรื่องของคอมพาราเตอร์จะทำให้ทราบว่าแรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนสถานะทันทีเมื่อตัวเก็บประจุถูกชาร์จให้มีแรงดันสูงกว่า $+V_T$ ที่ขั้วอินพุตบวก เป็นผลให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนสถานะจาก $+V_{sat}$ เป็น $-V_{sat}$ ในทันทีที่การเปลี่ยนแปลงที่เอาต์พุตจะเป็นผลให้ V_{ref} เปลี่ยนจาก $+V_T$ เป็น $-V_T$ และยังเปลี่ยนทิศทางการชาร์จประจุของ C อีกด้วยนั่นคือ C จะค่อยๆลดค่าจาก $+V_T$ สู่ $-V_{sat}$ แต่ก่อนที่จะมีค่าเท่ากับ $-V_{sat}$ นั้นศักดาที่ขั้วอินพุตลบ (ศักดารวม C) จะมีค่าต่ำกว่า $-V_T$ แล้วและเป็นผลให้ขั้วอินพุตบวกมีศักดาเป็นบวกสูงกว่าขั้วอินพุตลบนั่นคือแรงดันเอาต์พุตก็จะเปลี่ยนสถานะจาก $-V_{sat}$ เป็น $+V_{sat}$ อีกและขั้นตอนการชาร์จตัวเก็บประจุก็จะเริ่มต้นใหม่เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงแรงดันของวงจรกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม

เราสามารถคำนวณแรงดัน $\pm V_T$ ได้จากสมการ

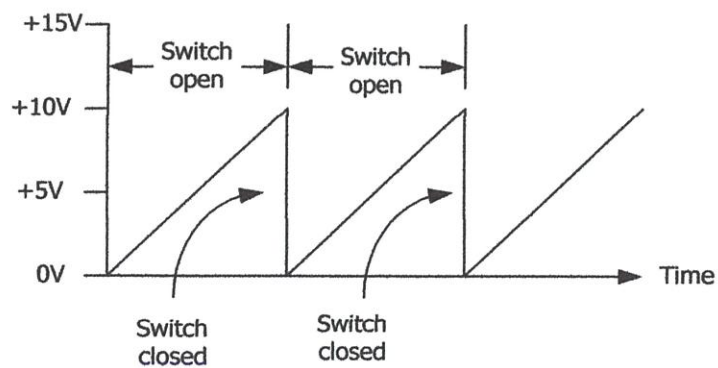
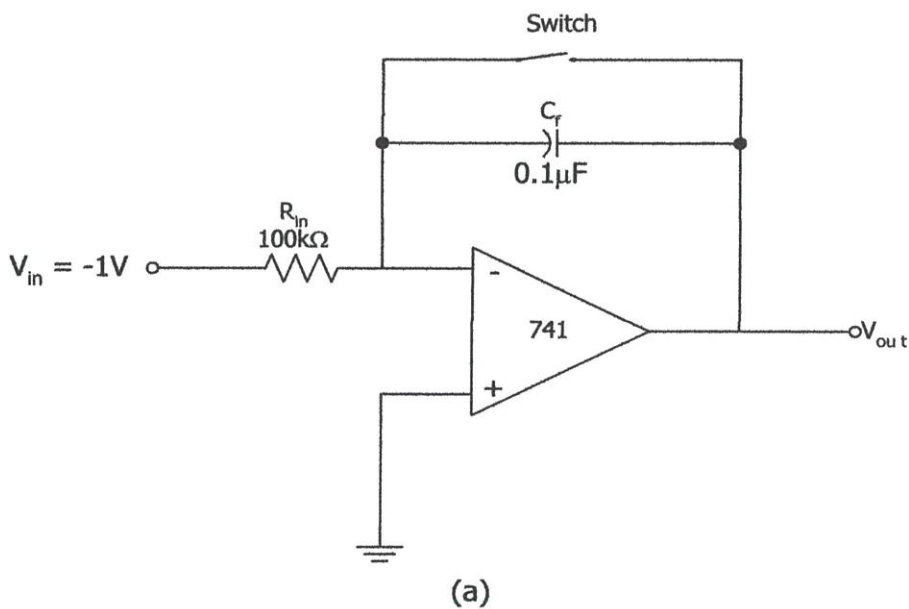
$$+V_T = \frac{R_3}{R_3 + R_2} (+V_{Sat}) = 0.46(+V_{sat}) \quad (2.2)$$

และ

$$-V_T = \frac{R_3}{R_3 + R_2} (-V_{Sat}) = 0.46(-V_{sat}) \quad (2.3)$$

2.2.2 วงจรกำเนิดคลื่นฟันเลื่อย

วงจรกำเนิดสัญญาณฟันเลื่อยหรือที่เรียกว่าวงจรกำเนิดแรงดัน “เรมพ์” (Ramp-voltage generator) ในรูป 2.5a ก็คือวงจรอินทิเกรเตอร์นั่นเองจะเห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันขนาด -1 โวลต์ให้ที่ขั้วอินพุทลบตัวเก็บประจุ C_f ก็จะถูกชาร์จแบบเส้นตรง (อัตราการเพิ่มของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าคงที่) ในทิศทางบวกเพิ่มขึ้นสู่ $+V_{sat}$ แต่ถ้าเราสับสวิตช์ลงก่อนที่แรงดันคร่อม C_f จะมีค่าเท่ากับ $+V_{sat}$ แรงดันที่ถูกชาร์จไว้ก็จะคายประจุออกจนหมดอย่างรวดเร็วและเมื่อยกสวิตช์ขึ้นตัวเก็บประจุก็จะค่อยๆ ถูกชาร์จขึ้นอีกดังรูปที่ 2.5b



รูปที่ 2.5 แสดงวงจรกำเนิดคลื่นฟันเลื่อย

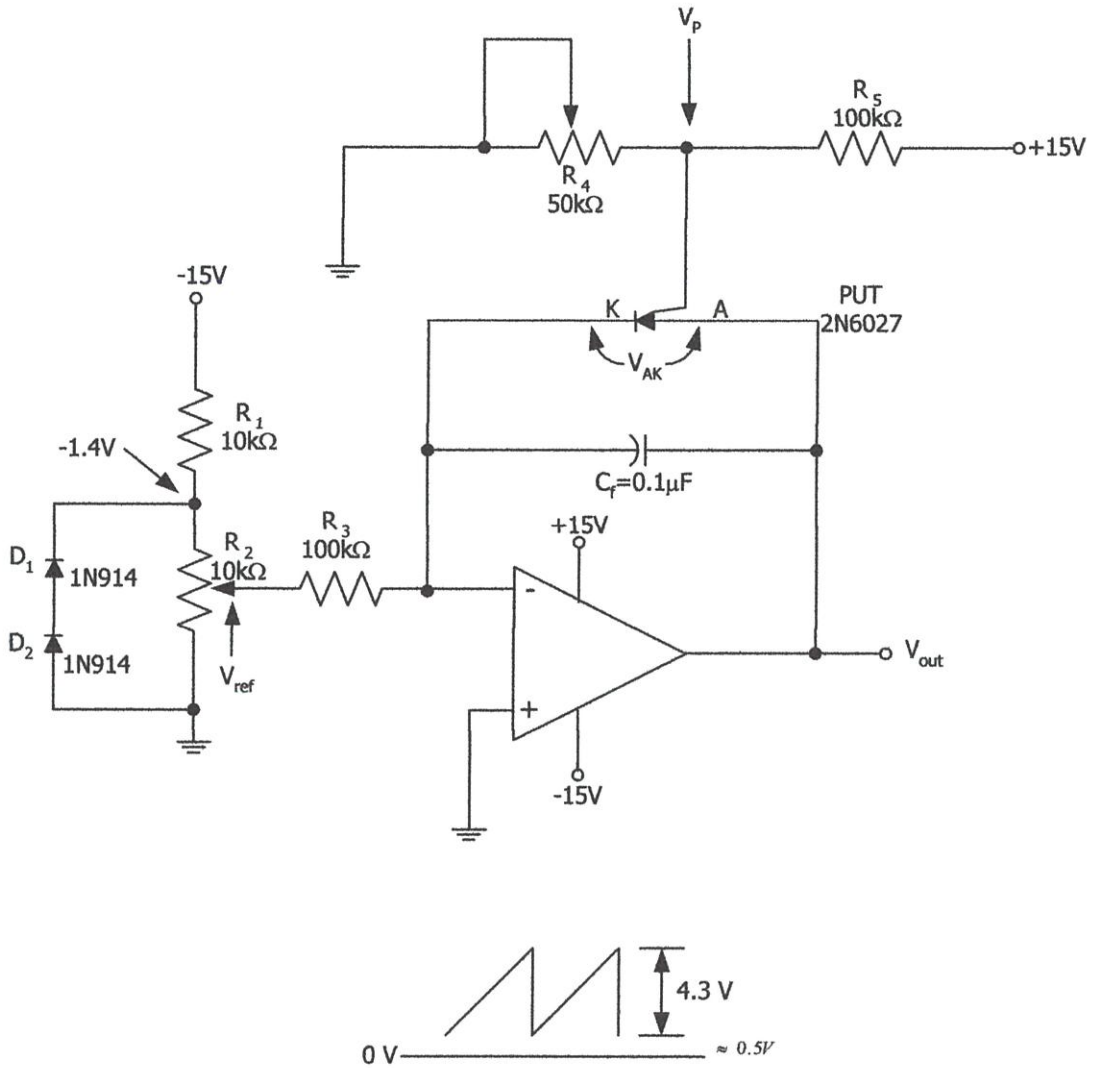
เราสามารถคำนวณแรงดันที่เอาต์พุตได้จากสมการ

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{1}{R_{in} \cdot C_f} \right) t \quad (2.4)$$

โดย t คือเวลาที่สวิทช์ถูกยกขึ้นในหน่วยวินาทีและมี V_{in} , R_{in} , C_f เป็นตัวกำหนดความชันของสัญญาณแรมพ์

แต่ในการใช้งานจริงนั้นเรามากไม่นิยมใช้การสับสวิทช์ดังกล่าวเพราะนอกจากจะมีความผิดพลาดสูงแล้วความถี่สูงสุดที่ทำได้ก็มีค่าค่อนข้างต่ำดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์สวิทช์มาใช้รูปที่ 2.6 แสดงวงจรที่นำทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อเดียว

(programmable unijunction transistor : PUT) มาใช้เป็นสวิทช์หลักการทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้คล้ายกับ SCR มากต่างกันตรงที่ PUT จะถูกทริกด้วยสัญญาณพัลส์ซึ่งกลับที่ขาเกตจากวงจรนี้ จะสามารถวิเคราะห์หลักการทำงานได้ดังนี้เมื่อกำหนดแรงดันอ้างอิง V_p ให้ขาเกตของ PUT (โดยการปรับตัวต้านทาน R_4 และ R_5) ทันทีที่แรงดันคร่อมขั้วอาโนด A กับคาโทด K หรือ V_{AK} มีศักดาเป็นบวกสูงกว่า V_p PUT จะทำงาน (เสมือนลัดวงจร) และกระแสที่ไหลผ่าน PUT จะยังคงไหลต่อไปถึงแม้ V_{AK} อาจลดลงต่ำกว่า V_p แล้วก็ตามจนกระทั่งกระแสดังกล่าวลดลงต่ำกว่าค่าๆ หนึ่ง (ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของตัว PUT) เมื่อนั้น PUT จะเสมือนวงจรเปิดหรือสวิทช์ที่ถูกยกขึ้นนั่นเอง



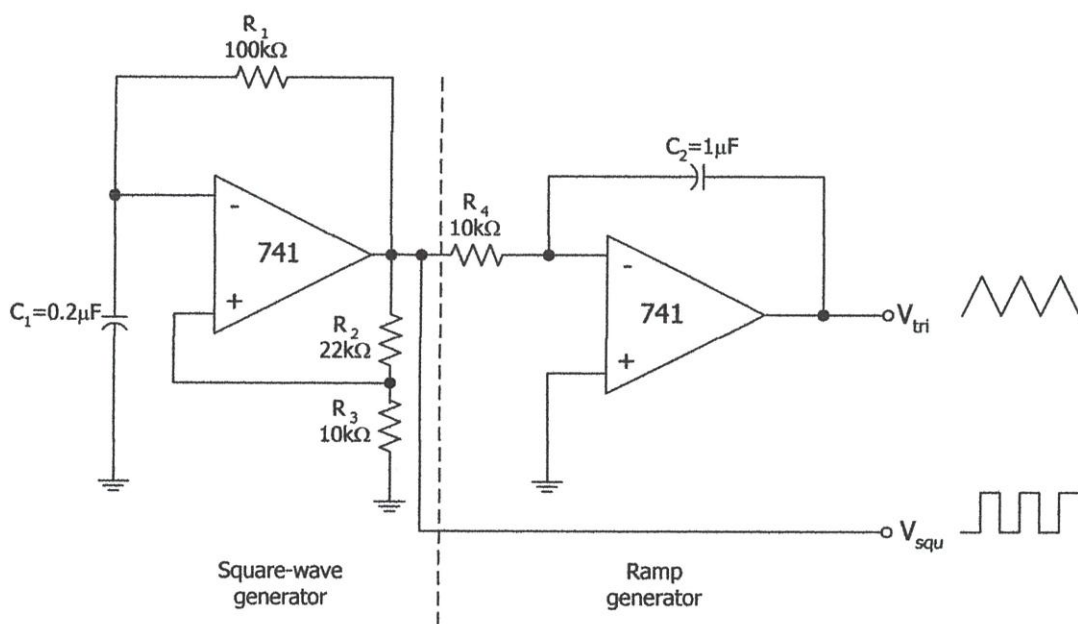
รูปที่ 2.6 วงจรแสดงที่นำทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อเดียวมาใช้เป็นสวิตช์

ค่าของอุปกรณ์ในรูปที่ 2.6 แสดงในลักษณะที่เราจะสามารถปรับความถี่ของสัญญาณเอ๊าท์พุทได้โดยที่ R_1 และ R_2 ทำหน้าที่แบ่งแรงดัน -15 โวลต์เพื่อสร้างแรงดัน V_{ref} ไดโอด D_1, D_2 ช่วยบังคับให้แรงดันคร่อม R_2 มีค่าคงที่ในขณะที่ปรับตัวต้านทานตัวนี้เพื่อเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณเอ๊าท์พุทส่วนแอมพลิจูดหรือขนาดของสัญญาณออกจะถูกกำหนดด้วยตัวต้านทาน R_4 ซึ่งก็มีผลต่อความถี่เช่นกันและจากวงจรนี้จะสามารถคำนวณความถี่ของสัญญาณเอ๊าท์พุทได้จากสมการ

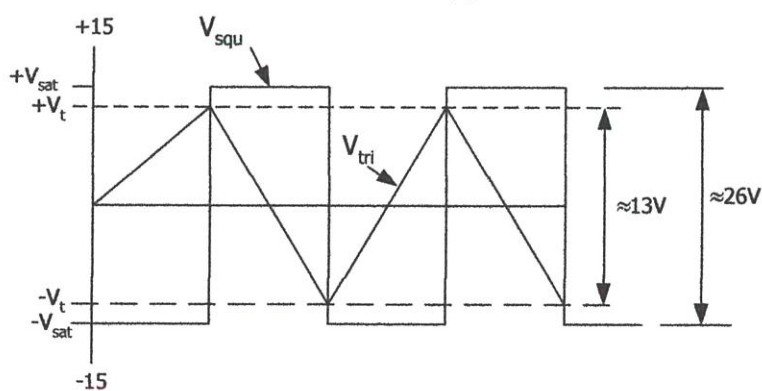
$$f_{out} = \frac{V_{ref}}{R_3 C_f} \left(\frac{1}{V_P - 0.5V} \right) \quad (2.5)$$

2.2.3 วงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยม

จากการศึกษาเรื่องของวงจรสร้างสัญญาณพื้นเลื้อยพบว่าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าตรงค่าหนึ่งให้แก่วงจรอินทิเกรเตอร์แล้วแรงดันเอาต์พุตจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างคงที่จากหลักการนี้สามารถนำไปสร้างคลื่นสามเหลี่ยมขึ้นมาโดยในช่วงแรกที่คลื่นสี่เหลี่ยมมีค่าเป็นบวกแรงดันเอาต์พุตของอินทิเกรเตอร์จะลดลงอย่างคงที่เมื่อคลื่นสี่เหลี่ยมเปลี่ยนสถานะเป็นลบแรงดันเอาต์พุตจากอินทิเกรเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ด้วยความชันขนาดเท่ากับที่ลดลงจึงทำให้ได้สัญญาณรวมเป็นคลื่นสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2.7



(a)

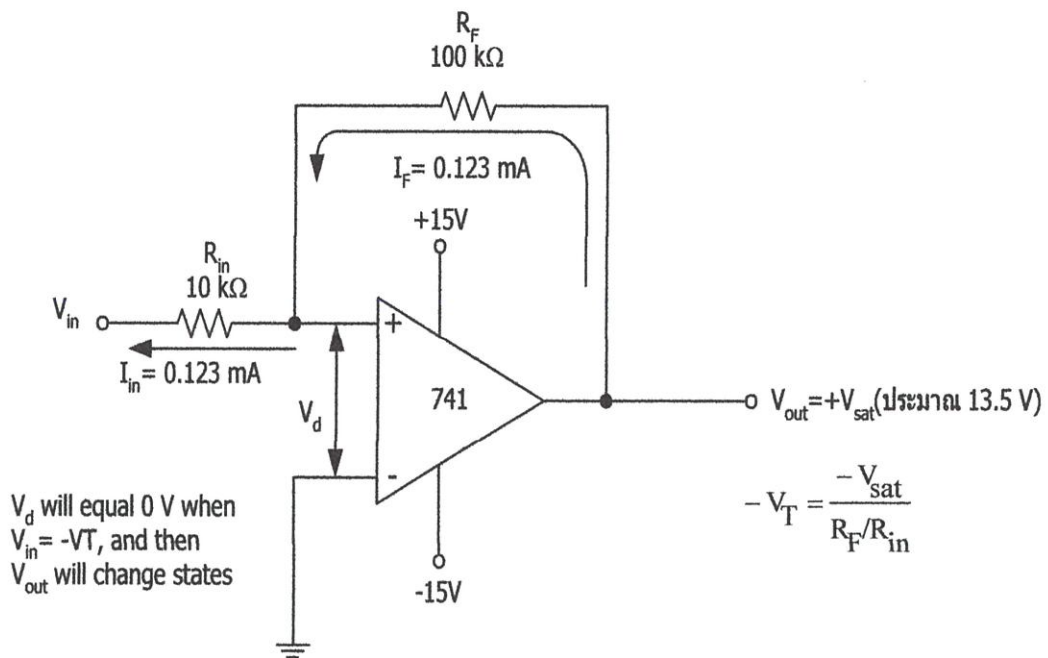


(b)

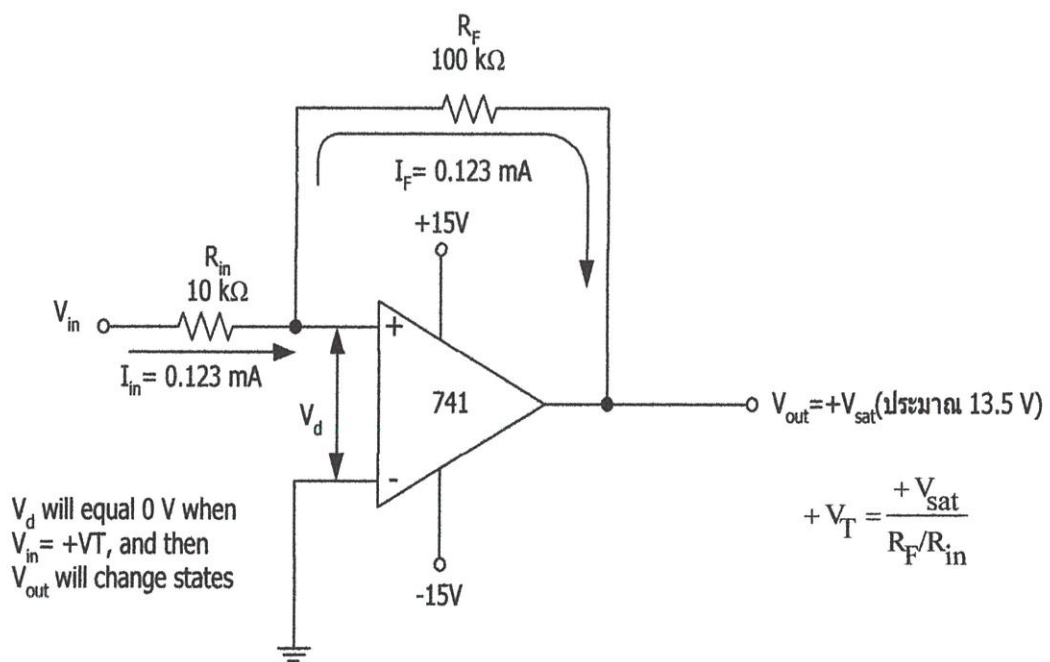
รูปที่ 2.7 แสดงวงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยม

ความถี่ของคลื่นสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจรนี้จะมีขนาดเท่ากับความถี่ของคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งหาได้จากสมการในหัวข้อที่เคยกล่าวมาแล้ว $\left(f = \frac{1}{2R_1 C_1} \right)$ และนอกจากนี้จากการทดลองจะพบว่าเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดคลื่นสามเหลี่ยมเกินไปจากลักษณะที่ควรเป็นจริงค่าคงตัวของเวลา (มีค่าเท่ากับ $R_1 C_1$) ควรมีขนาดเป็นสองเท่าของ $R_1 C_1$

นอกจากการสร้างคลื่นสามเหลี่ยมด้วยวิธีข้างต้นแล้วยังสามารถสร้างคลื่นสามเหลี่ยมได้จากการรวมวงจรอินทิเกรเตอร์กับวงจรคอมพาราเตอร์ในการทำความเข้าใจ หลักการทำงานของวงจรชนิดนี้จำเป็นต้องศึกษาการทำงานของออปแอมป์ที่มีการป้อนกลับแบบบวกดังในรูปที่ 2.8 เสียก่อนสังเกตข้อแตกต่างระหว่างการป้อนกลับชนิดนี้กับการป้อนกลับแบบลบที่ได้ศึกษามาแล้ว พบว่าสัญญาณอินพุตของวงจรนี้ถูกป้อนเข้าที่ขั้วอินพุตบวกทำให้เอาต์พุตที่ได้มีเฟสตรงกับอินพุต ดังนั้นเมื่อป้อนสัญญาณจากเอาต์พุตกลับมายังอินพุตแรงดันรวมก็จะสูงขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งถึงแรงดันอิ่มตัว $+V_{sat}$ หรือ $-V_{sat}$



(a)



(b)

รูปที่ 2.8 แสดงวงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยมที่ได้จากการรวมวงจรมงจรีนทิเกรเตอร์กับคอมพาราเตอร์

จากคุณสมบัติของวงจรชนิดป้อนกลับแบบบวกรู้ได้กล่าวมาเมื่อเริ่มจ่ายไฟเลี้ยงให้กับออปแอมป์แรงดันค่าน้อยๆระหว่างขั้วอินพุท (V_d) หรือแรงดันออฟเซตจะเป็นผลให้เอาต์พุทอิมิตัวทันทีจากรูปที่ 2.8 a V_{out} มีค่าเท่ากับ $+V_{sat}$ และจะอยู่ในสถานะนั้นจนกระทั่งแรงดันที่อินพุทมีค่าต่ำลงถึงแรงดันค่าหนึ่ง (เรียกว่าแรงดันฮีดเหนี่ยว $-V_T$) ซึ่งจะทำให้ศักดาที่ปรากฏ

ขั้วอินพุทบวกรู้มีค่าเป็นลบเทียบกับศักดาที่ขั้วอินพุทลบซึ่งต่อกับกราวด์เป็นผลให้ V_{out} เปลี่ยนสถานะเป็น $-V_{sat}$ (คุณสมบัติของคอมพาราเตอร์) และในการเปลี่ยนสถานะของเอาต์พุทให้กลับมาเป็น $+V_{sat}$ อีกครั้งแรงดัน V_{in} จะต้องเพิ่มค่าเป็น $+V_T$ เสียก่อนซึ่งทำให้ศักดาที่ขั้วบวกรู้มีค่าสูงกว่ากราวด์

นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งในการอธิบายวงจรนี้โดยให้พิจารณากระแสผ่านตัวต้านทานต่างๆสมมติให้ V_{in} ในขณะเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์และ V_{out} มีค่าเป็น $+13.5$ โวลต์ (V_{out} ยังอิมิตัวได้ทั้งๆที่ V_{in} เป็นศูนย์เพราะว่ามีกระแสออฟเซตไหลผ่าน R_{in} ทำให้เกิด V_d ขึ้น) เราสามารถคำนวณกระแส I_{in} (ซึ่งมีค่าเท่ากับ I_F) ได้จากกฎของโอห์มนั้นคือ

$$I_{in} = I_F = \frac{V_{out}}{R_{in} + R_F} = 0.123$$

เป็นผลให้ $V_d = R_{in} \times I_{in} = +1.23$ โวลต์ (เมื่อ $V_{in} = 0$ โวลต์) เมื่อค่อยๆปรับ V_{in} ให้มีค่าต่ำลง V_d จะมีค่าลดลงเช่นกันจนในที่สุดเมื่อถึงแรงดัน $-V_T$ ซึ่งทำให้ $V_d = 0$, V_{out} เปลี่ยนสถานะไปเป็น $-V_{sat}$ และเมื่อ V_{out} มีค่าเป็น $-V_{sat}$ V_d จะมีขนาดเท่ากับ

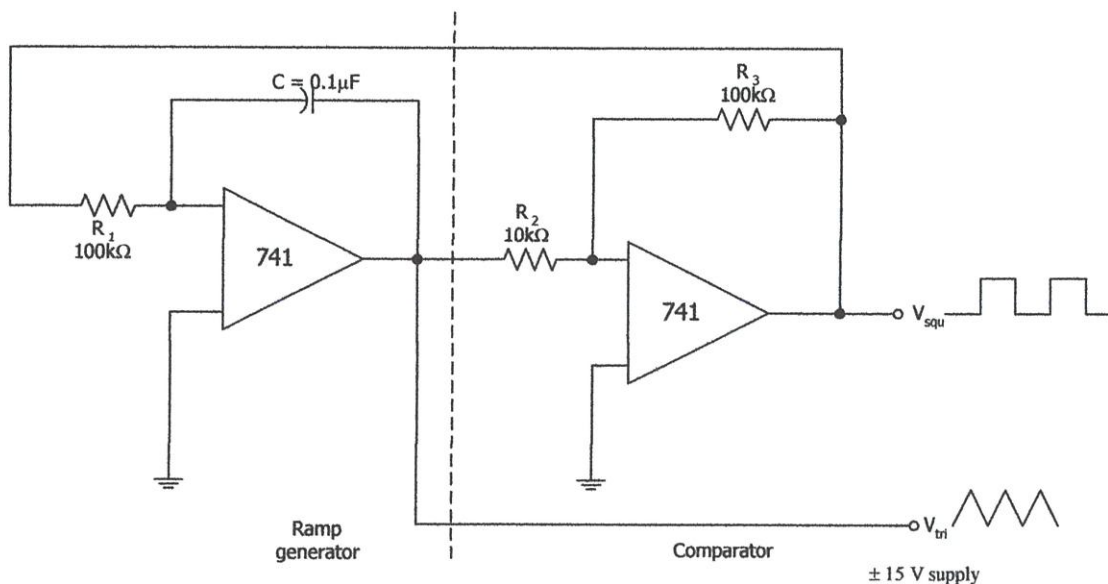
-1.23 V ดังนั้นจึงต้องเพิ่มค่า V_{in} ขึ้นเพื่อทำให้ V_d กลับเป็นศูนย์ดั้งเดิมซึ่งเมื่อนั้น $V_{in} = V_T$

เราสามารถคำนวณหา $+V_T$ และ $-V_T$ จากสมการ

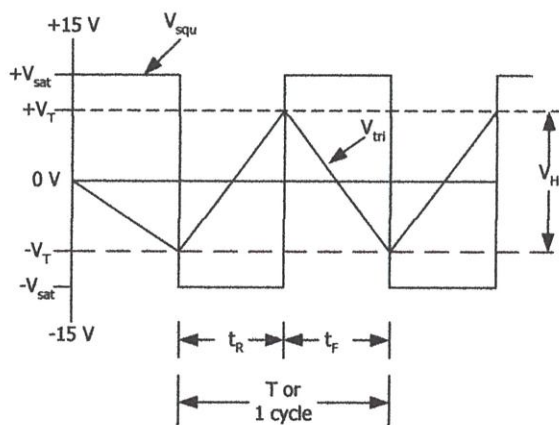
$$+V_T = \frac{+V_{sat}}{R_f/R_{in}} \quad (2.6)$$

และ

$$-V_T = \frac{-V_{sat}}{R_f/R_{in}} \quad (2.7)$$



(a)



(b)

รูปที่ 2.9 แสดงวงจรคอมพาราเตอร์และวงจรกำเนิดคลื่นเรมพ์

ซึ่งเรานำคอมพาราเตอร์ชนิดนี้มาใช้ร่วมกับวงจรกำเนิดคลื่นเรมพ์ (อินทิเกรเตอร์) เพื่อสร้างวงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยมดังในรูปที่ 2.9 โดยการนำเอาที่พู่จากอินทิเกรเตอร์มาต่อเป็นอินพุตให้แก่คอมพาราเตอร์แล้วป้อนเอาที่พู่จากคอมพาราเตอร์กลับไปยังอินพุตของอินทิเกรเตอร์อีกที จะเห็นว่าเมื่อใดที่คลื่นสามเหลี่ยมมีขนาดเท่า $+V_T$ หรือ $-V_T$ สัญญาณเอาที่พู่ของคอมพาราเตอร์จะเปลี่ยนสถานะทันทีทำให้เกิดการออสซิลเลตตลอดเวลา

ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตสามารถหาได้จากค่า t_R (เวลาในการขึ้น) และ t_F (เวลาในการตก) ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมซึ่งมีค่าดังนี้

$$t_R = \frac{V_H}{-V_{sat}} (R_1 C) \quad (2.8)$$

$$t_F = \frac{V_H}{+V_{sat}} (R_1 C) \quad (2.9)$$

โดยที่ V_H คือแรงดันฮิสเทอรีซิส (HYSTERISIS) และมีค่าเท่ากับ

$$V_H = +V_T - (-V_T) = 2 V_T$$

$$\text{คั้งนั้นคาบ (T)} = t_R + t_F$$

และความถี่เอาต์พุต f_{out} มีค่า

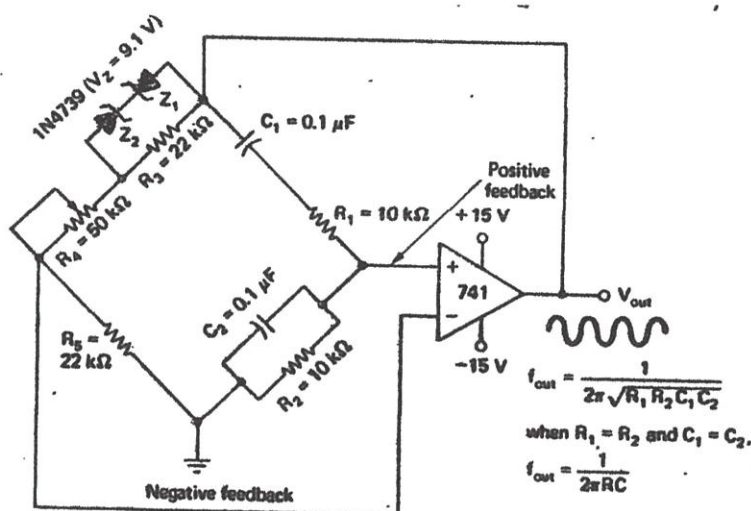
$$f_{out} = \frac{1}{T} \quad (2.10)$$

2.2.4 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์

หลักสำคัญในการสร้างวงจรกำเนิดคลื่นไซน์คือการนำวงจรกรองสัญญาณความถี่บางช่วงมาใช้เป็นภาคเลือกความถี่ของสัญญาณออสซิลเลทตัวอย่างของวงจรเช่นนี้ได้แก่วงจรเวน-บริดจ์ออสซิลเลเตอร์ (WIEN-BRIDGE) ตัวอย่างของการนำออปแอมป์มาใช้ในวงจรเช่นนี้ถูกแสดงในรูป 2.10 จะเห็นว่าขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ถูกป้อนกลับด้วยสัญญาณจากเอาต์พุต โดยมี R_1 , C_1 และ R_2 , C_2 ทำหน้าที่ป้อนกลับแบบบวกให้แก่ขั้วอินพุตบวกส่วน R_3 , R_4 , R_5 จะป้อนสัญญาณเอาต์พุตกลับแบบลบให้แก่ขั้วอินพุตลบและในการป้อนกลับรวมนั้นการป้อนกลับชนิดบวกต้องมีค่าสูงกว่าเพื่อทำให้วงจรออสซิลเลทได้ (มิเช่นนั้นถ้าการป้อนกลับแบบลบมีค่าสูงกว่าสัญญาณที่เอาต์พุตถูกลดลงจนหมดไปในที่สุด) ดังนั้นจึงต้องมี R_4 เป็นตัวควบคุมไม่ให้เกิดการป้อนกลับแบบลบมีค่าสูงเกินไป และยังทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดการเริ่มทำงานของวงจรอีกด้วยนอกจากนี้วงจรภาคที่ป้อนสัญญาณกลับชนิดบวกยังสามารถบังคับวงจรให้หยุดทำงานได้เมื่อความถี่ที่เอาต์พุตมีค่า

ต่างจากที่ได้กำหนดเอาไว้โดยมีหลักในการป้องกันดังนี้เมื่อความถี่ที่เอาต์พุตมีค่าสูงขึ้นรีเอ็คแตนซ์ของตัวเก็บ

ประจุ C_2 จะลดลงทำให้สัญญาณเอาต์พุตบวมมีขนาดลดลงนั่นคือค่าของการป้อนกลับแบบบวมจะน้อยกว่าการป้อนกลับชนิดลบทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำลงหรือในกรณีที่ความถี่ของเอาต์พุตมีค่าลดลงรีเอ็คแตนซ์ของ C_1 ก็จะเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันตกคร่อมขั้วอินพุตบวมเทียบกับกราวด์มีค่าลดลง (ตามกฎของการแบ่งแรงดัน)



รูปที่ 2.10 แสดงการนำออปแอมป์มาใช้ในวงจร

การป้อนกลับชนิดบวมจะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงขึ้นจนเกิดการออสซิลเลทโดยมีซีเนอร์ไดโอด 2 ตัว (ต่อให้หันกลับกัน) ต่อคร่อม R_3 เป็นตัวป้องกันไม่ให้แรงดันของสัญญาณที่ออสซิลเลทนี้มีค่าเกิน V_{sat} ซึ่งไดโอดสองตัวนี้ทำงานในลักษณะที่ว่าเมื่อ V_{out} มีค่าสูงใกล้ V_{sat} และสูงกว่าแรงดันพังทลาย V_z ของซีเนอร์ไดโอดไดโอดทั้งสองตัวจะเสมือนถูกลัดวงจรทำให้ความต้านทานคร่อม R_3 มีค่าต่ำมากนั่นคือศักดาที่ขั้วอินพุตบวมจะมีค่าสูงขึ้นเป็นผลให้การป้อนกลับแบบลบมีค่ามากขึ้นและป้องกันไม่ให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าสูงเกินไป

เราสามารถคำนวณความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจากสมการ

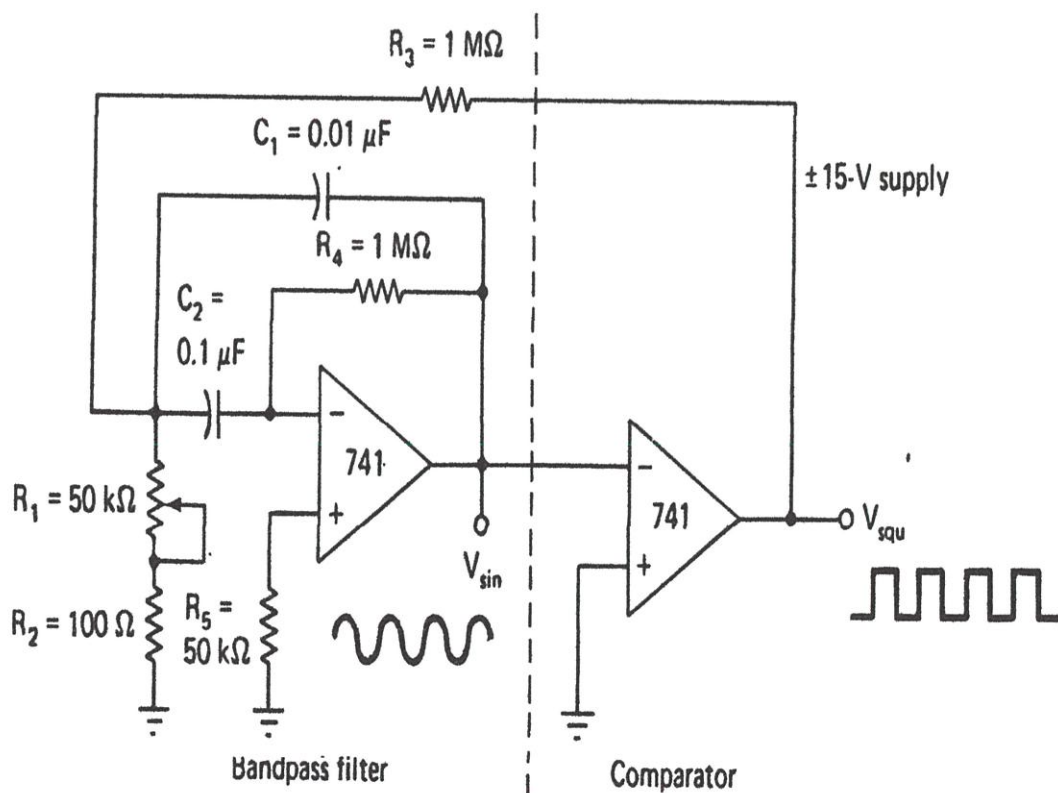
$$f_{out} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (2.11)$$

และหาก $R_1 = R_2$ $C_1 = C_2$ แล้ว

$$f_{out} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (2.12)$$

ความถี่ f_{out} สำหรับวงจรในรูปที่ 2.10 จะมีค่าประมาณ 160 เฮิรตซ์

นอกจากวงจรเวเน - บริคซ์แล้วเรายังสามารถสร้างสัญญาณไซน์ได้โดยใช้ออปแอมป์ 2 ตัวดังรูป 2.11 โดยต่อในลักษณะของวงจรคอมพาราเตอร์และวงจรรองความถี่เป็นช่วง โดยยึดหลักที่ว่าคลื่นสี่เหลี่ยมเกิดจากผลรวมของคลื่นหลายชนิด (ในความเป็นจริงแล้วควรกล่าวว่าเกิดจากคลื่นไซน์หลายๆฮาร์โมนิก) ซึ่งรวมทั้งคลื่นไซน์หลักด้วยฉะนั้นถ้าเรารองความถี่ของคลื่นไซน์หลักโดยใช้วงจรฟิลเตอร์เอทท์พุทก็จะอยู่ในรูปของสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ส่วนการนำคอมพาราเตอร์ต่อกับวงจรฟิลเตอร์นั้นก็เพื่อสร้างสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อนำกลับไปป้อนให้กับวงจรฟิลเตอร์อีกทีทำให้วงจรสร้างสัญญาณออสซิลเลทออกมาอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะวงจรคอมพาราเตอร์

เราสามารถคำนวณความถี่ f_{out} จากสมการ

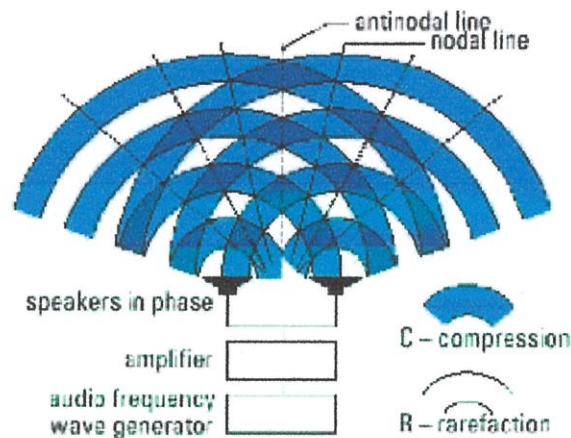
$$f_{out} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_P R_4 C_1 C_2}} \quad (2.13)$$

$$R_P = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \quad (2.14)$$

ตัวต้านทาน R_2 ในวงจรมีค่าต่ำมากซึ่งมีไว้สำหรับป้องกันไม่ให้สัญญาณป้อนกลับถูกต่อลงกราวด์เท่านั้น (กรณีนี้ R_1 ถูกปรับให้เป็นศูนย์) ส่วนตัวต้านทาน R_4 จะใช้เป็นตัวเปลี่ยนความถี่ของการออสซิลเลทในวงจรรูป 2.11 f_0 อาจเปลี่ยนแปลงได้จาก 7 เฮิรท์ซถึง 1.6 กิโลเฮิรท์ซโดยการปรับ R_1 และหากต้องการออสซิลเลเตอร์ที่มีความถี่ในย่านความถี่ของเสียงก็สามารถทำได้โดยเปลี่ยนตัวประจุ C_1 และ C_2

2.3 การแทรกสอดของเสียง

เมื่อมีคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งที่เหมือนกัน เคลื่อนที่ไปพบกันจะทำให้เกิดการรวมกันของคลื่นเป็นคลื่นลัพธ์ซึ่งมี 2 ลักษณะ คือ รวมกันแบบเสริมกันหรือหักล้างกัน ตำแหน่งที่คลื่นรวมกันแบบเสริมกันเรียกว่า ปฏิบัพ (Antinode) ซึ่งตำแหน่งนี้เสียงจะดังที่สุด และตำแหน่งที่คลื่นรวมกันแบบหักล้างกัน เรียกว่า บัพ (Node) ซึ่งตำแหน่งนี้เสียงจะเบาที่สุด



รูปที่ 2.12 การแทรกสอดของคลื่นเสียงทำให้เกิดแนวปฏิบัพและแนวบัพ

การรวมคลื่นเสียงแบบหักล้างทำให้เสียงค่อยลงหรือไม่ได้ยินเลยเป็นหลักการสำคัญของเทคโนโลยีการลดเสียงรบกวน ที่ครอบหูป้องกันเสียงดังของนักบินสร้างคลื่นเสียงที่เหมือนกับภาพสะท้อนของเสียงออกมาเพื่อหักล้างเสียงรบกวน จนทำให้นักบินในห้องเครื่องปลอดภัยจากเสียงรบกวน และการออกแบบระบบเสียงเพื่อหักล้างเสียงจากท่อไอเสียรถยนต์ก็จะช่วยลดเสียงรบกวนในห้องโดยสารได้เช่นกัน

หากกำหนดให้จุด P เป็นจุดที่อยู่บนเส้นปฏิบัพ และจุด Q เป็นจุดที่อยู่บนเส้นบัพ

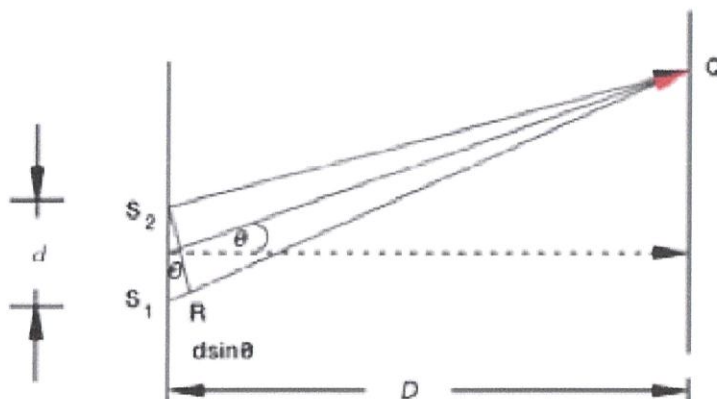
สำหรับแนวปฏิบัพ

$$\text{Path difference : } |S_1P - S_2P| = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.15)$$

สำหรับแนวบัพ

$$\text{Path difference : } |S_1Q - S_2Q| = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.16)$$

แต่ถ้าหากจุดที่เรากำลังพิจารณานั้นอยู่ไกลมากเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสอง เราอาจประมาณได้ว่า



รูปที่ 2.12 แสดงระยะห่างแหล่งกำเนิดของคลื่น

สำหรับแนวปฏิบัติ

$$\text{Path difference : } d \sin \theta = n \lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.17)$$

สำหรับแนวปฏิบัติ

$$\text{Path difference : } d \sin \theta = \left(n - \frac{1}{2}\right) \lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.18)$$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

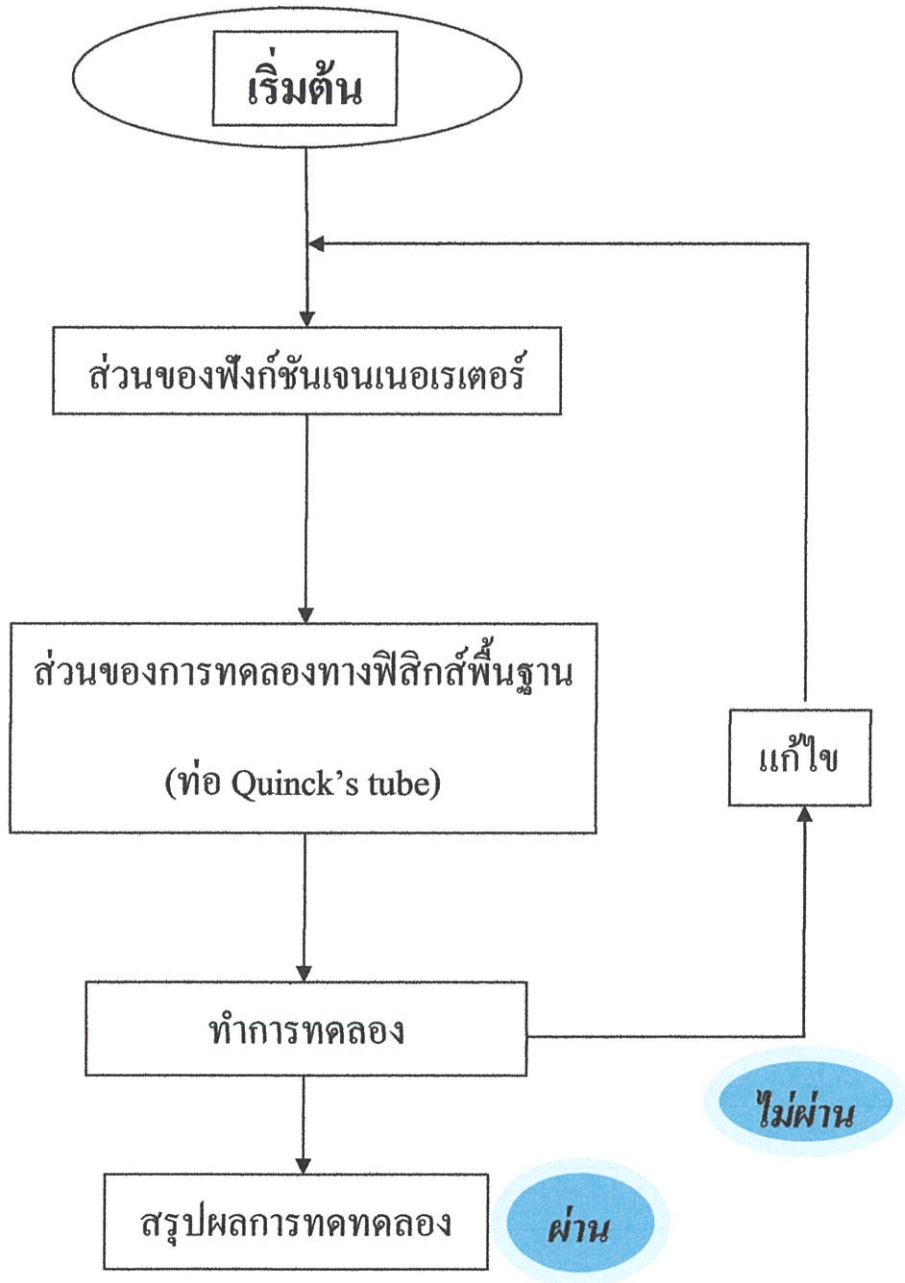
ในการออกแบบการทดลอง เรื่องการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ในการทดลองทางฟิสิกส์นั้น ประโยชน์ของการทดลองเพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่และการนำไปประยุกต์ใช้กับการทดลองทางฟิสิกส์พื้นฐาน โดยในการทดลอง ณ ที่นี้คือ การทดลองการแทรกสอดของคลื่นเสียง โดยท่อ Quinck's Tube มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) การศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่
- 2) การออกแบบการดำเนินงาน โดยสรุปเป็นแผนผังการดำเนินงาน
- 3) การออกแบบชุดอุปกรณ์จำลองการทดลอง
- 4) สรุปวิธีดำเนินงาน

3.1 การศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่

วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่มีหลายรูปแบบ หลายวงจร ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งอธิบายมาแล้วข้างต้นในบทที่ 2

3.2 การออกแบบการดำเนินงานโดยสรุปเป็นลักษณะแผนผังการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 เป็นแผนภาพแสดงถึงลักษณะการดำเนินงาน โดยจัดทำเป็นลักษณะแผนผังการดำเนินงาน

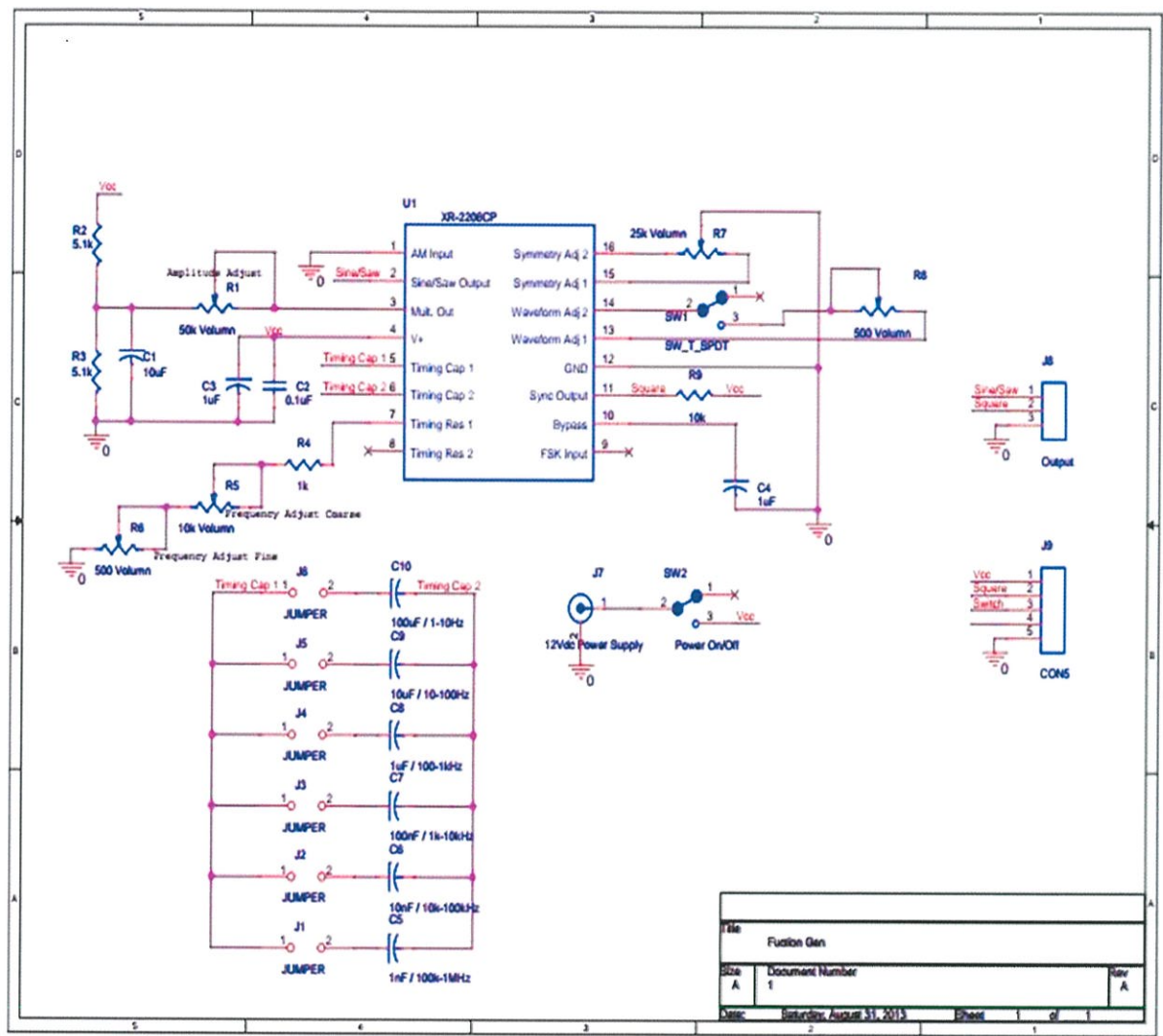
3.3 เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (Function Generator)

3.3.1 ส่วนประกอบของการทดลองของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (Function Generator)

อุปกรณ์ของวงจรการทดลอง (IC Xr 2206)

1. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 50 Kohms 1ตัว
2. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 10 Kohms 1ตัว
3. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 500 ohms 2ตัว
4. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 25 Kohms 1ตัว
5. ตัวต้านทาน 10 Kohms 1ตัว
6. ตัวต้านทาน 5.1 Kohms 2ตัว
7. ตัวต้านทาน 1 Kohms 1ตัว
8. ตัวเก็บประจุ 0.1 μF 1ตัว
9. ตัวเก็บประจุ 1 μF 3ตัว
10. ตัวเก็บประจุ 10 μF 2ตัว
11. ตัวเก็บประจุ 0.1 μF 1ตัว
12. ตัวเก็บประจุ 100 μF 1ตัว
13. ตัวเก็บประจุ 0.1 μF 1ตัว
14. ตัวเก็บประจุ 1 nF 1ตัว
15. ตัวเก็บประจุ 1 nF 1ตัว
16. ตัวเก็บประจุ 0.1 μF 1ตัว
17. ตัวเก็บประจุ 100 nF 1ตัว

3.3.2 วงจรการทดลองของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (Function Generator) โดยเขียนเป็น Schematic



รูปที่ 3.3 แสดงการเขียน Schematic ในวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่

3.3.5 ขั้นตอนในการวางตัวอุปกรณ์และบัดกรีตัวอุปกรณ์ลงในบอร์ดการทดลอง

บอร์ดการทดลองเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่มี 2 แบบ คือ

- 1) Fixed Sine Generator
- 2) Function Generator

ซึ่งแบบที่ 1 จะเป็นการฟิกซ์ความถี่ไว้ที่ค่าต่างๆคือ

770Hz

950Hz

1.14KHz

1.29KHz

รูปคลื่นที่ปรากฏจะเป็นเฉพาะรูปคลื่นไซน์เท่านั้น และแบบที่ 2จะเป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ที่สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 10Hz-1MHz

แบบที่1 Fixed Sine Generator

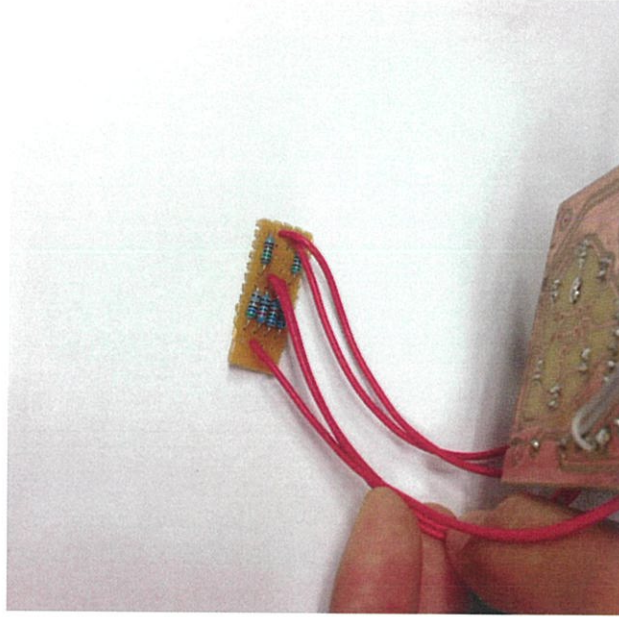
ตัวต้านทานที่ใช้ในการฟิกซ์ความถี่มีค่าต่างๆดังนี้

770Hz ใช้ ตัวต้านทาน 12.5กิโลโอห์ม

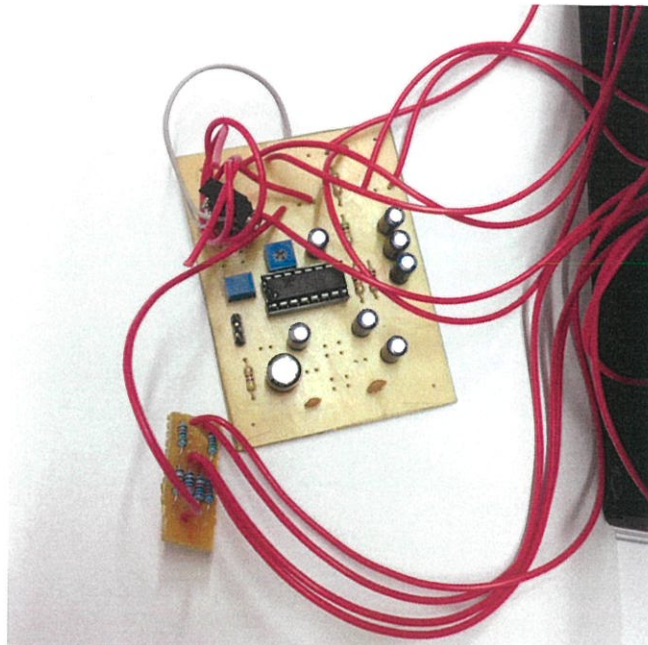
950Hz ใช้ ตัวต้านทาน 10กิโลโอห์ม

1.14KHz ใช้ ตัวต้านทาน 8.24กิโลโอห์ม

1.29KHz ใช้ ตัวต้านทาน 7.20กิโลโอห์ม



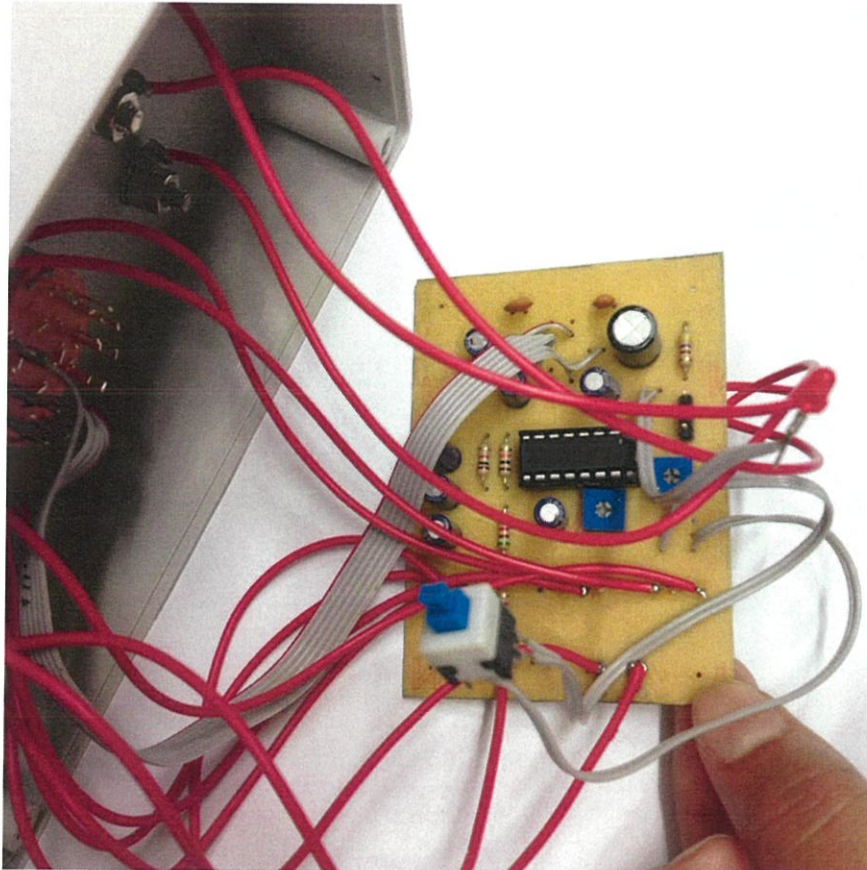
รูปที่3.6 แสดงตัวต้านทานที่สามารถฟิกซ์ค่าความถี่ได้



รูปที่3.7 แสดงวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ที่สามารถฟิกซ์ค่าความถี่ได้

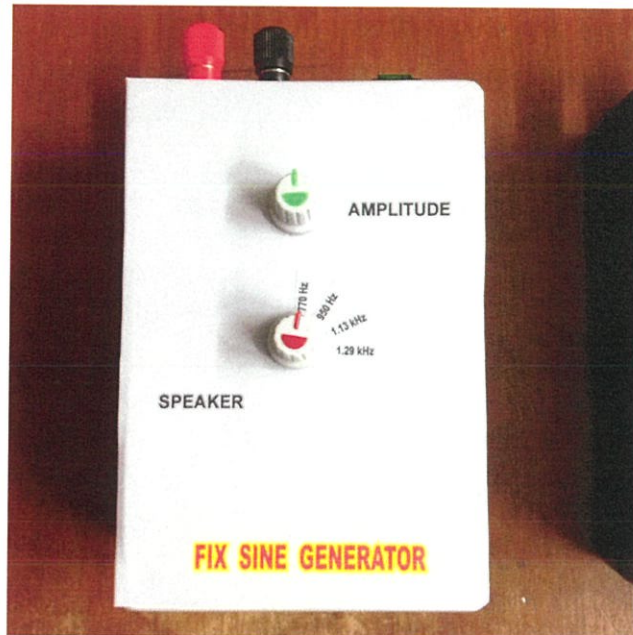
แบบที่ 2 Function Generator

จะเป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ที่สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 10Hz-1MHz



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่แบบไม่ฟิกซ์ความถี่

แบบที่ 1 Fixed Sine Generator



รูปที่ 3.9 แสดงรูปกล่องแบบ Fixed Sine Generator

แบบที่ 2 Function Generator



รูปที่ 3.10 แสดงรูปกล่องแบบ Function Generator

3.4 Quinck's Tube

Quinck's tube เป็นท่อสแตนเลส จุดประสงค์ของท่อนี้คือ ไว้ใช้ในการทำการทดลองเพื่อดูการแทรกสอดของเสียงเมื่อให้ความถี่ในย่านต่างๆ ซึ่งความถี่ใช้ในการทดลองจะมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ คือ Fix Sine Generator และ Function Generator และใช้ในการหาความยาวคลื่นเพื่อนำไปหาค่าความเร็วเสียงในอากาศ

ลักษณะของท่อ Quinck's tube



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของท่อ Quinck's tube

3.5 วิธีทำการทดลอง

ในการทดลองเราจะทำการวัดระยะเลื่อนของท่อ Quinck's tube โดยการให้สัญญาณความถี่เข้าไปในท่อการทดลองและใช้หูฟังเสียงที่ดังที่สุด หรือใช้ Digital multimeter ในการวัด โวลต์ที่สูงที่สุด เมื่อมีการแทรกสอดของเสียงภายในท่อ Quinck's tube



รูปที่ 3.12 แสดงการทดลองโดยการใช้ Digital multimeter

วิธีการทดลอง

1. Fixed Sine Generator

2. Function Generator

โดยในการทดลองนี้เราจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1.1 โดยการใช้นูฟิ่ง ฟังเสียงที่ดังที่สุด เมื่อทำการเลื่อนระยะของท่อ Quinck's tube และได้ตำแหน่งของเสียงที่ดังที่สุด เมื่อเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน จะได้ระยะของท่อ Quinck's tube เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเร็วของเสียงต่อไป
- 1.2 โดยการใช้ Digital Multimeter ดูโวลต์ที่สูงที่สุด เมื่อทำการเลื่อนระยะของท่อ Quinck's tube และได้ตำแหน่งของเสียงที่ดังที่สุด เมื่อเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน จะได้ระยะของท่อ Quinck's tube เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเร็วของเสียงต่อไป
- 1.3 เมื่อได้ระยะของท่อที่เลื่อนออกไปแล้ว เราจะนำระยะที่ได้ทั้งสองระยะมาคำนวณเพื่อหาความเร็วเสียงในอากาศ
- 1.4 เมื่อหาความเร็วเสียงในอากาศ เราจะทำการหาความคลาดเคลื่อน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ต่อไป

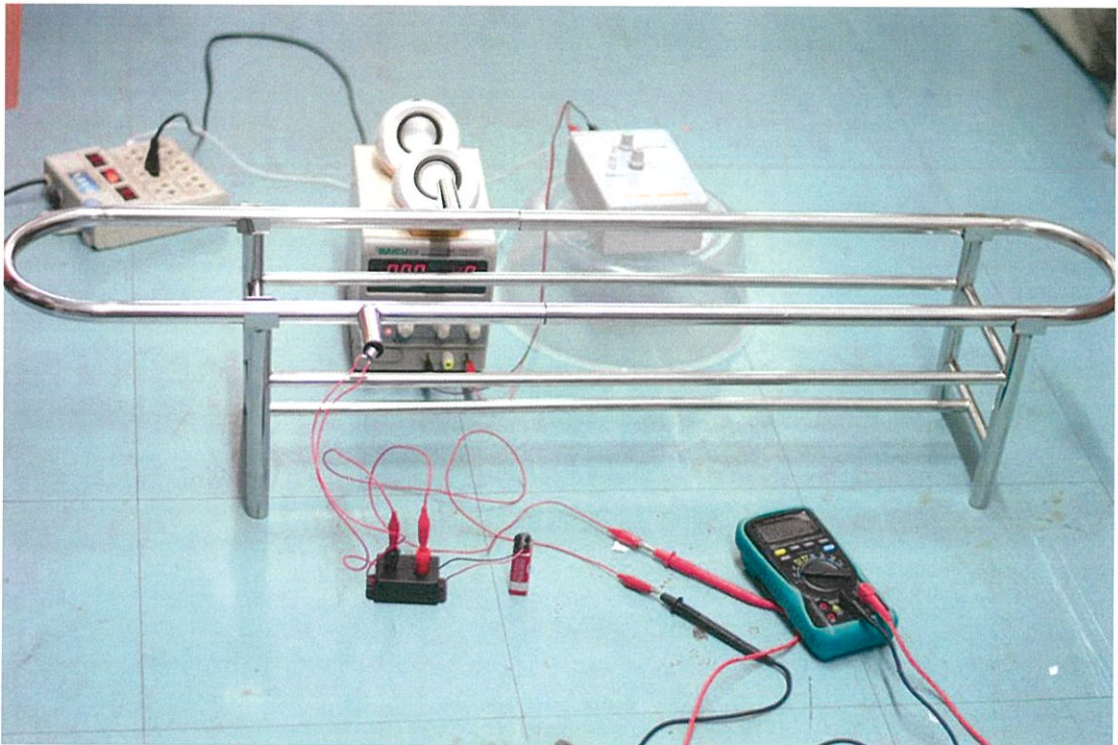
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลการทดลอง Fixed Sine Generator

ความถี่ที่ทำการพิชค่าความถี่ในการทดลอง ประกอบด้วยกล่องการทดลอง 2 ชุด



รูปที่ 4.1 แสดงการทดลองแบบ Fixed Sine Generator

Fixed Sine Generator (กลองตีดำ)

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	770 Hz		950Hz		1140Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	15.00	31.00	6.80	25.30	14.00	29.30	10.20	23.70
2	14.50	34.80	6.70	24.30	14.00	29.40	9.60	22.90
3	16.00	37.10	5.90	23.70	14.90	29.60	10.00	23.30
4	14.50	37.00	6.20	23.50	15.00	29.70	10.20	24.70
5	15.20	38.30	5.50	25.00	15.00	29.40	10.00	23.50
เฉลี่ย	15.04	35.64	6.22	24.36	14.58	29.48	10.00	23.62

โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	770Hz		950Hz		1140Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	15.60	35.10	5.50	24.50	13.70	26.50	9.70	24.50
2	15.30	36.30	5.90	25.70	13.80	26.00	10.00	23.00
3	16.50	35.90	6.20	24.50	14.50	29.00	10.60	23.40
4	14.50	35.50	6.30	25.00	13.30	28.00	9.50	23.50
5	15.20	35.30	6.00	23.60	14.70	29.00	9.30	24.00
เฉลี่ย	15.42	35.62	5.98	24.66	14.00	27.70	9.82	23.68

Fixed Sine Generator (กลองสีขาว)

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

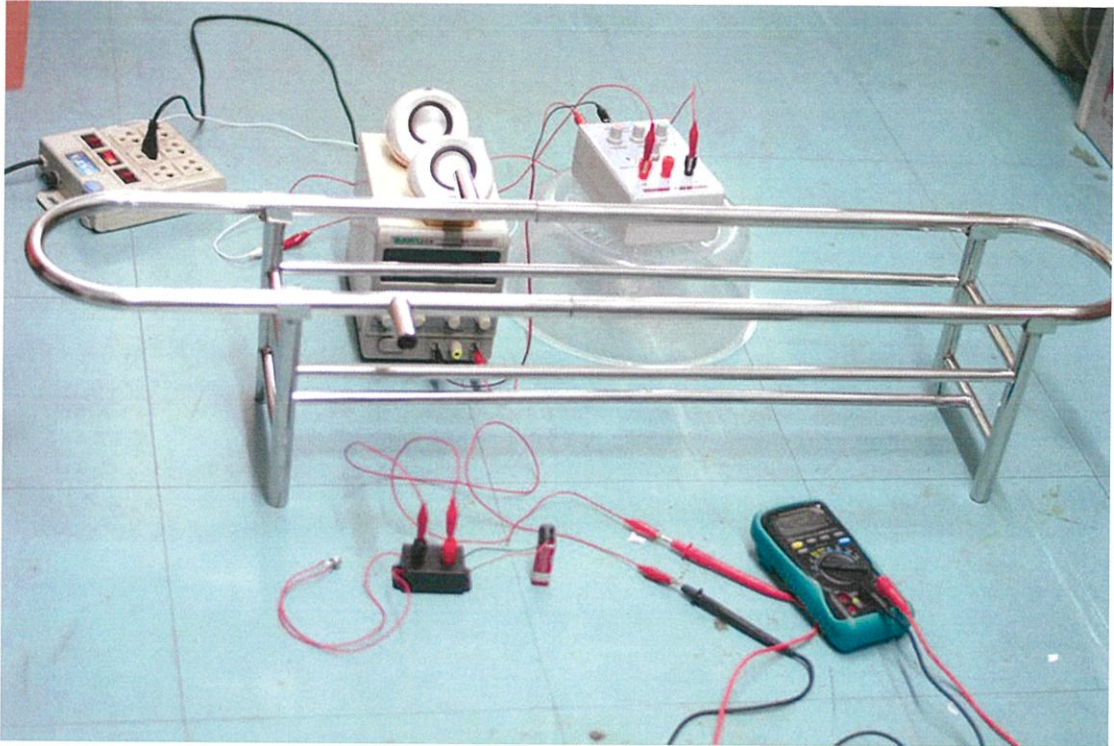
ความถี่ ระยะcm	770Hz		950Hz		1130Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	14.70	33.00	6.70	22.20	11.30	29.00	10.20	22.50
2	15.20	33.30	6.30	22.70	10.50	28.60	10.90	23.30
3	15.10	31.50	6.00	23.50	10.70	27.70	10.50	23.40
4	14.60	32.50	6.00	21.60	10.00	27.00	10.80	23.60
5	14.80	32.70	6.10	23.20	10.90	27.30	10.00	22.00
เฉลี่ย	14.88	32.60	6.22	22.64	10.68	27.92	10.48	22.96

โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	770Hz		950Hz		1130Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	15.20	34.20	6.00	24.00	13.30	31.20	10.60	23.50
2	14.80	34.20	5.90	23.50	15.50	30.40	9.50	21.80
3	15.00	34.30	5.70	24.00	14.30	30.10	10.10	22.60
4	14.30	34.90	5.70	23.30	15.40	29.10	9.70	21.50
5	14.30	33.10	6.00	23.00	14.00	28.90	10.50	22.00
เฉลี่ย	14.72	34.14	5.86	23.56	14.50	29.94	10.08	22.28

4.1.2 ผลการทดลอง Function Generator

ความถี่ที่ไม่ทำการพิชค่าความถี่ในการทดลอง ประกอบด้วยกล่องการทดลอง 2 ชุด



รูปที่ 4.2 แสดงการทดลองแบบ Function Generator

Function Generator (กล้องลีด้า)

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	13.00	33.30	6.00	21.80	13.50	30.50	8.20	23.50
2	13.50	34.00	5.20	22.20	14.80	28.80	7.50	24.00
3	13.40	32.50	5.80	22.00	14.10	28.20	7.00	19.00
4	14.20	33.50	5.80	22.60	13.50	29.30	6.80	20.00
5	14.30	32.00	5.30	22.00	14.00	29.50	7.60	22.2
เฉลี่ย	13.68	33.06	5.62	22.12	13.98	29.26	7.42	21.74

โดยการใช้ Digital Multimeter (คู่วอลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	14.10	35.00	6.50	27.40	13.80	30.30	8.00	24.10
2	13.40	34.00	5.90	27.20	13.00	30.00	9.40	22.40
3	14.10	33.30	6.10	27.50	13.10	31.70	8.70	21.20
4	13.00	33.00	6.20	27.70	13.80	30.20	8.80	24.20
5	12.10	36.60	6.80	28.00	12.70	29.80	7.90	24.30
เฉลี่ย	13.34	34.38	6.30	27.56	13.28	30.40	8.56	23.24

Function Generator (กล้องสี่ขา)

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	13.50	34.00	6.20	22.10	13.00	29.70	7.90	21.10
2	12.10	34.60	6.90	21.40	13.30	31.50	7.20	20.50
3	12.90	35.10	6.50	22.40	12.30	30.70	7.40	21.80
4	12.30	34.80	6.00	22.30	12.30	30.30	7.80	20.80
5	13.00	35.00	6.60	22.20	13.50	30.30	7.70	21.00
เฉลี่ย	12.76	34.70	6.44	22.08	12.88	30.50	7.60	21.04

โดยการใช้ Digital Multimeter (คู่วอลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	13.80	34.00	6.00	20.50	14.00	29.00	7.70	21.00
2	13.80	32.00	6.00	21.50	13.40	30.00	7.60	20.20
3	13.00	34.10	6.20	20.50	11.50	26.30	7.80	20.50
4	13.20	33.90	5.80	20.70	13.20	29.10	7.20	20.80
5	13.70	34.00	6.00	22.16	11.50	31.30	7.10	21.10
เฉลี่ย	13.50	33.60	6.00	21.06	12.72	29.14	7.48	20.72

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางทฤษฎี

ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางทฤษฎีเราจำเป็นต้องใช้ความเร็วเสียงในอากาศในการคำนวณด้วย

$$\text{จาก } V = 331 + 0.6t \quad 4.1)$$

เมื่อ V = ความเร็วเสียงในอากาศ

t = อุณหภูมิห้อง ($^{\circ}\text{C}$) (ในการทดลองใช้อุณหภูมิซึ่งเป็นอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศที่ 25°C)

ในการคำนวณจะได้ความเร็วเสียงในอากาศ คือ 346 m/s

และในการคำนวณจะมีค่าความถี่เข้ามาเกี่ยวข้องในการคำนวณด้วย ดังนั้นเราจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่าความยาวคลื่นเพื่อนำมาเป็นข้อมูลอ้างอิงในการคำนวณหาระยะของการแทรกสอดของเสียงภายในท่อ Quinck's tube

$$\text{จาก } v = f\lambda \quad 4.2)$$

เมื่อ v = ความเร็วเสียงในอากาศ

f = ความถี่

λ = ความยาวคลื่น

4.2.1 เงื่อนไขของการแทรกสอดแบบเสริมกัน

เงื่อนไขของการแทรกสอดแบบเสริมกัน คือ

ความแตกต่างของทางเดินเสียงตามเข็มนาฬิกา – ทวนเข็มนาฬิกา = $n\lambda$

$$L_1 - L_2 = n\lambda \quad 4.3)$$

ในกรณีที่เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ติดกันจะทำให้ $n=1$

ดังนั้นจะได้ว่า
$$L_1 - L_2 = \lambda \quad 4.4)$$

4.2.1 Fixed Sine Generator

Fixed Sine Generator (กล่องสี่ดำ)

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

770Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(35.64 - 15.04)2 = \lambda$$

$$\lambda = 20.6(2)$$

$$= 41.2/100 \text{ (m)}$$

$$V = (770)(41.2/100 \text{ (m)})$$

$$= 317.24 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{317.24 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 8.31\%$$

950Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(24.36 - 6.22)2 = \lambda$$

$$\lambda = 18.14(2)$$

$$= 36.28/100 \text{ (m)}$$

$$V = (950)(36.28/100 \text{ (m)})$$

$$= 344.66 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{344.66 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 0.39\%$$

1140Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(29.48 - 14.58)2 = \lambda$$

$$\lambda = 14.9(2)$$

$$= 29.8/100 \text{ (m)}$$

$$V = (950)(29.8/100 \text{ (m)})$$

$$= 339.72 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{339.72 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 1.82\%$$

1290Hz

$$\begin{aligned}
 \text{Path Different} &= \lambda \\
 L_1 - L_2 &= \lambda \\
 (23.62 - 10)2 &= \lambda \\
 \lambda &= 13.62(2) \\
 &= 27.24/100 \text{ (m)} \\
 V &= (1290)(27.24/100 \text{ (m)}) \\
 &= 351.39 \text{ m/s} \\
 \text{Error} &= \left| \frac{351.39 - 346}{346} \right| \times 100 \\
 &= 1.56\%
 \end{aligned}$$

โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

770Hz

$$\begin{aligned}
 \text{Path Different} &= \lambda \\
 L_1 - L_2 &= \lambda \\
 (35.62 - 15.42)2 &= \lambda \\
 \lambda &= 20.2(2) \\
 &= 40.4/100 \text{ (m)} \\
 V &= (770)(40.4/100 \text{ (m)}) \\
 &= 311.08 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{311.08 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 4.31\% \end{aligned}$$

950Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (24.66 - 5.98)2 &= \lambda \\ \lambda &= 18.68(2) \\ &= 37.36/100 \text{ (m)} \\ V &= (950)(36.28/100 \text{ (m)}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 354.92 \text{ m/s} \\ \text{Error} &= \left| \frac{354.92 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 2.58\% \end{aligned}$$

1140Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (27.7 - 14)2 &= \lambda \\ \lambda &= 13.7(2) \\ &= 27.4/100 \text{ (m)} \\ V &= (1140)(27.4/100 \text{ (m)}) \\ &= 312.36 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{312.36 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 9.72\% \end{aligned}$$

1290Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (23.68 - 9.82)2 &= \lambda \\ \lambda &= 13.86(2) \\ &= 27.72/100 \text{ (m)} \\ V &= (1290)(27.72/100 \text{ (m)}) \\ &= 357.59 \text{ m/s} \\ \text{Error} &= \left| \frac{357.39 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 3.35\% \end{aligned}$$

Fixed Sine Generator (กล่องสีขาว)

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

770Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(32.60 - 14.88)2 = \lambda$$

$$\lambda = 17.72(2)$$

$$= 35.44/100 \text{ (m)}$$

$$V = (770)(35.44/100 \text{ (m)})$$

$$= 272.88 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{272.88 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 21.13\%$$

950Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(2.64 - 6.22)2 = \lambda$$

$$\lambda = 16.42(2)$$

$$= 32.84/100 \text{ (m)}$$

$$V = (950)(32.84/100 \text{ (m)})$$

$$= 311.98 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{311.98 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 9.83\% \end{aligned}$$

1130Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (27.92 - 10.68)2 &= \lambda \\ \lambda &= 17.24(2) \\ &= 34.48/100 \text{ (m)} \\ V &= (1130)(34.48/100 \text{ (m)}) \\ &= 389.62 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{389.62 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 12.60\% \end{aligned}$$

1290Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (22.96 - 10.48)2 &= \lambda \\ \lambda &= 12.48(2) \\ &= 24.96/100 \text{ (m)} \\ V &= (1290)(24.96/100 \text{ (m)}) \\ &= 321.98 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{321.98 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 6.94\% \end{aligned}$$

โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

770Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (34.14 - 14.72)2 &= \lambda \\ \lambda &= 19.42(2) \\ &= 38.84/100 \text{ (m)} \\ V &= (770)(38.84/100 \text{ (m)}) \\ &= 299.07 \text{ m/s} \\ \text{Error} &= \left| \frac{299.07 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 13.56\% \end{aligned}$$

950Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (23.56 - 5.86)2 &= \lambda \\ \lambda &= 17.7(2) \\ &= 35.4/100 \text{ (m)} \\ V &= (950)(35.4/100 \text{ (m)}) \end{aligned}$$

$$= 336.3 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{336.3 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 2.8\%$$

1130Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(29.9 - 14.5)2 = \lambda$$

$$\lambda = 15.44(2)$$

$$= 30.88/100 \text{ (m)}$$

$$V = (1130)(30.88/100 \text{ (m)})$$

$$= 348.94 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{348.94 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 0.89\%$$

1290Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(22.28 - 10.08)2 = \lambda$$

$$\lambda = 12.2(2)$$

$$= 24.4/100 \text{ (m)}$$

$$V = (1290)(24.4/100 \text{ (m)})$$

$$= 314.76 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{314.76 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 9.03\%$$

Function Generator (กล่องสี่ตัว)

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ตั้งที่สุด)

800Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(33.06 - 13.68)2 = \lambda$$

$$\lambda = 19.38(2)$$

$$= 38.76/100 \text{ (m)}$$

$$V = (800)(38.76/100 \text{ (m)})$$

$$= 310.08 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{310.08 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 10.38\% \end{aligned}$$

1000Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (22.12 - 5.62)2 &= \lambda \\ \lambda &= 16.5(2) \\ &= 33/100 \text{ (m)} \\ V &= (1000)(33/100 \text{ (m)}) \\ &= 330 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{330 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 4.62\% \end{aligned}$$

1200Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (29.26 - 13.98)2 &= \lambda \\ \lambda &= 15.28(2) \\ &= 30.56/100 \text{ (m)} \\ V &= (1200)(30.56/100 \text{ (m)}) \\ &= 366.72 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{366.72 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 5.99\% \end{aligned}$$

1400Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (21.74 - 7.42)2 &= \lambda \\ \lambda &= 14(2) \\ &= 28/100 \text{ (m)} \\ V &= (1400)(28/100 \text{ (m)}) \\ &= 392 \text{ m/s} \\ \text{Error} &= \left| \frac{392 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 13.29\% \end{aligned}$$

โดยการใช **Digital Multimeter** (คู่วอลต์ที่สูงที่สุด)

800Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (34.38 - 13.34)2 &= \lambda \\ \lambda &= 21.04(2) \\ &= 42.08/100 \text{ (m)} \\ V &= (800)(42.08/100 \text{ (m)}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 336.64 \text{ m/s} \\
 \text{Error} &= \left| \frac{336.64 - 346}{346} \right| \times 100 \\
 &= 2.70\%
 \end{aligned}$$

1000Hz

$$\begin{aligned}
 \text{Path Different} &= \lambda \\
 L_1 - L_2 &= \lambda \\
 (27.56 - 6.3)2 &= \lambda \\
 \lambda &= 21.26(2) \\
 &= 42.52/100 \text{ (m)} \\
 V &= (1000)(42.52/100 \text{ (m)}) \\
 &= 425.2 \text{ m/s} \\
 \text{Error} &= \left| \frac{425.2 - 346}{346} \right| \times 100 \\
 &= 22.89\%
 \end{aligned}$$

1200Hz

$$\begin{aligned}
 \text{Path Different} &= \lambda \\
 L_1 - L_2 &= \lambda \\
 (30.4 - 13.28)2 &= \lambda \\
 \lambda &= 17.12(2) \\
 &= 34.24/100 \text{ (m)} \\
 V &= (1200)(34.24/100 \text{ (m)})
 \end{aligned}$$

$$= 410.88 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{410.88 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 18.75\%$$

1400Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(23.24 - 8.56)2 = \lambda$$

$$\lambda = 14.68(2)$$

$$= 29.36/100 \text{ (m)}$$

$$V = (1400)(29.36/100 \text{ (m)})$$

$$= 411.04 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{411.04 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 18.80\%$$

Function Generator (กล่องสีขาว)

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

800Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(34.7 - 12.76)2 = \lambda$$

$$\lambda = 21.94(2)$$

$$= 43.88/100 \text{ (m)}$$

$$V = (800)(43.88/100 \text{ (m)})$$

$$= 351.04 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{351.04 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 1.46\%$$

1000Hz

$$\text{Path Different} = \lambda$$

$$L_1 - L_2 = \lambda$$

$$(22.08 - 6.44)2 = \lambda$$

$$\lambda = 15.64(2)$$

$$= 31.28/100 \text{ (m)}$$

$$V = (1000)(31.28/100 \text{ (m)})$$

$$= 312.8 \text{ m/s}$$

$$\text{Error} = \left| \frac{312.8 - 346}{346} \right| \times 100$$

$$= 9.59\%$$

1200Hz

$$\begin{aligned}
 \text{Path Different} &= \lambda \\
 L_1 - L_2 &= \lambda \\
 (30.5 - 12.88)2 &= \lambda \\
 \lambda &= 17.62(2) \\
 &= 35.24/100 \text{ (m)} \\
 V &= (1200)(35.24/100 \text{ (m)}) \\
 &= 422.88 \text{ m/s} \\
 \text{Error} &= \left| \frac{422.88 - 346}{346} \right| \times 100 \\
 &= 22.22\%
 \end{aligned}$$

1400Hz

$$\begin{aligned}
 \text{Path Different} &= \lambda \\
 L_1 - L_2 &= \lambda \\
 (21.04 - 7.6)2 &= \lambda \\
 \lambda &= 13.44(2) \\
 &= 26.88/100 \text{ (m)} \\
 V &= (1400)(26.88/100 \text{ (m)}) \\
 &= 376.32 \text{ m/s} \\
 \text{Error} &= \left| \frac{376.32 - 346}{346} \right| \times 100 \\
 &= 8.76\%
 \end{aligned}$$

โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

800Hz

$$\begin{aligned}
 \text{Path Different} &= \lambda \\
 L_1 - L_2 &= \lambda \\
 (33.6 - 13.5)2 &= \lambda \\
 \lambda &= 20.1(2) \\
 &= 40.2/100 \text{ (m)} \\
 V &= (800)(40.2/100 \text{ (m)}) \\
 &= 321.6 \text{ m/s} \\
 \text{Error} &= \left| \frac{321.6 - 346}{346} \right| \times 100 \\
 &= 7.05\%
 \end{aligned}$$

1000Hz

$$\begin{aligned}
 \text{Path Different} &= \lambda \\
 L_1 - L_2 &= \lambda \\
 (21.06 - 6)2 &= \lambda \\
 \lambda &= 15.06(2) \\
 &= 30.12/100 \text{ (m)} \\
 V &= (1000)(30.12/100 \text{ (m)}) \\
 &= 301.2 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{301.2 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 12.95\% \end{aligned}$$

1200Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (29.14 - 12.72)2 &= \lambda \\ \lambda &= 16.42(2) \\ &= 32.84/100 \text{ (m)} \\ V &= (1200)(32.84/100 \text{ (m)}) \\ &= 394.08 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{394.08 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 13.90\% \end{aligned}$$

1400Hz

$$\begin{aligned} \text{Path Different} &= \lambda \\ L_1 - L_2 &= \lambda \\ (20.72 - 7.48)2 &= \lambda \\ \lambda &= 13.24(2) \\ &= 26.48/100 \text{ (m)} \\ V &= (1400)(26.48/100 \text{ (m)}) \\ &= 370.72 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{370.72 - 346}{346} \right| \times 100 \\ &= 7.14\% \end{aligned}$$

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.3.1 การวิเคราะห์ผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error)

$$\text{จาก ค่าความคลาดเคลื่อน(Error)} = \left| \frac{\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าที่ได้จากทฤษฎี}}{\text{ค่าที่ได้จากทฤษฎี}} \right| \times 100\%$$

Fixed Sine Generator (กล่องสี่ค่า)

ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการใช้หูในการฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ Error	770Hz		950Hz		1140Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Error (%)	0.27	4.96	3.67	1.50	2.80	1.73	4.76	1.58

ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ Error	770Hz		950Hz		1140Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Error (%)	2.80	5.01	0.33	2.75	6.67	7.67	6.47	1.33

Fixed Sine Generator (กล่องสีขาว)

ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการใช้หูในการฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ Error	770Hz		950Hz		1130Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Error (%)	1.87	30.56	3.67	5.67	35.27	12.75	0.19	4.33

ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการใช้ Digital Multimeter (คู่วอลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ Error	770Hz		950Hz		1130Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Error (%)	1.33	29.65	2.33	1.87	12.12	6.44	4.00	7.17

Function Generator (กล่องสีดำ)

ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการใช้หูในการฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ Error	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Error (%)	5.23	4.17	12.40	1.68	3.56	4.50	1.06	8.70

ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการใช้ Digital Multimeter (คู่วอลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ Error	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Error (%)	0.02	0.01	26.00	22.48	1.63	8.57	14.13	16.20

Function Generator (กล่องสี่ขาว)

ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการใช้หูในการฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ Error	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Error (%)	1.85	2.06	28.8	1.87	4.59	8.93	1.33	5.20

ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ Error	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Error (%)	3.85	1.18	20.00	6.40	5.55	4.07	0.27	3.60

4.3.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จาก

$$\text{ส.ท.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

แต่เนื่องจากการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณได้

การคำนวณ ใช้ สูตร

$$=STDEV(A1:A5)$$

Fixed Sine Generator (กล่องสี่ดำ) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(S.D.) ดังนี้

โดยการ ใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ระยะcm \ ความถี่	770 Hz		950Hz		1140Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	15.00	31.00	6.80	25.30	14.00	29.30	10.20	23.70
2	14.50	34.80	6.70	24.30	14.00	29.40	9.60	22.90
3	16.00	37.10	5.90	23.70	14.90	29.60	10.00	23.30
4	14.50	37.00	6.20	23.50	15.00	29.70	10.20	24.70
5	15.20	38.30	5.50	25.00	15.00	29.40	10.00	23.50
S.D.	0.62	2.88	0.54	0.79	0.53	0.16	0.24	0.67

โดยการ ใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

ระยะcm \ ความถี่	770Hz		950Hz		1140Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	15.60	35.10	5.50	24.50	13.70	26.50	9.70	24.50
2	15.30	36.30	5.90	25.70	13.80	26.00	10.00	23.00
3	16.50	35.90	6.20	24.50	14.50	29.00	10.60	23.40
4	14.50	35.50	6.30	25.00	13.30	28.00	9.50	23.50
5	15.20	35.30	6.00	23.60	14.70	29.00	9.30	24.00
S.D.	0.72	0.48	0.31	0.77	0.58	1.39	0.51	0.58

Fixed Sine Generator (กล่องสีขาว) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(S.D.) ดังนี้

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	770Hz		950Hz		1130Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	14.90	26.00	6.70	22.20	11.30	29.00	10.20	22.50
2	15.60	26.70	6.30	22.70	10.50	28.60	10.90	23.30
3	14.60	25.00	6.00	23.50	10.70	27.70	10.50	23.40
4	15.70	25.60	6.00	21.60	10.00	27.00	10.80	23.60
5	15.60	26.90	6.10	23.20	10.90	27.30	10.00	22.00
S.D.	0.49	0.78	0.29	0.76	0.48	0.85	0.38	0.68

โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	770Hz		950Hz		1130Hz		1290Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	15.10	26.50	6.00	24.00	13.30	31.20	10.60	23.50
2	15.20	26.60	5.90	23.50	15.50	30.40	9.50	21.80
3	15.60	25.50	5.70	24.00	14.30	30.10	10.10	22.60
4	14.80	26.70	5.70	23.30	15.40	29.10	9.70	21.50
5	15.30	26.60	6.00	23.00	14.00	28.90	10.50	22.00
S.D.	0.29	0.49	0.15	0.44	0.94	0.95	0.48	0.79

Function Generator (กล่องสี่ดำ) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(S.D.) ดังนี้

โดยการใช้นูฟิ่ง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	13.00	33.30	6.00	21.80	13.50	30.50	8.20	23.50
2	13.50	34.00	5.20	22.20	14.80	28.80	7.50	24.00
3	13.40	32.50	5.80	22.00	14.10	28.20	7.00	19.00
4	14.20	33.50	5.80	22.60	13.50	29.30	6.80	20.00
5	14.30	32.00	5.30	22.00	14.00	29.50	7.60	22.20
S.D.	0.55	0.80	0.34	0.30	0.54	0.85	0.55	2.17

โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	14.10	35.00	6.50	27.40	13.80	30.30	8.00	24.10
2	13.40	34.00	5.90	27.20	13.00	30.00	9.40	22.40
3	14.10	33.30	6.10	27.50	13.10	31.70	8.70	21.20
4	13.00	33.00	6.20	27.70	13.80	30.20	8.80	24.20
5	12.10	36.60	6.80	28.00	12.70	29.80	7.90	24.30
S.D.	0.83	1.46	0.35	0.30	0.50	0.75	0.62	1.38

Function Generator (กล่องสี่ขาว) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(S.D.) ดังนี้

โดยการใช้หูฟัง (ฟังเสียงที่ดังที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	13.50	34.00	6.20	22.10	13.00	29.70	7.90	21.10
2	12.10	34.60	6.90	21.40	13.30	31.50	7.20	20.50
3	12.90	35.10	6.50	22.40	12.30	30.70	7.40	21.80
4	12.30	34.80	6.00	22.30	12.30	30.30	7.80	20.80
5	13.00	35.00	6.60	22.20	13.50	30.30	7.70	21.00
S.D.	0.56	0.44	0.35	0.40	0.56	0.66	0.29	0.48

โดยการใช้ Digital Multimeter (ดูโวลต์ที่สูงที่สุด)

ความถี่ ระยะcm	800Hz		1000Hz		1200Hz		1400Hz	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	13.80	34.00	6.00	20.50	14.00	29.00	7.70	21.00
2	13.80	32.00	6.00	21.50	13.40	30.00	7.60	20.20
3	13.00	34.10	6.20	20.50	11.50	26.30	7.80	20.50
4	13.20	33.90	5.80	20.70	13.20	29.10	7.20	20.80
5	13.70	34.00	6.00	22.16	11.50	31.30	7.10	21.20
S.D.	0.37	0.90	0.14	0.73	1.15	1.83	0.31	0.40

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองการประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่กับการทดลองทางฟิสิกส์พื้นฐาน ในส่วนของการทดลองเราได้แบ่งการทดลองออกเป็น

5.1.1 Fixed Sine Generator

5.1.2 Function Generator

และในแต่ละส่วนของการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ

5.1.1.1 ส่วนของการใช้หูในการฟังโดยฟังเสียงที่ดังที่สุด

5.1.1.2 ส่วนของการใช้ Digital Multimeter โดยการดู โวลต์ที่มากที่สุด

โดยในการทดลองเราจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่โดยมีการฟิกซ์ค่าความถี่และไม่ฟิกซ์ค่าความถี่และรูปสัญญาณที่เราใช้ในการทดลองเราจะใช้รูปสัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์เนื่องจากรูปสัญญาณคลื่นไซน์เป็นรูปสัญญาณที่เป็นรูปสัญญาณพื้นฐาน เมื่อเรานำสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ไปใช้ในการทดลองภายในท่อ Quinck's tube เราจะสามารถทดลองการแทรกสอดของเสียงภายในท่อได้ เนื่องจากเมื่อเราขยับระยะของท่อให้เพิ่มมากขึ้นก็จะมีเกิดการแทรกสอดของเสียงเกิดขึ้นภายในท่อซึ่งจะเป็นเสียงที่ดังที่สุด และในการวิเคราะห์ข้อมูลเราจะวิเคราะห์ข้อมูลคือ ค่าเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าเปรียบเทียบระหว่างความเร็วเสียงในอากาศตามทฤษฎีกับค่าความเร็วเสียงในอากาศที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลจะได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลตามบทที่ 4 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น่าพอใจและไม่เบี่ยงเบนไปมากจากค่ามาตรฐานมากนัก

1. ในการทดลองการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่กับการทดลองทางฟิสิกส์พื้นฐานนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้ในเรื่องการแทรกสอดของเสียงภายในท่อ Quinck's tube โดยเมื่อนำสัญญาณจากเครื่องกำเนิดความถี่ให้แก่ท่อ Quinck's tube จะสามารถทำการวัดระยะของท่อเมื่อเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันภายในท่อขึ้นได้

2. ในการวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง เราสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับค่าความเร็วเสียงในอากาศได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุด คือ 22.89% และค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด คือ 0.39% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากที่สุด คือ 2.88 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยที่สุดคือ 0.14

3. จากการวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน เกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุ ดังนี้

- (1) จากผู้ทำการทดลอง
- (2) จากอุปกรณ์การทดลอง
- (3) จากสภาพสิ่งแวดล้อม

4. จำนวนข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงต่างๆเมื่อเทียบกับค่าความเร็วเสียงในอากาศ

< 5%	>5% - <10%	>10%
12	9	11

5. จำนวนข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงต่างๆ เมื่อเทียบกับระยะที่ได้จากค่าทางทฤษฎี

<5%	>5% - <10%	>10%
38	14	12

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองอาจจะมีข้อผิดพลาดบางส่วนที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

5.2.1 ผู้ทดลอง อาจมีความผิดพลาดและไม่แม่นยำในการทดลองทำให้เกิดค่าความผิดพลาดได้

5.2.2 สภาพแวดล้อมในการทดลอง อาจมีความไม่เหมาะสมในการทดลองทำให้เกิดความไม่สะดวกในการทดลองได้

5.2.3 อุปกรณ์การทดลอง อาจติดตั้งผิดพลาดหรืออาจไม่มีความชำนาญในการทดลองหรือการใช้
อุปกรณ์การทดลองทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดลองได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกษริน เหนียวแก้ว. (2541). 10 MHz ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] เอกกราช ภัคดีชาติ. (2550). การศึกษาผลการแทรกสอดของระบบการสื่อสารแถบแคบที่มีต่อระบบ แถบกว้างขึ้น และเทคนิคการลดการแทรกสอด/เอกกราช ภัคดีชาติ. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] กำพล ทองเรือง. ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลส์. ปทุมธานี: บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด.
- [4] ทีมงานสมาร์ตเลิร์นนิ่ง. (2551). เรียนรู้การใช้งาน OrCAD:PSpice & PCB Design. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วน สามัญสมาร์ตเลิร์นนิ่ง.
- [5] ประกิต อ่องสร้อย. (2539, หน้า 306-308). เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ฉบับรวมวงจรทดลองจากมืออาชีพ.
- [6] อติชาติ บ้วนกียาพันธุ์ ผศ.. (2537, หน้า 102-117). คู่มือ-เตรียมสอบฟิสิกส์ ฉบับรวม ม. 4-5-6. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ภูมิบัณฑิต.
- [7] พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. (2553, หน้า 184-215). ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 1 เล่ม 2. กรุงเทพฯ: บริษัท ออฟเซิร์ทริเอชั่น จำกัด.
- [8] กฤตชัย จันทระจตุรงค์. ฟิสิกส์: เรื่องที่ 11 เสียงและการได้ยิน. นนทบุรี: สำนักพิมพ์ ธรรมบัณฑิต.
- [9] บรรจง พลจันทร์. วงจรพัลส์และดิจิตอล. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ จำกัด.
- [10] Copyright EXAR Corporation. 2008. Datasheet. สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2013 จาก https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206_104_020808.pdf.

- [11] สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2556 จาก <http://www.rhelectronics.net/store/diy-xr2206-function-generator-circuit-explane/>.
- [12] นายรุ่งโรจน์ หนูขลิป. เครื่องกำเนิดสัญญาณ. สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2013 จาก <http://edltv.vec.go.th/courses/32/10110050.pdf>
- [13] สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2014 จาก <http://computertechniques1.com/service>.

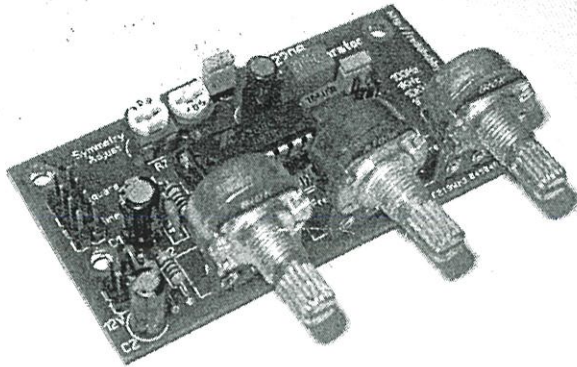
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

Function Generator (XR 2206)

DIY XR2206 Function Generator

DIY Function Generator 20Hz - 100KHz with XR2206 IC



<http://radiohobbystore.com>

In this short review we would like to introduce you schematic for our DIY Function Generator XR2206 Kit.

As you can see it contains only several components. XR2206 is very interesting chip manufactured by EXAR and it was designed to produce sine, triangle and square wave. The output frequency has 4 ranges and you can toggle the timing capacitor C4 - C7 with a jumper or rotary selector. R6 is the coarse control and R9 is the fine control of the frequency. R3 is the amplitude control. R10 is determines the minimum amplitude level. You can do some experiments with it value.

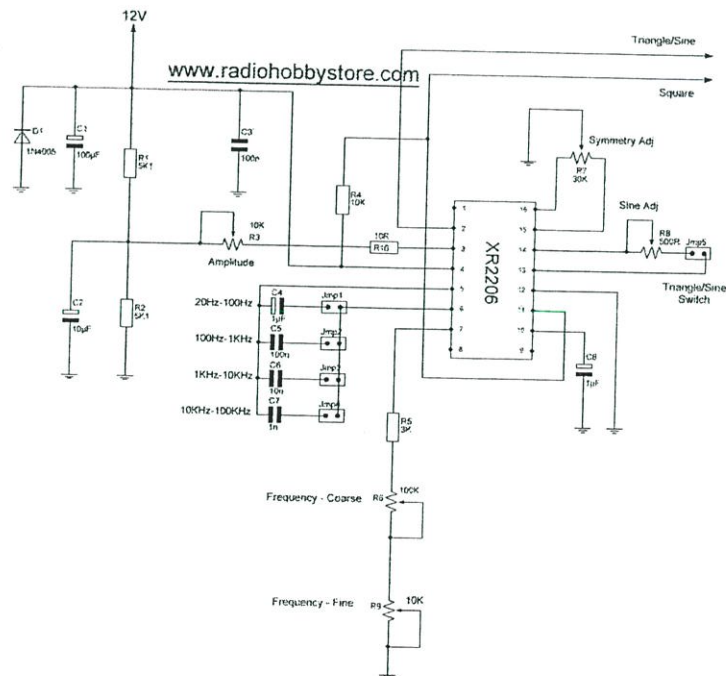
Actually the XR2206 IC can generate up to 1MHz, but to keep good control linearity we reduce the total frequency ranges of the kit to 20Hz - 100KHz. However you are free to experiment with R5, R6 values to increase the output frequency.

R1, R2 ratio control the frequency offset and we use in the kit 2 matched resistor. But you can use external rotary potentiometer 10K instead R1 and R2 to control the offset.

R7, R8 is the sine wave calibration trimmers. If you have scope you can calibrate the purity of the sine wave to 0.5% THD. In case you can't reach a oscilloscope, then trim R8 to 200 Ohm before power on and ignore R7 installation. Without calibration the XR2206 IC can produce sine waves with 2.5% THD.

Calibration should be made as follows:

1. Set the S/T jumper to close for the sine wave output.
2. Set frequency jumper to C5 100nF.
3. Connect 12V power supply and oscilloscope probe. Power up the device.
4. Set the amplitude to the maximum with R3.
5. Set the frequency to 1KHz with R6 and R9.
6. Use a screwdriver to trim R7 to the midpoint and adjust R8 for minimum distortion.
7. With R8 set as above, adjust R7 further reduce distortion.



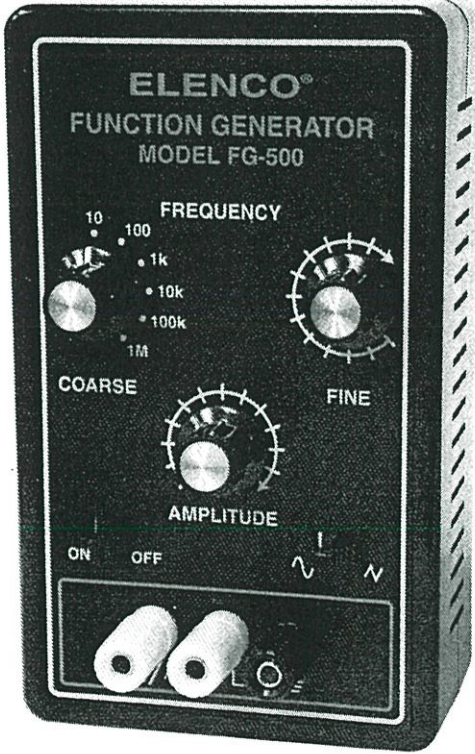
R4 is a pull-up resistor to square wave open collector out. The square wave output frequency is also controlled by R6, R9. But R3 has no effect on the amplitude of the square wave.

The XR2206 has 20ppm/C temperature stability. However we supply high quality timing capacitors C4 - C7 for frequency ranges to reduce temperature drifts.

The kit is very simple to solder if you follow our PDF manual. For short demonstration video and full technical specification of the kit please follow the link: [DIY XR2206 Function Generator Kit](#)
[XR2206 Project Box](#)

Function Generator

MODEL FG-500



Instruction Manual

ELENCO®

SPECIFICATIONS

OUTPUT:

- **Waveforms:** Sine, triangle, square
- **Impedance:** $600\Omega \pm 10\%$
- **Frequency:** 1Hz - 1MHz in 6 decade steps with variable ranges.

SINE WAVE:

- **Amplitude:** 0 - 3Vpp
- **Distortion:** Less than 1% (at 1kHz)
- **Flatness:** $\pm 0.05\text{dB}$ 1Hz - 100kHz

SQUARE WAVE:

- **Amplitude:** 8V (no load)
- **Rise Time:** Less than 50ns (at 1kHz)
- **Fall Time:** Less than 30ns (at 1kHz)
- **Symmetry:** Less than 5% (at 1kHz)

TRIANGLE WAVE:

- **Amplitude:** 0 - 3Vpp
- **Linearity:** Less than 1% (up to 100kHz)

POWER REQUIREMENTS:

- Standard 9V battery

OPERATING TEMPERATURE:

- 32°F (0°C) to 122°F (50°C)

INTRODUCTION

Your FG-500 Function Generator contains a complete function generator capable of producing sine, square and triangle wave forms. The frequency of this generator can be continuously varied from 1Hz to 1MHz in 6 steps. A fine frequency control makes selection of any frequency in between easy. The amplitude of the sine and triangle waveforms are adjustable from 0 to 3Vpp. This complete function generator system is suitable for experimentation and applications by the student. The entire function generator is comprised of a single XR-2206 monolithic IC and a limited number of passive circuit components. The unit is powered with a 9V battery.

THEORY OF OPERATION

The heart of the FG-500 Function Generator is the XR-2206 monolithic function generator integrated circuit. The XR-2206 is comprised of four main functional blocks as shown in the functional block diagram (Figure 1). They are:

- A Voltage Controlled Oscillator (VCO)
- An Analog Multiplier and Sine-shaper
- Unity Gain Buffer Amplifier
- A set of current switches

The VCO actually produces an output frequency proportional to an input current, which is produced by a resistor from the timing terminals to ground. The current switches route one of the currents to the VCO to produce an output frequency. Which timing pin current is used, is controlled by the FSK input (pin 9). In the FG-500, the FSK input is left open, thus only the resistor on pin 7 is used. The frequency is determined by this formula:

$$f_o = 1/RC \text{ Hz}$$

where f_o is the frequency in Hertz
 R is the resistance at pin 7 in Ohms
 C is the capacitance across pin 5 and 6 in Farads

Note that frequency is inversely proportional to the value of RC. That is, the higher the value of RC, the smaller the frequency.

The resistance between pins 13 and 14 determine the shape of the output wave on pin 2. No resistor produces a triangle wave. A 200Ω resistor produces a sine wave.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

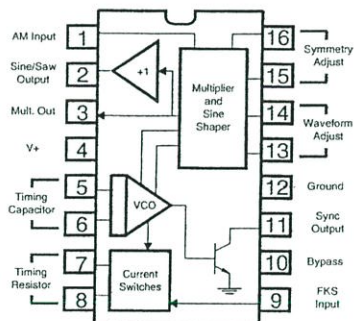


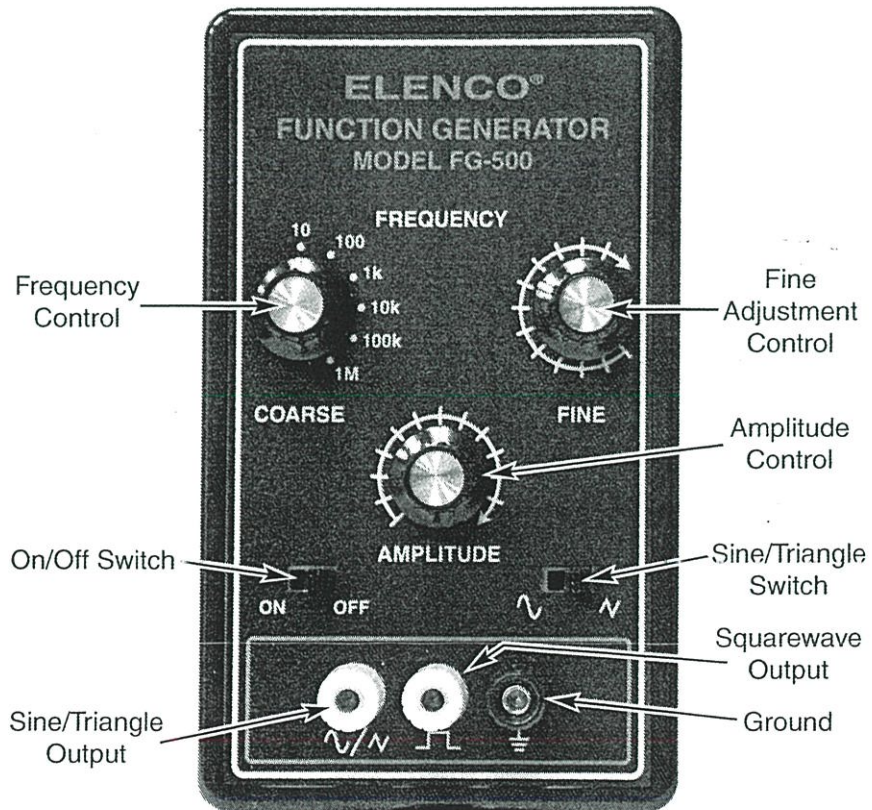
Figure 1

FUNCTIONAL DESCRIPTION

The FG-500 is a function generator integrated circuit capable of producing high quality sine, triangle, and square waves of high stability and accuracy. A picture of each waveform is shown below:



CONTROL PANEL FUNCTIONS



CONTROLS

RANGE SWITCHES

Six ranges of frequency are provided by the range switch as shown in Table 1.

POSITION	TYPICAL FREQUENCY RANGE
1	1Hz - 15Hz
2	10Hz - 150Hz
3	100Hz - 1.5kHz
4	1kHz - 15kHz
5	10kHz - 150kHz
6	100kHz - 1MHz

Table 1

SINE/TRIANGLE SWITCH

This SINE/TRIANGLE Switch selects the waveform, sine wave or triangle wave, sent to the SINE/TRIANGLE output terminal.

FREQUENCY MULTIPLIER

The multiplier is a variable control allowing frequency settings between fixed ranges. The ranges are as shown in Table 1.

AMPLITUDE CONTROL

The Amplitude Control provides amplitude adjustment from near 0 to 3V or greater for both sine and triangle waveforms.

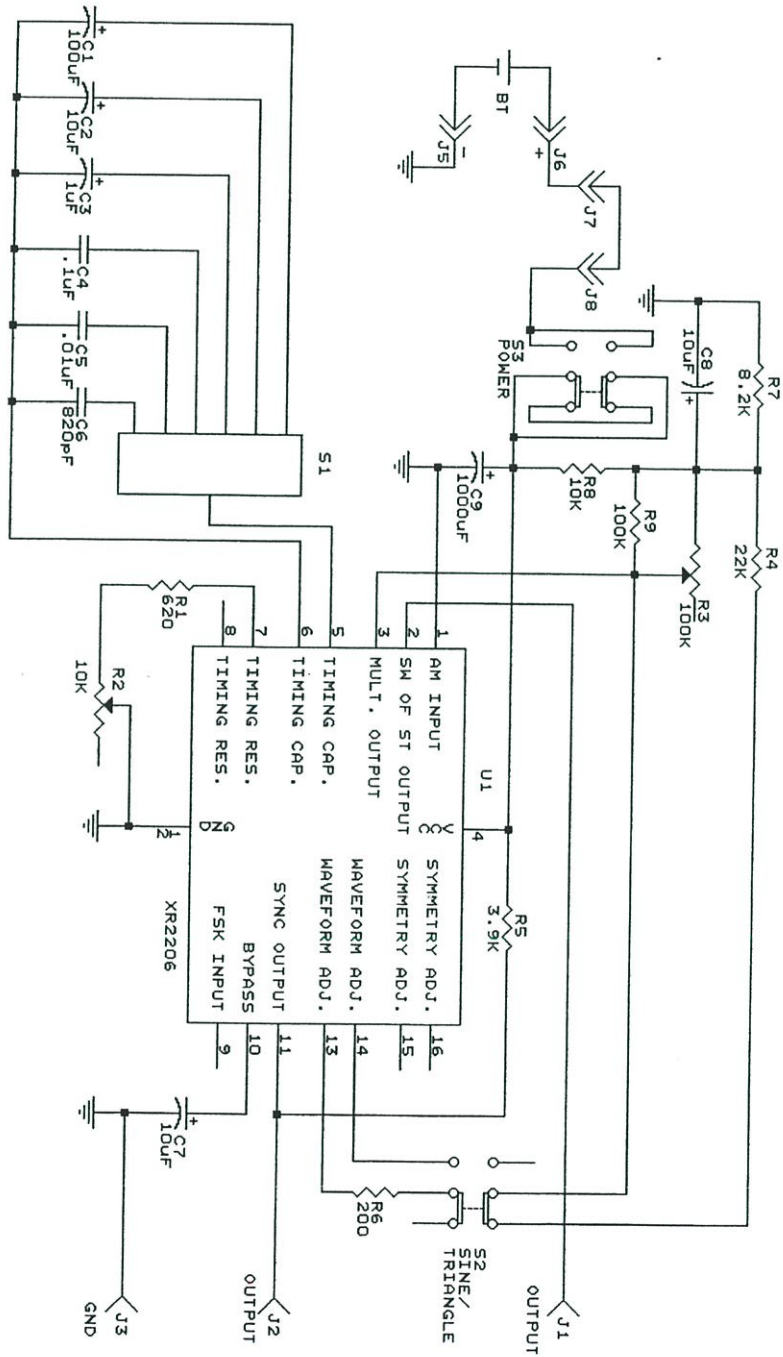
ON/OFF SWITCH

The ON/OFF Switch turns the power to the FG-500 on or off.

OUTPUT TERMINAL

The output marked SINE/TRIANGLE provides the sine and triangle waveforms. The output marked SQUARE WAVE provides the square wave. The output marked GND provides the ground for all output waveforms.

SCHEMATIC DIAGRAM



EIModule

XR2206 Functional Generator kit

1. General

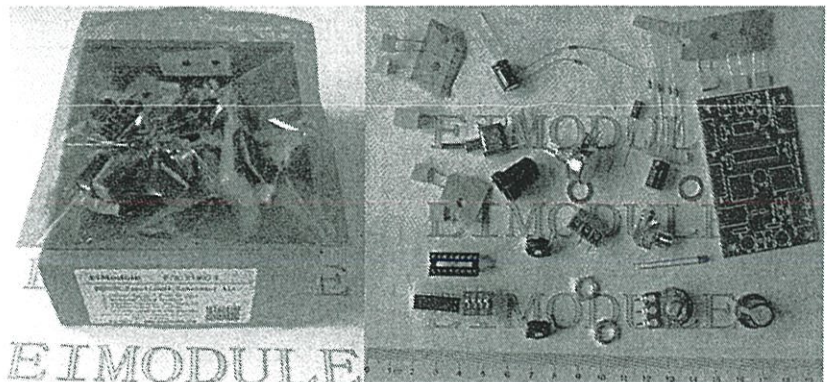
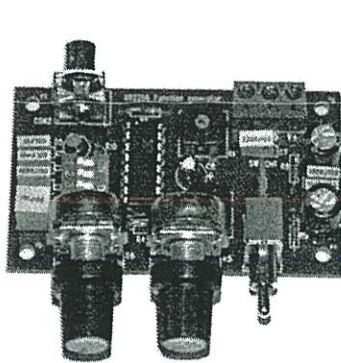
The module described here is based on high quality the industry standard integrated circuit XR2206. This XR2206 Function Generator is capable of producing high quality sine and triangle waveforms of high-stability and accuracy in the range about 1Hz to 700KHz. Frequency adjustment range is accomplished using 4-DIP switch.

- The sine wave and triangle wave can be selected by SWITCH1
SWITCH1: Open for Triangle
 Closed for Sine wave

- Amplitude and frequency is controlled by two potentiometers.
Potentiometers R5 and R6 are used for Amplitude adjustment and Frequency adjustment.
 - R5: Amplitude Adjustment
 - R6: Frequency Adjustment

- Output Offset and distortion of the sine wave can be adjusted to a minimum using small trimmer potentiometers
 - Trimmer Potentiometers R7 is used for Offset Adjustment of output waveform
 - Trimmer Potentiometers R1 is used for THD (Total Harmonic Distortion) Adjustment. When calibrated properly, this circuit can provide Sine Signals with less than 0.5% THD

Note: R1 only takes effect for Sine wave output.



EIModule

2. Specification

- Voltage Supply: 7.5V-16V DC Input. 7.5V- 12V DC input is recommended. A virtual floating ground (at 1/2 operating voltage) is generated by this circuit!
Note: Please DO NOT connect the power supply ground to the virtual floating ground.
- Waveforms: Sine & Triangle
- Output Impedance: $600\Omega + 10\%$
- Frequency output: 1Hz – 700KHz in 4 steps ranges with fine adjustment

Sine Wave

- ✓ Max. Output Swing (V_{pp}): 6V
- ✓ Sine Wave Amplitude: 60 mV/k Ω
- ✓ Distortion:
 - less than 0.5% THD when calibrated properly
 - 2.5% without Adjustment

Triangle Wave:

- ✓ Max. Output Swing (V_{pp}): 6V
- ✓ Triangle Wave Amplitude: 160 mV/k Ω
- ✓ Linearity: Less than 1%

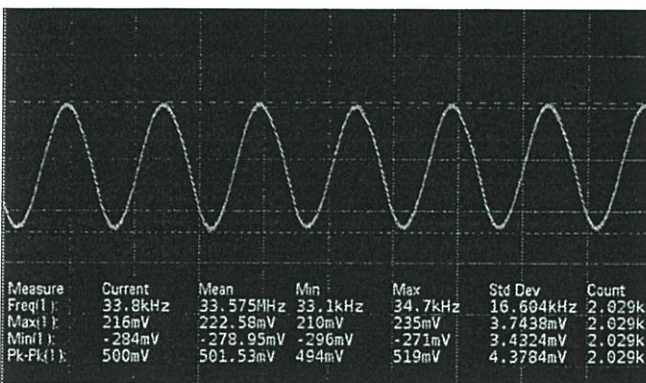
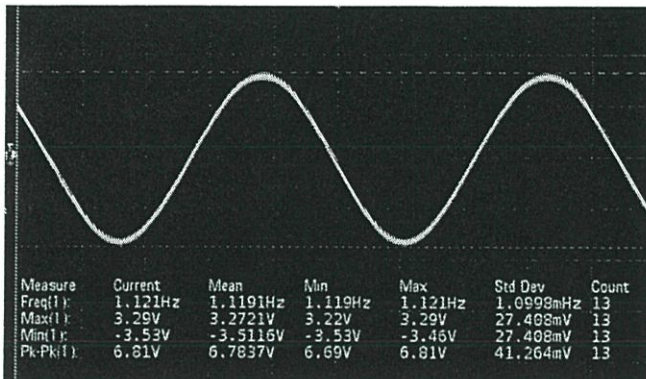
Amplitude Stability: less than 0.5dB

NOTE: In order to get good output waveform for very low frequency output, 7.5V – 10V DC power supply is recommended. If the input power supply is high than 12V DC, the output waveform will be deformed.

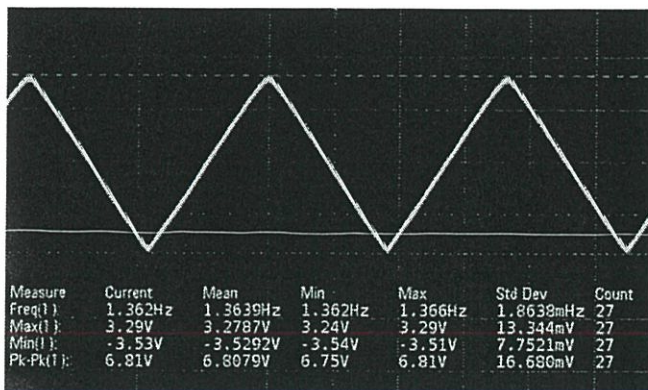
EIModule

3. XR2206 Output waveform

SINE Wave output @min/max frequency



Triangle Wave output @min/max frequency



EIModule

5. Component List

Item	Reference	Part Description
1	U3	IC, XR-2206 DIP
2	C1	CAP, 1nF
3	C2	CAP, 10nF
4	C3,C5,C6	CAP 100nF
5	C7	CAP 220nF
6	C4	CAP 1uF
7	C9,C10	CAP, 220uF
8	C8	CAP, 10uF
9	R2	RES, 470R,DIP, 1/8W
10	R3,R8,R9,R10	RES, 1K,DIP, 1/8W
11	R4	RES,100K,DIP, 1/8W
12	R1	Trimmer,1K
13	R7	Trimmer,500K
14	R5	Potentiometer,50K
15	R6	Potentiometer,1M
16	DIP1	4-DIP switch.
17	CON1	Connector for power supply
18	CON2	Connector for Signal output
19	SWITCH1	SWITCH

FEATURES

- Low-Sine Wave Distortion, 0.5%, Typical
- Excellent Temperature Stability, 20ppm/°C, Typ.
- Wide Sweep Range, 2000:1, Typical
- Low-Supply Sensitivity, 0.01%V, Typ.
- Linear Amplitude Modulation
- TTL Compatible FSK Controls
- Wide Supply Range, 10V to 26V
- Adjustable Duty Cycle, 1% TO 99%

APPLICATIONS

- Waveform Generation
- Sweep Generation
- AM/FM Generation
- V/F Conversion
- FSK Generation
- Phase-Locked Loops (VCO)

GENERAL DESCRIPTION

The XR-2206 is a monolithic function generator integrated circuit capable of producing high quality sine, square, triangle, ramp, and pulse waveforms of high-stability and accuracy. The output waveforms can be both amplitude and frequency modulated by an external voltage. Frequency of operation can be selected externally over a range of 0.01Hz to more than 1MHz.

The circuit is ideally suited for communications, instrumentation, and function generator applications requiring sinusoidal tone, AM, FM, or FSK generation. It has a typical drift specification of 20ppm/°C. The oscillator frequency can be linearly swept over a 2000:1 frequency range with an external control voltage, while maintaining low distortion.

ORDERING INFORMATION

Part No.	Package	Operating Temperature Range
XR-2206P	16 Lead 300 Mil PDIP	-40°C to +85°C
XR-2206CP	16 Lead 300 Mil PDIP	0°C to +70°C
XR-2206D	16 Lead 300 Mil JEDEC SOIC	0°C to +70°C

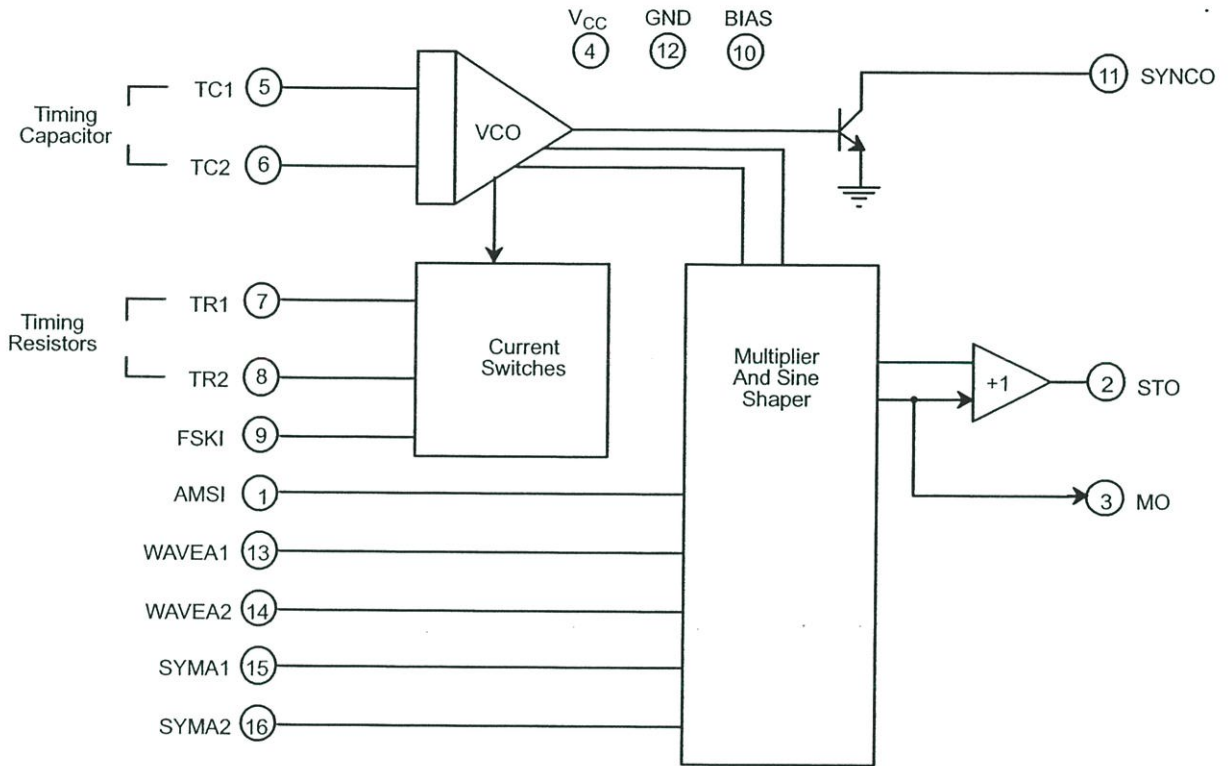
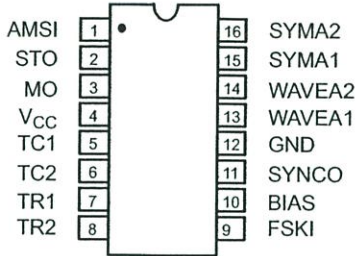
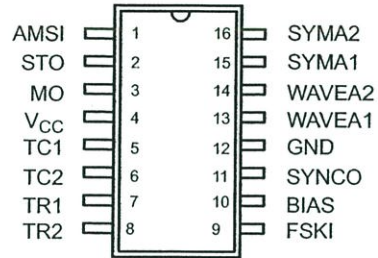


Figure 1. XR-2206 Block Diagram



16 Lead PDIP, CDIP (0.300'')



16 Lead SOIC (Jedec, 0.300'')

PIN DESCRIPTION

Pin #	Symbol	Type	Description
1	AMSI	I	Amplitude Modulating Signal Input.
2	STO	O	Sine or Triangle Wave Output.
3	MO	O	Multiplier Output.
4	V _{CC}		Positive Power Supply.
5	TC1	I	Timing Capacitor Input.
6	TC2	I	Timing Capacitor Input.
7	TR1	O	Timing Resistor 1 Output.
8	TR2	O	Timing Resistor 2 Output.
9	FSKI	I	Frequency Shift Keying Input.
10	BIAS	O	Internal Voltage Reference.
11	SYNCO	O	Sync Output. This output is a open collector and needs a pull up resistor to V _{CC} .
12	GND		Ground pin.
13	WAVEA1	I	Wave Form Adjust Input 1.
14	WAVEA2	I	Wave Form Adjust Input 2.
15	SYMA1	I	Wave Symetry Adjust 1.
16	SYMA2	I	Wave Symetry Adjust 2.

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Test Conditions: Test Circuit of *Figure 2* $V_{CC} = 12V$, $T_A = 25^\circ C$, $C = 0.01\mu F$, $R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$, $R_3 = 25k\Omega$
 Unless Otherwise Specified. S_1 open for triangle, closed for sine wave.

Parameters	XR-2206P			XR-2206CP/D			Units	Conditions
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
General Characteristics								
Single Supply Voltage	10		26	10		26	V	
Split-Supply Voltage	± 5		± 13	± 5		± 13	V	
Supply Current		12	17		14	20	mA	$R_1 \geq 10k\Omega$
Oscillator Section								
Max. Operating Frequency	0.5	1		0.5	1		MHz	$C = 1000pF$, $R_1 = 1k\Omega$
Lowest Practical Frequency		0.01			0.01		Hz	$C = 50\mu F$, $R_1 = 2M\Omega$
Frequency Accuracy		± 1	± 4		± 2		% of f_o	$f_o = 1/R_1C$
Temperature Stability Frequency		± 10	± 50		± 20		ppm/ $^\circ C$	$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ $R_1 = R_2 = 20k\Omega$
Sine Wave Amplitude Stability ²		4800			4800		ppm/ $^\circ C$	
Supply Sensitivity		0.01	0.1		0.01		%/V	$V_{LOW} = 10V$, $V_{HIGH} = 20V$, $R_1 = R_2 = 20k\Omega$
Sweep Range	1000:1	2000:1			2000:1		$f_H = f_L$	$f_H @ R_1 = 1k\Omega$ $f_L @ R_1 = 2M\Omega$
Sweep Linearity								
10:1 Sweep		2			2		%	$f_L = 1kHz$, $f_H = 10kHz$
1000:1 Sweep		8			8		%	$f_L = 100Hz$, $f_H = 100kHz$
FM Distortion		0.1			0.1		%	$\pm 10\%$ Deviation
Recommended Timing Components								
Timing Capacitor: C	0.001		100	0.001		100	μF	<i>Figure 5</i>
Timing Resistors: R_1 & R_2	1		2000	1		2000	k Ω	
Triangle Sine Wave Output¹								
<i>Figure 3</i>								
Triangle Amplitude		160			160		mV/k Ω	<i>Figure 2</i> , S_1 Open
Sine Wave Amplitude	40	60	80		60		mV/k Ω	<i>Figure 2</i> , S_1 Closed
Max. Output Swing		6			6		Vp-p	
Output Impedance		600			600		Ω	
Triangle Linearity		1			1		%	
Amplitude Stability		0.5			0.5		dB	For 1000:1 Sweep
Sine Wave Distortion								
Without Adjustment		2.5			2.5		%	$R_1 = 30k\Omega$
With Adjustment		0.4	1.0		0.5	1.5	%	See <i>Figure 7</i> and <i>Figure 8</i>

Notes

¹ Output amplitude is directly proportional to the resistance, R_3 , on Pin 3. See *Figure 3*.

² For maximum amplitude stability, R_3 should be a positive temperature coefficient resistor.

Bold face parameters are covered by production test and guaranteed over operating temperature range.

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (CONT'D)

Parameters	XR-2206P			XR-2206CP/D			Units	Conditions
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
Amplitude Modulation								
Input Impedance	50	100		50	100		k Ω	For 95% modulation
Modulation Range		100			100		%	
Carrier Suppression		55			55		dB	
Linearity		2			2		%	
Square-Wave Output								
Amplitude		12			12		V _{p-p}	Measured at Pin 11.
Rise Time		250			250		ns	C _L = 10pF
Fall Time		50			50		ns	C _L = 10pF
Saturation Voltage		0.2	0.4		0.2	0.6	V	I _L = 2mA
Leakage Current		0.1	20		0.1	100	μ A	V _{CC} = 26V
FSK Keying Level (Pin 9)	0.8	1.4	2.4	0.8	1.4	2.4	V	See section on circuit controls
Reference Bypass Voltage	2.9	3.1	3.3	2.5	3	3.5	V	Measured at Pin 10.

Notes

¹ Output amplitude is directly proportional to the resistance, R₃, on Pin 3. See Figure 3.

² For maximum amplitude stability, R₃ should be a positive temperature coefficient resistor.

Bold face parameters are covered by production test and guaranteed over operating temperature range.

Specifications are subject to change without notice

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Power Supply 26V
 Power Dissipation 750mW
 Derate Above 25°C 5mW/°C

Total Timing Current 6mA
 Storage Temperature -65°C to +150°C

SYSTEM DESCRIPTION

The XR-2206 is comprised of four functional blocks; a voltage-controlled oscillator (VCO), an analog multiplier and sine-shaper; a unity gain buffer amplifier; and a set of current switches.

The VCO produces an output frequency proportional to an input current, which is set by a resistor from the timing

terminals to ground. With two timing pins, two discrete output frequencies can be independently produced for FSK generation applications by using the FSK input control pin. This input controls the current switches which select one of the timing resistor currents, and routes it to the VCO.

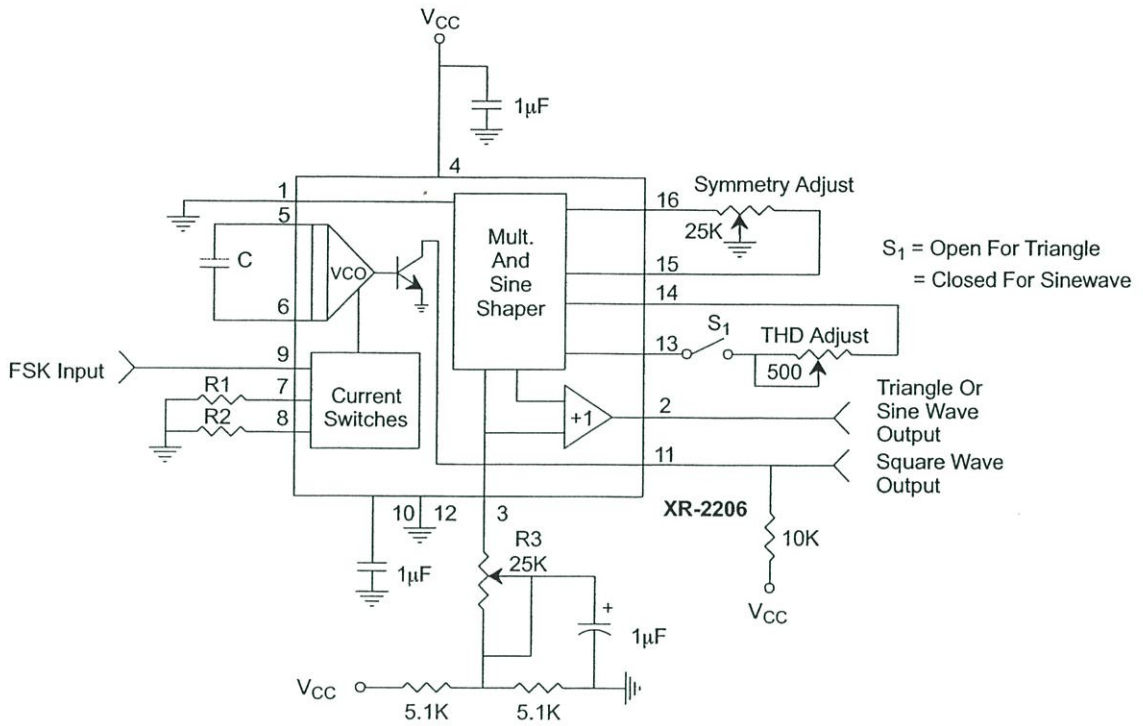


Figure 2. Basic Test Circuit

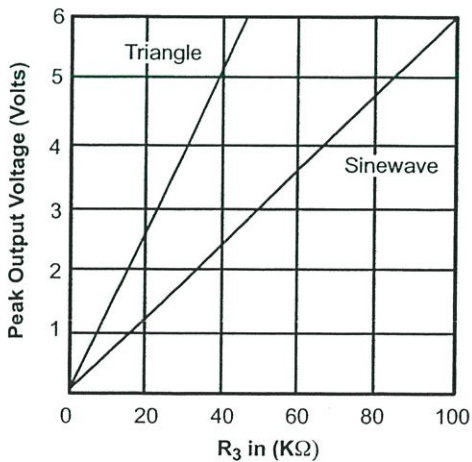


Figure 3. Output Amplitude as a Function of the Resistor, R₃, at Pin 3

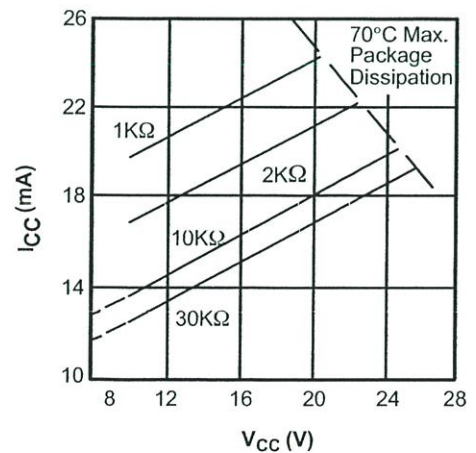


Figure 4. Supply Current vs Supply Voltage, Timing, R

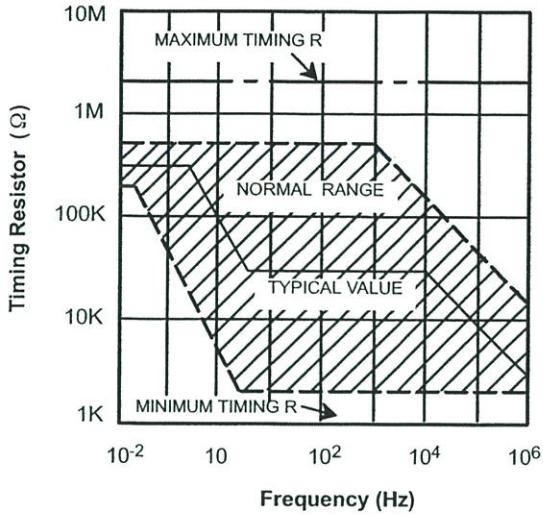


Figure 5. R versus Oscillation Frequency.

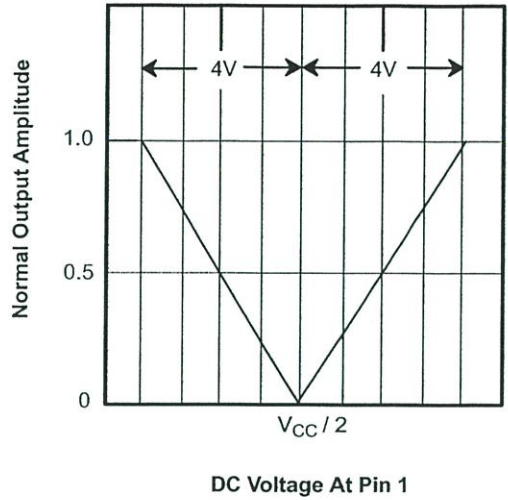


Figure 6. Normalized Output Amplitude versus DC Bias at AM Input (Pin 1)

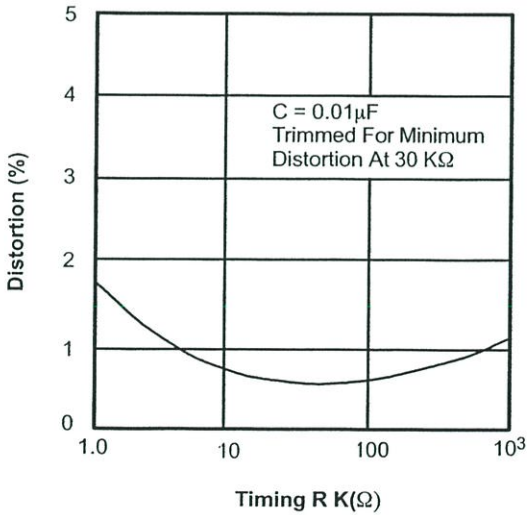


Figure 7. Trimmed Distortion versus Timing Resistor.

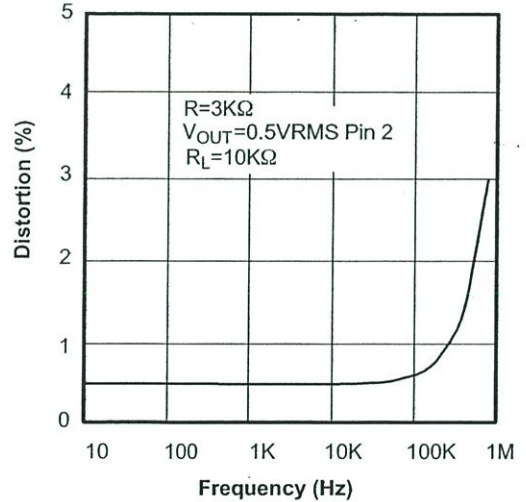


Figure 8. Sine Wave Distortion versus Operating Frequency with Timing Capacitors Varied.

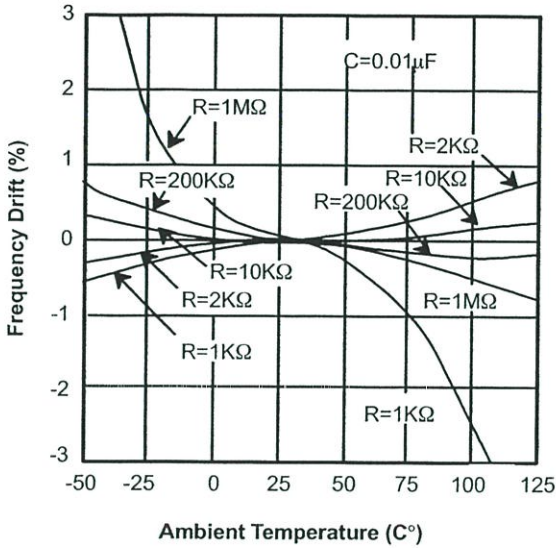


Figure 9. Frequency Drift versus Temperature.

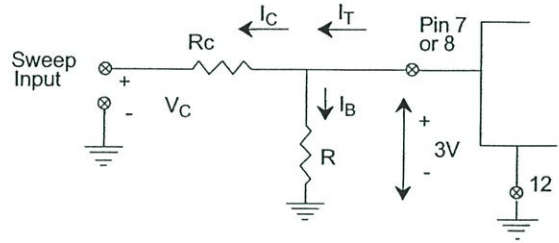


Figure 10. Circuit Connection for Frequency Sweep.

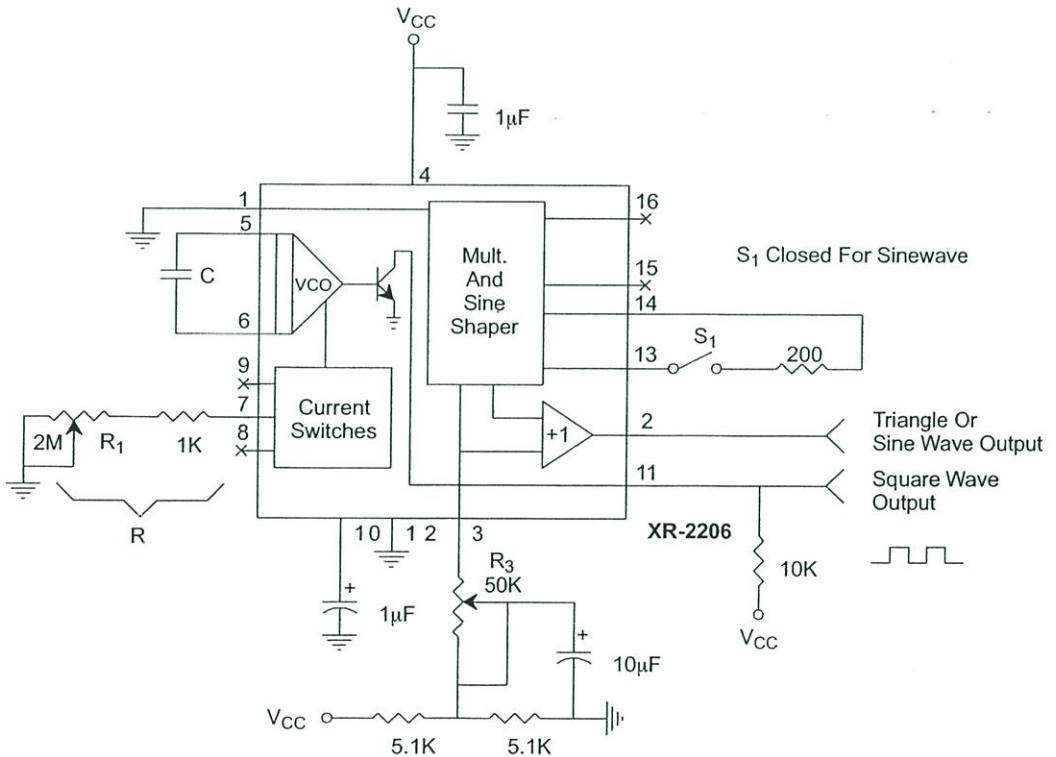


Figure 11. Circuit for Sine Wave Generation without External Adjustment.
(See Figure 3 for Choice of R₃)

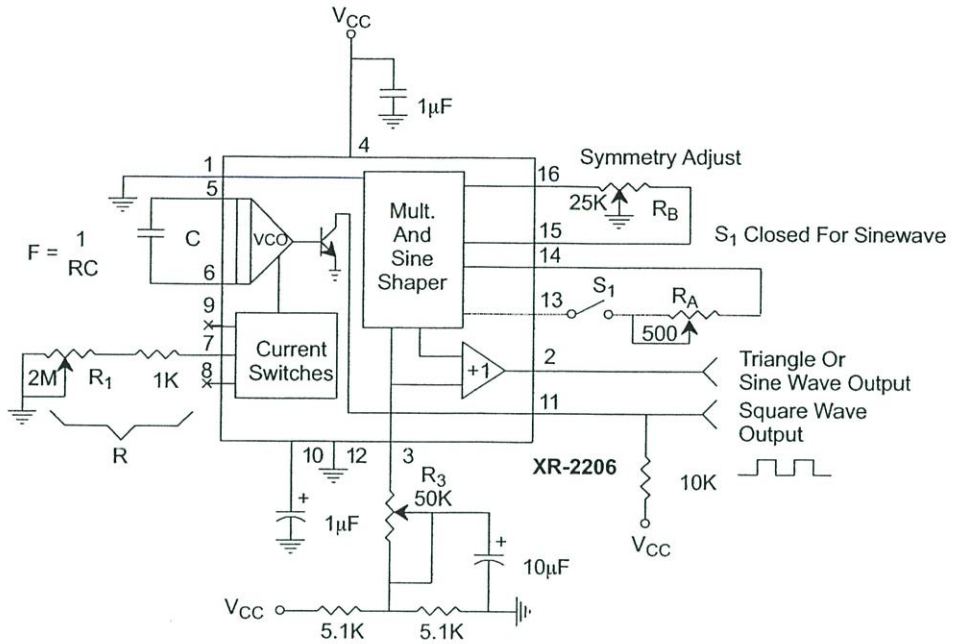


Figure 12. Circuit for Sine Wave Generation with Minimum Harmonic Distortion. (R₃ Determines Output Swing - See Figure 3)

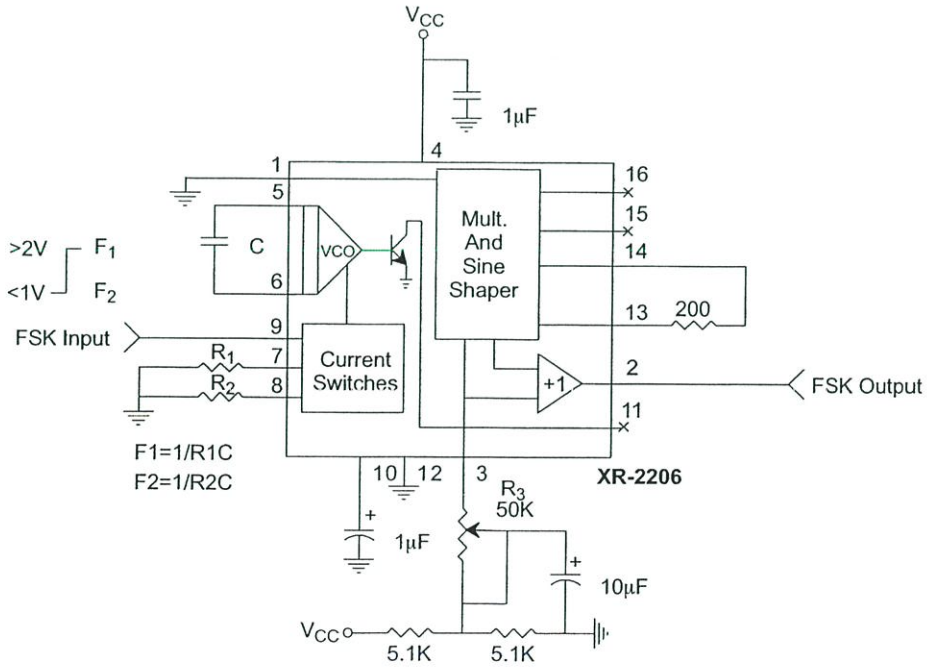


Figure 13. Sinusoidal FSK Generator

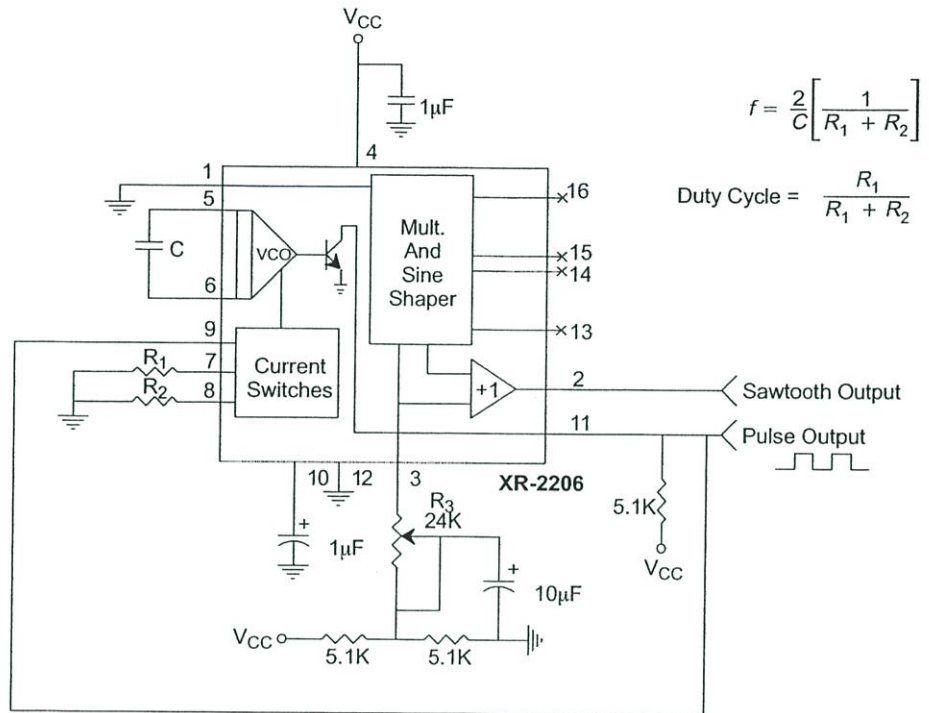


Figure 14. Circuit for Pulse and Ramp Generation.

Frequency-Shift Keying

The XR-2206 can be operated with two separate timing resistors, R_1 and R_2 , connected to the timing Pin 7 and 8, respectively, as shown in *Figure 13*. Depending on the polarity of the logic signal at Pin 9, either one or the other of these timing resistors is activated. If Pin 9 is open-circuited or connected to a bias voltage $\geq 2V$, only R_1 is activated. Similarly, if the voltage level at Pin 9 is $\leq 1V$, only R_2 is activated. Thus, the output frequency can be keyed between two levels, f_1 and f_2 , as:

$$f_1 = 1/R_1C \text{ and } f_2 = 1/R_2C$$

For split-supply operation, the keying voltage at Pin 9 is referenced to V^- .

Output DC Level Control

The dc level at the output (Pin 2) is approximately the same as the dc bias at Pin 3. In *Figure 11*, *Figure 12* and *Figure 13*, Pin 3 is biased midway between V^+ and ground, to give an output dc level of $\approx V^+/2$.

APPLICATIONS INFORMATION

Sine Wave Generation

Without External Adjustment

Figure 11 shows the circuit connection for generating a sinusoidal output from the XR-2206. The potentiometer, R_1 at Pin 7, provides the desired frequency tuning. The maximum output swing is greater than $V^+/2$, and the typical distortion (THD) is $< 2.5\%$. If lower sine wave distortion is desired, additional adjustments can be provided as described in the following section.

The circuit of *Figure 11* can be converted to split-supply operation, simply by replacing all ground connections with V^- . For split-supply operation, R_3 can be directly connected to ground.

With External Adjustment:

The harmonic content of sinusoidal output can be reduced to -0.5% by additional adjustments as shown in *Figure 12*. The potentiometer, R_A , adjusts the sine-shaping resistor, and R_B provides the fine adjustment for the waveform symmetry. The adjustment procedure is as follows:

1. Set R_B at midpoint and adjust R_A for minimum distortion.
2. With R_A set as above, adjust R_B to further reduce distortion.

Triangle Wave Generation

The circuits of *Figure 11* and *Figure 12* can be converted to triangle wave generation, by simply open-circuiting Pin 13 and 14 (i.e., S_1 open). Amplitude of the triangle is approximately twice the sine wave output.

FSK Generation

Figure 13 shows the circuit connection for sinusoidal FSK signal operation. Mark and space frequencies can be independently adjusted by the choice of timing resistors, R_1 and R_2 ; the output is phase-continuous during transitions. The keying signal is applied to Pin 9. The circuit can be converted to split-supply operation by simply replacing ground with V^- .

Pulse and Ramp Generation

Figure 14 shows the circuit for pulse and ramp waveform generation. In this mode of operation, the FSK keying terminal (Pin 9) is shorted to the square-wave output (Pin 11), and the circuit automatically frequency-shift keys itself between two separate frequencies during the positive-going and negative-going output waveforms. The pulse width and duty cycle can be adjusted from 1% to 99% by the choice of R_1 and R_2 . The values of R_1 and R_2 should be in the range of $1k\Omega$ to $2M\Omega$.

PRINCIPLES OF OPERATION

Description of Controls

Frequency of Operation:

The frequency of oscillation, f_o , is determined by the external timing capacitor, C , across Pin 5 and 6, and by the timing resistor, R , connected to either Pin 7 or 8. The frequency is given as:

$$f_o = \frac{1}{RC} \text{ Hz}$$

and can be adjusted by varying either R or C . The recommended values of R , for a given frequency range, as shown in *Figure 5*. Temperature stability is optimum for $4k\Omega < R < 200k\Omega$. Recommended values of C are from $1000pF$ to $100\mu F$.

Frequency Sweep and Modulation:

Frequency of oscillation is proportional to the total timing current, I_T , drawn from Pin 7 or 8:

$$f = \frac{320I_T(mA)}{C(\mu F)} \text{ Hz}$$

Timing terminals (Pin 7 or 8) are low-impedance points, and are internally biased at +3V, with respect to Pin 12. Frequency varies linearly with I_T , over a wide range of current values, from $1\mu A$ to $3mA$. The frequency can be controlled by applying a control voltage, V_C , to the activated timing pin as shown in *Figure 10*. The frequency of oscillation is related to V_C as:

$$f = \frac{1}{RC} \left(1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{V_C}{3} \right) \right) \text{ Hz}$$

where V_C is in volts. The voltage-to-frequency conversion gain, K , is given as:

$$K = \partial f / \partial V_C = - \frac{0.32}{R_c C} \text{ Hz/V}$$

CAUTION: For safety operation of the circuit, I_T should be limited to $\leq 3mA$.

Output Amplitude:

Maximum output amplitude is inversely proportional to the external resistor, R_3 , connected to Pin 3 (see Figure 3). For sine wave output, amplitude is approximately 60mV peak per $k\Omega$ of R_3 ; for triangle, the peak amplitude is approximately 160mV peak per $k\Omega$ of R_3 . Thus, for example, $R_3 = 50k\Omega$ would produce approximately 13V sinusoidal output amplitude.

Amplitude Modulation:

Output amplitude can be modulated by applying a dc bias and a modulating signal to Pin 1. The internal impedance

at Pin 1 is approximately 100k Ω . Output amplitude varies linearly with the applied voltage at Pin 1, for values of dc bias at this pin, within 14 volts of $V_{CC}/2$ as shown in Figure 6. As this bias level approaches $V_{CC}/2$, the phase of the output signal is reversed, and the amplitude goes through zero. This property is suitable for phase-shift keying and suppressed-carrier AM generation. Total dynamic range of amplitude modulation is approximately 55dB.

CAUTION: AM control must be used in conjunction with a well-regulated supply, since the output amplitude now becomes a function of V_{CC} .

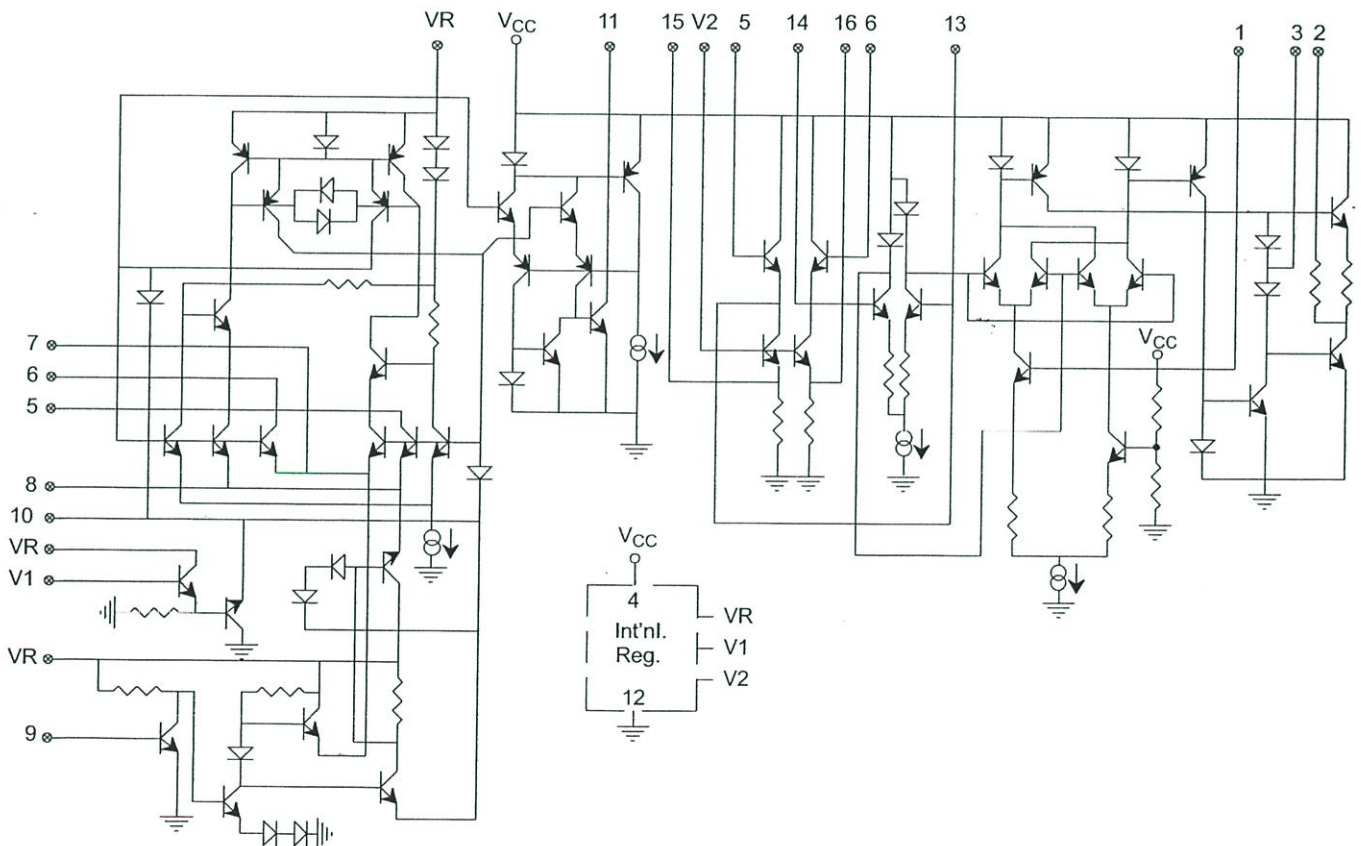


Figure 15. Equivalent Schematic Diagram