

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างสัญญาณเสียงดนตรีด้วยสัญญาณอลวน

GENERATE THAI MUSIC SOUND BY CHAOS



T119536

สิริवाद อัครวงษ์

SIRIWARD AKARAWONG

สุชาดา สุนทรชื่น

SUCHADA SUNTRONCHEUN

สุวิมล จันทร์สุวรรณ

SUWIMON JANSUWAN

2/11/53

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**119536**
วัน,เดือน,ปี.....**- 8 S.A. 2554**

b. 119536/001
i.

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GENERATE THAI MUSIC SOUND BY CHAOS



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาบัตร	การสร้างสัญญาณเสียงดนตรีด้วยสัญญาณออลวน	
รายชื่อนักศึกษา	นางสาวสิริวาด อัครวงษ์	รหัสนักศึกษา 50011689
	นางสาวสุชาดา สุนทรชื่น	รหัสนักศึกษา 50011705
	นางสาวสุวิมล จันทร์สุวรรณ	รหัสนักศึกษา 50011783
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
พ.ศ.	2553	
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร	ผศ. กฤดากร กล่อมการ	

ปริญญาบัตรฉบับนี้ ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การสร้างสัญญาณดนตรีด้วยสัญญาณอลวน	
รายชื่อนักศึกษา	นางสาวสิริวาด อัครวงษ์	รหัสนักศึกษา 50011689
	นางสาวสุชาดา สุนทรชื่น	รหัสนักศึกษา 50011705
	นางสาวสุวิมล จันทร์สุวรรณ	รหัสนักศึกษา 50011783
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
พ.ศ.	2553	
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ผศ. กฤดากร กล่อมการ	

บทคัดย่อ

โครงการนี้จัดทำเกี่ยวกับการสร้างสัญญาณเสียงดนตรีโดยใช้สัญญาณอลวน เพื่อวิเคราะห์และนำสัญญาณเสียงที่ได้ไปประยุกต์ใช้ต่อไป กระบวนการในการสร้างสัญญาณใช้ ทฤษฎีอลวนทำการสร้างวงจรถอดลอกซึ่งมีส่วนประกอบของตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ขดลวด เหนียวนำ, ตัวต้านทานเชิงเส้น, และตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีคุณสมบัติในการขยายสัญญาณ สามารถปรับค่าได้หลากหลาย จากนั้นนำสัญญาณเสียงที่ได้จากวงจรมาทำการเทียบเคียงกับโน้ตเสียงของเสียงดนตรีไทย (ขลุ่ย) ทำให้ได้เสียงดนตรีที่เกิดจากวงจรถอดลอก

Thesis Title	Generate Thai Music Sound by Chaos
Student	Miss. Siriward Arkarawong Student ID. 50011689 Miss. Suchada Suntorncheun Student ID. 50011705 Miss. Suwimon Jansuwan Student ID. 50011783
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assist. Prof. Klidakorn Klomkran

ABSTRACT

This project is about the creation of music using Chaos to analyze and introduce the future application of this sound signal. The process of creating a signal is by applying Chaos theory to generate analog circuit which is composed of two capacitors, an inductor, a linear resistor, and a nonlinear resistor. This nonlinear resistor has the ability to broaden signals and is adjustable in different volumes. Subsequently, the sound signals that have been generated are tuned with musical notes, Thai Flute, a Thai traditional string instrument, which finally creates chaotic circuit-generated music.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านต่างๆ ทั้งคำปรึกษา ทางด้านวิชาการ และคำแนะนำในการปฏิบัติงาน รวมถึงความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือ และ อุปกรณ์ต่างๆ จากที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤตดากร กล่อมการ จนกระทั่งสำเร็จเป็นปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ ที่คอยห่วงใย และให้การสนับสนุนด้านการศึกษามาเป็นอย่างดีโดยตลอด รวมทั้งขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำ ทางด้านวิชาการ และการดำเนินงานในหลายๆด้าน

คุณประโยชน์ที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นางสาวสิริวาด อัครวงษ์
นางสาวสุชาดา สุนทรจีน
นางสาวสุวิมล จันทร์สุวรรณ
คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตโครงการ.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีเสียง.....	4
2.1.1 การเกิดเสียง.....	4
2.1.2 การได้ยินเสียง.....	5
2.1.3 ส่วนประกอบของคลื่นเสียง.....	5
2.1.4 คุณสมบัติของคลื่นเสียง.....	6
2.1.5 อัตราเร็วเสียง.....	6
2.1.6 คุณลักษณะของเสียง.....	7
2.2 ทฤษฎีเสียงดนตรีไทย.....	8
2.2.1 องค์ประกอบของเสียงดนตรี.....	8
2.2.2 การแบ่งระดับเสียงดนตรีไทย.....	11
2.2.3 องค์ประกอบของเพลงไทย.....	13
2.3 เครื่องดนตรีไทย (ขลุ่ย).....	14
2.3.1 ประเภทของเครื่องดนตรีไทย.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 ประวัติของขลุ่ย.....	15
2.3.3 การเกิดเสียงขลุ่ย.....	17
2.4 ทฤษฎีโกลวน (Chaos Theory).....	17
2.4.1 คุณลักษณะของระบบที่เป็นแบบโกลวน.....	17
2.4.2 ประโยชน์ของการศึกษาทฤษฎีโกลวน.....	19
2.5 วงจร Chua (Chua's Circuit).....	21
2.6 ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance Simulation).....	25
2.7 ออปแอมป์ (Op-Amp).....	27
2.7.1 คุณลักษณะของออปแอมป์ในอุดมคติ (Ideal Op-Amp).....	28
2.7.2 วงจรสมมูลของออปแอมป์ในอุดมคติ.....	28
2.7.3 คุณสมบัติของออปแอมป์ในทางปฏิบัติ.....	30
2.7.4 การใช้ออปแอมป์ในวงจรขยายสัญญาณ.....	32
2.7.5 ออปแอมป์ที่ใช้ในการออกแบบวงจร(LF351).....	34
2.8 OTA (Operation Transconductance Amplifier).....	35
2.8.1 โครงสร้างของ OTA และความรู้เบื้องต้น.....	36
2.8.2 การประยุกต์ใช้ OTA (OTA Application).....	37
2.8.3 OTA ที่ใช้ในการออกแบบวงจร(LM 13700).....	43
บทที่ 3 ออกแบบการทดลอง.....	45
3.1 ทดลองวัดความถี่เสียงของขลุ่ย.....	45
3.1.1 วัดความถี่ของเสียงบน โปรแกรม Matlab.....	45
3.1.2 วัดความถี่ของเสียงบน โปรแกรม Soundcard Oscilloscope.....	45
3.2 ทดลองเขียนวงจรโกลวนสร้างสัญญาณเสียงจากวงจรของ Chua.....	46
3.3 ทดลองวงจรโกลวนหาตัวแปรที่มีผลต่อความถี่.....	50
3.3.1 ทดลองปรับค่าตัวต้านทาน.....	50
3.3.2 ทดลองปรับค่าตัวเหนี่ยวนำ.....	52
3.4 ทดลองวาดวงจรโกลวนสร้างสัญญาณเสียงที่ใช้วงจรเหนี่ยวนำเสมือนความถี่.....	53

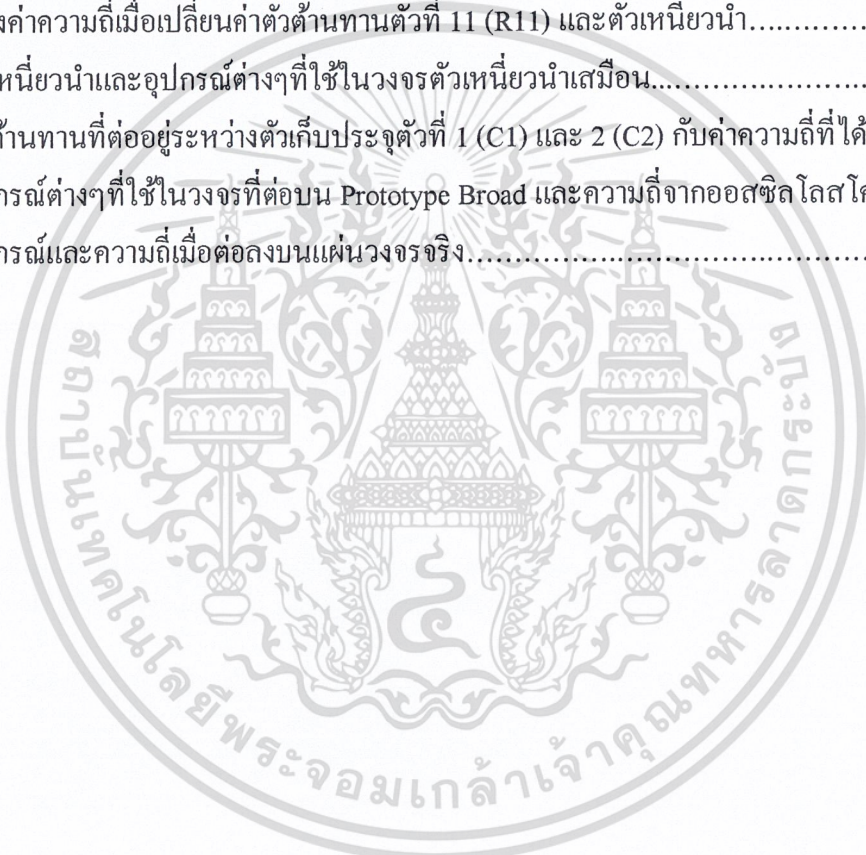
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลทดลอง.....	57
4.1 ผลการทดลองวัดความถี่ของเสียงขลุ่ย.....	57
4.2 ผลการทดลองสร้างวงจรถอดวนหาตัวแปรที่มีผลต่อความถี่.....	60
4.3 ผลการทดลองสร้างวงจรถอดวนสร้างสัญญาณเสียงที่ใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน...62	
บทที่ 5 สรุปผลทดลอง.....	68
5.1 อุปสรรค.....	68
5.2 การแก้ปัญหา.....	68
บรรณานุกรม.....	69



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งระดับเสียงดนตรีในทางวิทยาศาสตร์.....	11
2.2 การแบ่งระดับเสียงดนตรีในทางดนตรีศาสตร์.....	11
3.1 แสดงชื่อของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม PSpice สำหรับวงจร Chua.....	48
3.2 แสดงชื่อของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม PSpice สำหรับวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน.....	53
4.1 ค่าความถี่ของเสียง.....	60
4.2 ผลของค่าความถี่เมื่อเปลี่ยนค่าตัวต้านทานตัวที่ 11 (R11) และตัวเหนี่ยวนำ.....	62
4.3 ค่าตัวเหนี่ยวนำและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน.....	62
4.4 ค่าตัวต้านทานที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุตัวที่ 1 (C1) และ 2 (C2) กับค่าความถี่ที่ได้.....	63
4.5 ค่าอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรที่ต่อบน Prototype Bread และความถี่จากออสซิลโลสโคป.....	65
4.6 ค่าอุปกรณ์และความถี่เมื่อต่อลงบนแผ่นวงจรจริง.....	66



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การสร้างสัญญาณเสียงคนตรีด้วยสัญญาณอลวน.....	2
2.1 ช่วงอัดและช่วงขยายของเสียง.....	4
2.2 คลื่นเสียง.....	5
2.3 ระดับความเข้มเสียงที่ระยะต่างกัน.....	7
2.4 การเปรียบเทียบระหว่างเสียงที่มีความถี่ต่ำ(ก) และเสียงที่มีความถี่สูง(ข).....	8
2.5 การเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนของเสียงสูง(ก) และเสียงต่ำ(ข).....	9
2.6 การเปรียบเทียบระหว่าง Dynamic ของเสียงดัง(ก) และเสียงเบา(ข).....	9
2.7 การกำเนิดเสียงของเปียโน.....	10
2.8 ระดับเสียงของเครื่องดนตรีชนิดต่างๆ เทียบกับระดับเสียงของเปียโน.....	12
2.9 ตัวอย่างการแทนสัญลักษณ์เพลงและการจัดเรียงโน้ต.....	14
2.10 ขลุ่ย (เครื่องดนตรีประเภทเป่า).....	15
2.11 ส่วนประกอบของขลุ่ย.....	16
2.12 สัญญาณเคออสรูปแบบต่างๆ.....	18
2.13 วงจร Chua.....	21
2.14 ช่วงความชันของ Chua ไค โอค.....	22
2.15 Chua ไค โอค.....	23
2.16 ตัวอย่างวงจร Chua ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้.....	23
2.17 สัญญาณอลวนจาก V_{C1} , V_{C2} เมื่อเทียบกับเวลา.....	24
2.18 สัญญาณอลวนเมื่อ V_{C1} เป็นแกน y และ V_{C2} เป็นแกน x.....	24
2.19 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (inductance simulation).....	25
2.20 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (inductance simulation) ที่นำมาใช้แทนตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง.....	26
2.21 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำโดยใช้วงจร Chua.....	26
2.22 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของออปแอมป์ (Op-Amp).....	27
2.23 ออปแอมป์ที่อยู่ในรูปของ IC.....	28
2.24 ลักษณะของวงจรสมบูรณของออปแอมป์ในอุดมคติ.....	28
2.25 กราฟแสดงช่วงการทำงานของออปแอมป์.....	29
2.26 Output Offset Voltage กรณีที่ไม่ใช่อุดมคติ.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 Input Bias Current.....	31
2.28 อัตราการสลับ.....	31
2.29 Common Mode Rejection Ratio.....	32
2.30 วงจรรบกวนเสม็อน.....	32
2.31 Schematic diagram ของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส.....	33
2.32 Schematic diagram ของวงจรรวมสัญญาณ.....	33
2.33 Schematic diagram ของวงจร Inverting amplifier.....	34
2.34 ขบวนการใช้งานของ IC LF351.....	35
2.35 โครงสร้างและความรู้เบื้องต้นของ OTA (ก) วงจรสมมูลทางอุดมคติของ OTA , (ข) ลักษณะของ OTA , (ค) วงจรภายใน OTA.....	36
2.36 โครงสร้างและลักษณะของ OTA ที่นำมาใช้งาน.....	36
2.37 วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ OTA แบบกลับเฟส.....	38
2.38 วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟส.....	38
2.39 ผลที่ได้จากการทำงานแบบ Time Domain จากวงจรรูปที่ 2.38.....	38
2.40 วงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบกลับเฟสที่ใช้ OTA.....	39
2.41 วงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบกลับเฟสที่จำลองโดยใช้โปรแกรม PSpice.....	40
2.42 ผลที่ได้จากการทำงานแบบ Time Domain จากวงจรรูปที่ 2.41.....	40
2.43 วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส.....	40
2.44 วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสที่จำลองโดยใช้โปรแกรม PSpice.....	41
2.45 ผลที่ได้จากการทำงานแบบ Time Domain จากวงจรรูปที่ 2.44.....	42
2.46 วงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส.....	42
2.47 วงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสที่จำลองโดยใช้โปรแกรม PSpice.....	42
2.48 ผลที่ได้จากการทำงานแบบ Time Domain จากวงจรรูปที่ 2.47.....	43
2.49 ขบวนการใช้งานของไอซี LF351.....	44
3.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาความถี่สเปกตรัมของโน้ตโด่ โดยใช้โปรแกรม Matlab.....	45
3.2 การหาความถี่โดยใช้โปรแกรม Soundcard Ozilloscope.....	46
3.3 กราฟที่ได้จากโปรแกรม Soundcard Ozilloscope ของเสียงโด่มีความถี่เท่ากับ 456.99.....	46
3.4 แสดงหน้าต่าง Schematic ของโปรแกรม PSpice.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 วงจร Chua จากโปรแกรม PSpice.....	47
3.6 แสดงการกำหนดค่าของอุปกรณ์ใน โปรแกรม PSpice.....	48
3.7 กราฟที่ได้จากการวัดค่าวงจรของ Chua จากโปรแกรม PSpice.....	49
3.8 กราฟที่ได้จากการวัดค่าวงจรของ Chua จากโปรแกรม PSpice ในเชิง xy	49
3.9 วงจร Floating Voltage Controlled Resistor โดยใช้ไอซี LM13700 ใน PSpice.....	50
3.10 นาววงจร Floating Voltage Controlled Resistor มาต่อเข้ากับวงจร Chua.....	51
3.11 กราฟที่ได้จากการวัดค่าของวงจรที่ปรับปรุงจากวงจรของ Chua จากโปรแกรม PSpice....	51
3.12 กราฟความถี่ที่ได้จากการใช้ฟังก์ชัน FFT บน PSpice.....	52
3.13 เปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ.....	52
3.14 กราฟที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ.....	53
3.15 กราฟความถี่ที่ได้จากการใช้ฟังก์ชัน FFT บน PSpice.....	53
3.16 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนจากโปรแกรม PSpice.....	54
3.17 วงจรอลวนของ Chua ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนแทนตัวเหนี่ยวนำเดิม.....	55
3.18 กราฟที่ได้จากวงจร Chua ที่ใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนแทนตัวเหนี่ยวนำเดิม.....	55
3.19 กราฟความถี่ที่ได้จากวงจรโดยใช้ฟังก์ชัน FFT บน PSpice.....	56
4.1 กราฟความถี่ที่ได้จากโปรแกรม Matlab โดยเรียงตามลำดับ โด เร มี ฟา ซอล ลา ที โด้ และเรี.....	58
4.2 กราฟความถี่ที่ได้จากโปรแกรม Soundcard Ozilloscope โดยเรียงตามลำดับ โด เร มี ฟา ซอล ลา ที โด้ และเรี.....	59
4.3 กราฟแสดงความถี่เมื่อเปลี่ยนค่าตัวต้านทานตัวที่ 11 (R11) เป็น 1.4K,1.6K,1.8K และ 2.0K ตามลำดับ.....	61
4.4 กราฟแสดงความถี่เมื่อเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุที่ 3(C3) เป็น 18mH,47mH,68mH และ 100mH ตามลำดับ.....	61
4.5 กราฟความถี่ของเสียงที่ได้จากโปรแกรม PSpice เรียงตามลำดับ โด เร มี ฟา ซอล ลา ที โด้ และเรี.....	64
4.6 กราฟความถี่ของเสียงที่ได้จากวงจรจริงเรียงตามลำดับ โด เร มี ฟา ซอล ลา ที โด้ และเรี.....	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเรื่องของวัฒนธรรมได้เข้ามามีบทบาทกับความนิยมมากขึ้น มีการแสดงออกของวัฒนธรรมผ่านทางดนตรี วรรณกรรม จิตรกรรม ประติมากรรม การละครและภาพยนตร์ ตัวอย่างเช่น จีนใช้ดนตรีเป็นหนึ่งในเครื่องมือเผยแพร่วัฒนธรรมไปทั่วโลก จึงมุ่งพัฒนาและปรับปรุงเครื่องดนตรี และทำนองเพลงให้มีความเป็นสากลมากขึ้น เพื่อง่ายต่อการเผยแพร่ไปทั่วโลก จึงเห็นได้ว่าวัฒนธรรมที่คนเข้าถึงได้ง่ายที่สุดคือ เสียงเพลงและการแสดง ซึ่งเสียงเพลงและดนตรีนี้เป็นสิ่งที่สามารถพัฒนารูปแบบได้อย่างไม่มีที่สิ้นสุด เนื่องจากไม่มีความตายตัว ขึ้นอยู่กับความสนใจและการสร้างสรรค์เสียงดนตรี

เมื่อได้ศึกษาแล้วพบว่าการเกิดเสียงดนตรีนั้นสอดคล้องกับปรากฏการณ์อลวน(Chaos) ที่มีระดับเสียงสูงเสียงต่ำ(Pitch) ได้เช่นเดียวกับ การเกิดเสียงดนตรีไทย ทำให้เกิดความสนใจที่จะนำสัญญาณอลวน มาสร้างเสียงดนตรีไทย โดยเลียนแบบเสียงของเครื่องดนตรี “ขลุ่ย” (เครื่องดนตรีประเภทเป่า) ซึ่งปัจจุบันขลุ่ยและดนตรีไทยกลับไม่ได้รับความนิยมจากเยาวชนไทย

หากนำทฤษฎีอลวน มาพัฒนาให้เกิดความน่าสนใจเกิดความแปลกใหม่ให้มากขึ้น อาจก่อให้เกิดความนิยมและการพัฒนาเพื่อเผยแพร่วัฒนธรรมสู่ชาวต่างชาติ นอกจากนี้ยังสามารถนำผลการศึกษาที่ได้มาพัฒนาให้เกิดเป็นดนตรีผสมผสานได้อีกต่อไป

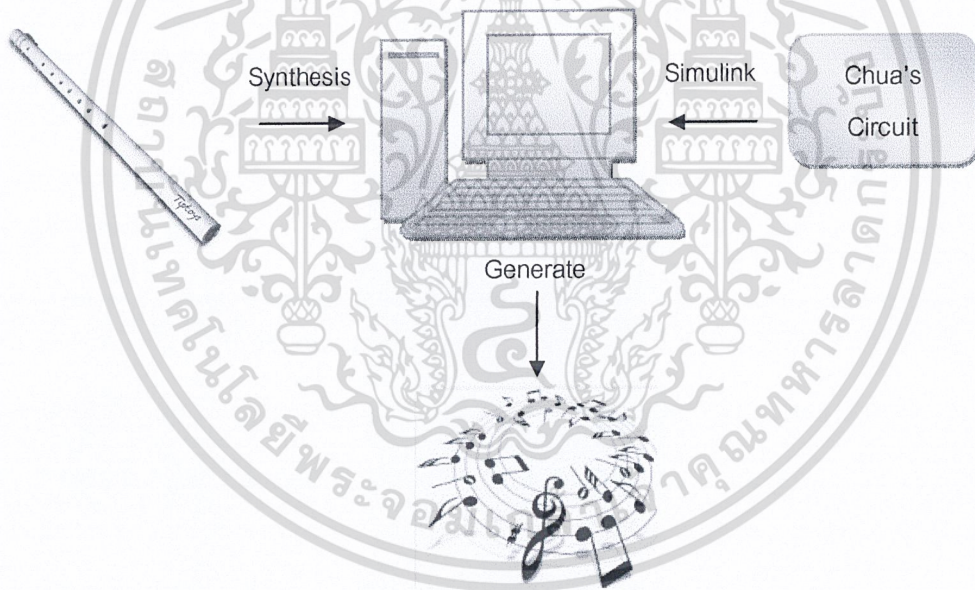
1.2 จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาวจรกำเนิดเสียงเสียงจากสัญญาณอลวน
- เพื่อสร้างเสียงดนตรีจากสัญญาณอลวน
- เพื่อนำเสียงที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.3 ขอบเขตโครงการ

นำเอาวงจรของ Chua ซึ่งเป็นทฤษฎีออสคอน ที่สามารถสร้างสัญญาณออสคอนที่มีความหลากหลายได้ มาสร้างวงจรถอดลอกซึ่งมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่จะทำงานเป็นตัวกำเนิดสัญญาณ และทำให้เกิดการออสคอน หรือสัญญาณเคออสนั่นเอง โดยจะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ตัวอื่นในวงจร ในขณะที่ตัวมันเองจะได้รับพลังงานจากตัวจ่ายไฟ และในตอนนี้มักเรียกว่า Chua ไดโอด ซึ่งมีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น สร้างได้โดยใช้ออปแอมป์(operation amplifiers)

สร้างสัญญาณออสคอน โดยออกแบบวงจรใน Pspice และทดลองวงจร เพื่อแสดงผลกราฟและลักษณะของสัญญาณออสคอน จากนั้นทดลองต่อวงจรบน Prototype-board เพื่อนำสัญญาณออสคอนที่ได้มาวิเคราะห์เสียง และเทียบเสียงในการสร้างเสียงเลียนแบบเสียงขลุ่ย 9 เสียงหลักของขลุ่ย จากนั้นออกแบบลายวงจรและต่อจริงเพื่อทำอุปกรณ์ที่ให้กำเนิดเสียงขลุ่ย และใช้สวิทช์ในการกดเสียงโน้ตในแต่ละระดับเสียง



รูปที่ 1.1 การสร้างสัญญาณเสียงดนตรีด้วยสัญญาณออสคอน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างเสียงจากการใช้วงจร Chua ในทฤษฎีออสคอนได้
2. สามารถนำเอาความรู้เรื่องนี้ไปประยุกต์ใช้ทางด้านระบบสารสนเทศต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

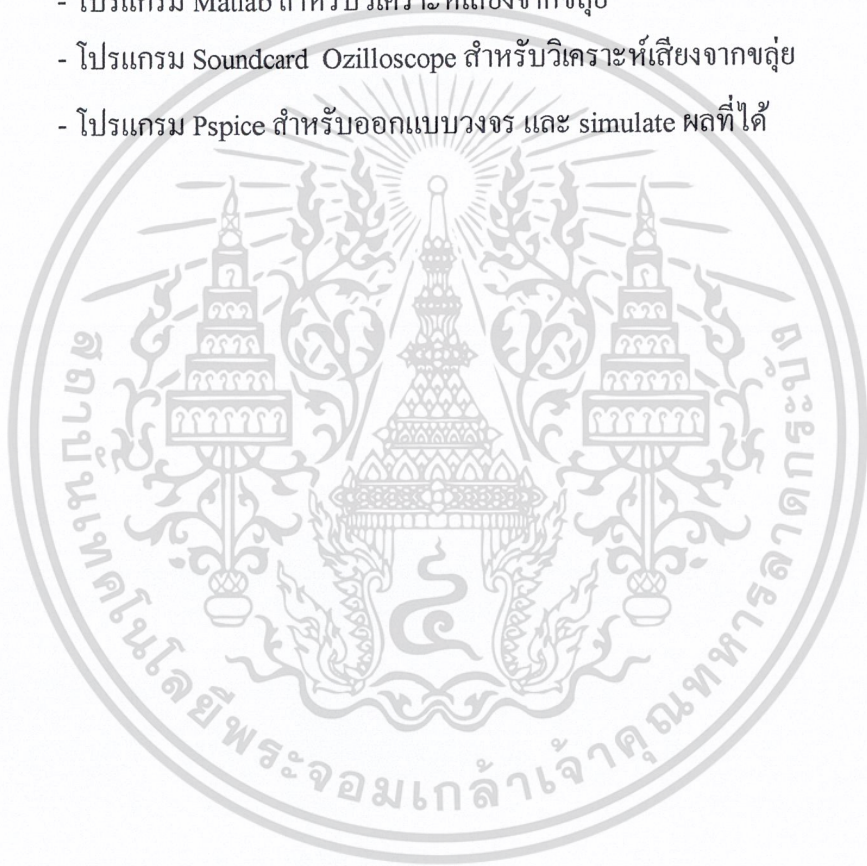
1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้

1.5.1 Hardware

- เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาโปรแกรมและหาข้อมูล
- ออสซิลโลสโคป
- Power supply
- Prototype-Broad

1.5.2 Software

- โปรแกรม Matlab สำหรับวิเคราะห์เสียงจากขลุ่ย
- โปรแกรม Soundcard Ozilloscope สำหรับวิเคราะห์เสียงจากขลุ่ย
- โปรแกรม Pspice สำหรับออกแบบวงจร และ simulate ผลที่ได้



บทที่ 2

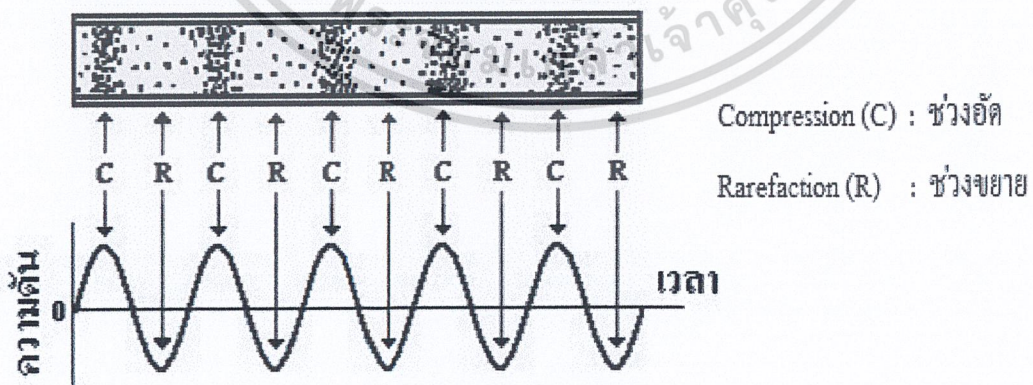
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเสียง

เสียงเป็นคลื่นตามยาวชนิดหนึ่งซึ่งอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ดังนั้นคุณสมบัติของเสียงจึงเหมือนคลื่นทุกประการ เสียงแต่ละเสียงมีความแตกต่างกัน เสียงสูง-เสียงต่ำ, เสียงดัง-เสียงเบา, หรือคุณภาพของเสียงลักษณะต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดเสียง และจำนวนรอบต่อวินาทีของการสั่นสะเทือน

2.1.1 การเกิดเสียง

คลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาวเกิดจากการสั่นของวัตถุ เราสามารถทำให้วัตถุสั่นด้วยวิธีการตี ตี ตี และเป่า เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเกิดการสั่น จะทำให้โมเลกุลอากาศสั่นตามไปด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง และในขณะที่มีการสั่น โมเลกุลของตัวกลางจะมีการถ่ายเทพลังงานทำให้เกิดความดันอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง เกิดเป็น ช่วงอัด และ ช่วงขยาย โดยที่ช่วงอัด คือบริเวณที่อนุภาคของตัวกลางอัดเข้าหากัน บริเวณนี้将有ความดันสูงสุดโดยเทียบกับความดันที่ตำแหน่งสมดุลของอนุภาค มีโมเลกุลของอากาศหนาแน่นส่วนนี้จะมีเสียงดัง ส่วนช่วงขยาย คือบริเวณที่อนุภาคตัวกลางแยกห่างจากกัน บริเวณนี้将有ความดันต่ำสุดโดยเทียบกับความดันที่ตำแหน่งสมดุลของอนุภาค มีโมเลกุลของอากาศน้อย ส่วนนี้จะมีเสียงค่อยหรือเงียบไปเลย และจะเคลื่อนที่ออกไปในลักษณะ “คลื่นความดัน” หรือคลื่นเสียง



รูปที่ 2.1 ช่วงอัดและช่วงขยายของเสียง

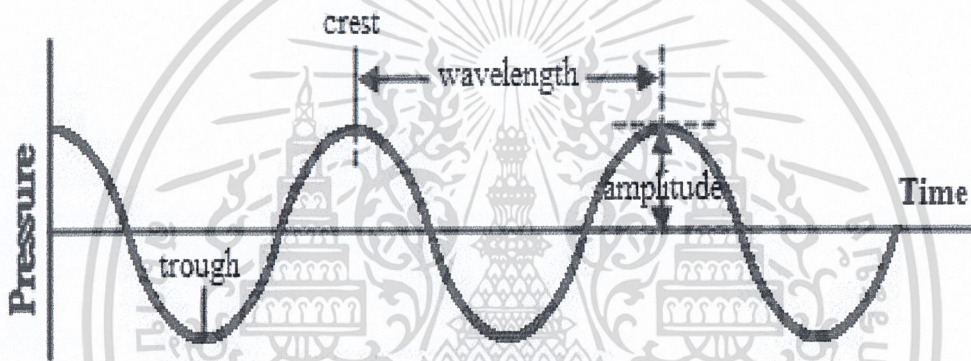
2.1.2 การได้ยินเสียง

การได้ยินเสียงจะต้องมีองค์ประกอบของ แหล่งกำเนิดเสียง ตัวกลาง ประสาทสัมผัสทางหู และความถี่ของเสียง ความถี่ของเสียงที่คนปกติสามารถได้ยินอยู่ในช่วง 20 – 20,000 เฮิรตซ์ (Hertz = Hz) ช่วงนี้เราเรียกว่า Audible frequency หรือ Audible sound

เสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 Hz เรียกว่า คลื่นเหนือเสียง หรือ อัลตราโซนิก (Ultrasonic Wave)ซึ่งมีความถี่สูงกว่าที่คนจะรับฟังได้

เสียงที่มีความถี่ต่ำกว่า 20 Hz เรียกว่า คลื่นใต้เสียง หรือ อินฟราโซนิก (Infrasonic Wave)ซึ่งมีความถี่ต่ำกว่าที่คนจะรับฟังได้

2.1.3 ส่วนประกอบของคลื่นเสียง



รูปที่ 2.2 คลื่นเสียง

- 1) สันคลื่นหรือยอดคลื่น (crest) คือ ตำแหน่งที่อนุภาคของตัวกลางอยู่ที่จุดสูงสุด หรือ ส่วนบนสุดของคลื่นแต่ละลูก
- 2) ท้องคลื่น (trough) ตำแหน่งที่อนุภาคของตัวกลางอยู่ที่จุดต่ำสุดหรือส่วนล่างสุดของคลื่นแต่ละลูก
- 3) แอมพลิจูด (amplitude) คือระยะทางตั้งฉากที่มากที่สุดจากเส้นแกน หรือความสูงระหว่างยอดคลื่นและท้องคลื่นของคลื่นเสียง ที่แสดงถึงความเข้มของเสียง (Intensity) หรือความดังของเสียง (Loudness) ยิ่งแอมพลิจูดมีค่ามาก ความเข้มหรือความดังของเสียงก็ยิ่งเพิ่มขึ้น
- 4) ความยาวช่วงคลื่น (wavelength) เขียนย่อว่า λ เป็นอักษรกรีกตัวหนึ่ง อ่านว่า แลมบ์ดา คือระยะระหว่างตำแหน่งยอดคลื่นสองยอดที่ติดกัน หรือระยะระหว่างตำแหน่งคลื่นที่อยู่ในลักษณะเหมือนกันติดกันไป สำหรับคลื่นเสียง การอัดและการขยาย 1 คู่ที่อยู่ติดกันเรียกว่า 1 ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

5) ความถี่ (frequency) เขียนย่อว่า f คือ จำนวนคลื่นที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็นรอบ/วินาที หรือ เฮิรตซ์ (Hz)

6) ความเร็วคลื่น (velocity) เขียนย่อว่า v คือ ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็นเมตร/วินาที (m/s)

7) คาบ (period) คือ ช่วงเวลาที่คลื่น 1 ลูกแผ่ออกไปจากแหล่งกำเนิดคลื่น

2.1.4 คุณสมบัติของคลื่นเสียง

1) เสียงสะท้อน การสะท้อนของเสียง คือ เสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงตกกระทบวัตถุแล้วสะท้อนกลับไปที่เดิม เสียงสะท้อนกลับ คือ เสียงที่สะท้อนกลับมาสู่หูช้ากว่าเสียงที่สะท้อนออกไปเกินวินาที หูจึงจะสามารถแยกเสียงที่สะท้อนกับเสียงสะท้อนกลับมาได้ การสะท้อนของคลื่นจะเกิดขึ้นได้เมื่อวัตถุ หรือสิ่งกีดขวางมีขนาดโตกว่าความยาวคลื่นที่ตกกระทบ

2) การหักเหของเสียง เสียงเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งผ่านไปยังอีกตัวกลาง จะเกิดการหักเหเช่นเดียวกับคลื่นผิวน้ำ เช่น เห็นฟ้าแลบ โดยไม่ได้ยินเสียงฟ้าร้องเนื่องจากคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านอากาศร้อนได้เร็วกว่าอากาศเย็น อัตราเร็วของเสียงจึงน้อยกว่าบริเวณใกล้ผิวโลก

3) การแทรกสอดของเสียง เสียงมีคุณสมบัติสามารถแทรกสอดกันได้เมื่อคลื่นเสียงที่มาจากแหล่งกำเนิดเสียงตั้งแต่ 2 แหล่งขึ้นไปรวมกัน จึงเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันและหักล้างกัน ทำให้เกิดเสียงดัง และ เสียงค่อยต่างกัน

4) การเลี้ยวเบนของเสียง นอกจากการหักเหของเสียงที่เกิดขึ้น เมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกันแล้วเสียงยังมีการเลี้ยวเบนได้ โดยสามารถเคลื่อนที่อ้อมสิ่งกีดขวางไปด้านหลังของสิ่งกีดขวาง การเลี้ยวเบนของเสียงมักจะเกิดพร้อมกับการสะท้อนของเสียง เสียงที่เลี้ยวเบนจะได้ยินเสียงค่อยกว่าเดิม เพราะพลังงานของเสียงลดลง

2.1.5 อัตราเร็วเสียง

อัตราเร็วของเสียงจะเร็วมากหรือเร็วขึ้นขึ้นอยู่กับ

1) ชนิดของตัวกลาง อัตราเร็วของเสียงในตัวกลางที่เป็นของแข็ง จะมากกว่าอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางที่เป็นของเหลว และอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางที่เป็นของเหลวจะมากกว่าอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางที่เป็นก๊าซ

2) ความหนาแน่นของตัวกลาง ยิ่งมีความหนาแน่นมาก อัตราเร็วของเสียงจะมากขึ้น ทำให้เดินทางในตัวกลางที่เป็นของแข็งได้ดีกว่าของเหลวและก๊าซ

3) อุณหภูมิของตัวกลาง เมื่ออุณหภูมิของตัวกลางเพิ่มขึ้นอัตราเร็วจะมากขึ้นด้วย อัตราเร็วของเสียงในอากาศแห้งที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เท่ากับ 331 เมตร/วินาที (m/s) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเสียงจะเพิ่มขึ้น จากเดิมประมาณ 2 ฟุต/วินาที หรือ 0.61 เมตร/วินาที (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

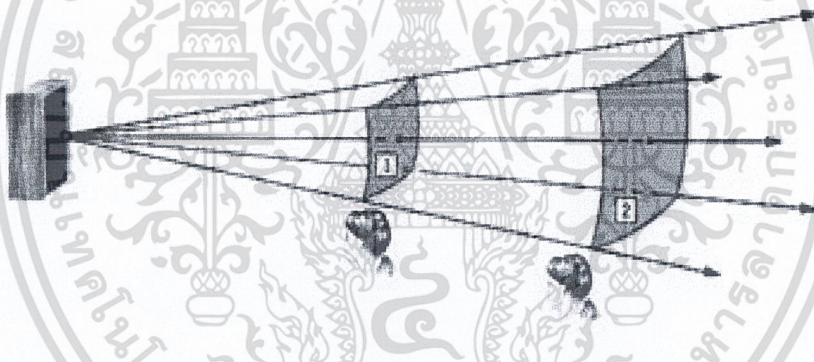
2.1.6 คุณลักษณะของเสียง

เสียงที่เราได้ยินแต่ละเสียงอาจจะเหมือนกันหรือต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเสียง ซึ่งประกอบด้วย

1) ความดัง (Loudness) หมายถึง ความรู้สึกได้ยินของมวลมนุษย์ว่าดังมากดังน้อย ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่อาจวัดด้วยเครื่องมือใด ๆ ได้โดยตรง ความดังของเสียง จึงวัดจากพลังงานของเสียงที่ตกลงพื้นที่รับเสียง ซึ่งการบอกค่าความดังบอกได้ 2 แบบ คือ

- ความเข้มเสียง (Intensity) เสียงที่เคลื่อนที่และมีการถ่ายเทพลังงาน ไปให้กับวัตถุที่เสียงตกกระทบ โดยอัตราการถ่ายเทพลังงานของเสียงต่อพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของเสียง เรียกว่า ความเข้มเสียง (Intensity) แทนด้วยสัญลักษณ์ I หรืออาจกล่าวได้ว่า ความเข้มเสียง คือ กำลังของเสียงจากแหล่งกำเนิดที่ตกกระทบบนพื้นที่ 1 ตารางหน่วยในแนวตั้งฉากที่พิจารณา

จากการทดลองพบว่า เสียงดังที่สุดที่หูคนสามารถได้ยินมีความเข้ม 1 W/m^2 และเสียงค่อยที่สุดมีความเข้ม 10^{-12} W/m^2 และนอกจากนี้พบว่าความเข้มเสียงจะแปรผกผันกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดยกกำลังสอง โดยถ้าระยะทางยิ่งมาก ความเข้มเสียงยิ่งน้อยลง



รูปที่ 2.3 ระดับความเข้มเสียงที่ระยะต่างกัน

- ระดับความเข้มเสียง (Intensity Level) เป็นตัวเลขเปรียบเทียบกับความเข้มเสียงในหน่วยเดซิเบล (dB) โดยความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มเสียงกับความเข้มเสียง คือ

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.1)$$

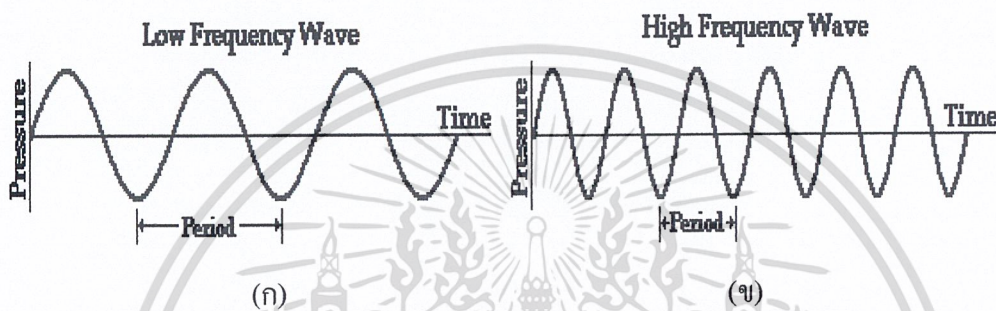
เมื่อ β : ระดับความเข้มเสียง หน่วยเป็นเดซิเบล (decibel, dB)

I_0 : ความเข้มเสียงต่ำสุดที่มนุษย์ได้ยิน ซึ่งมีค่า 10^{-12} W/m^2 หรือ 0 dB

I : ความเข้มเสียงที่ระยะใด ๆ (W/m^2)

ความดังเพิ่มขึ้นตามความเข้มเสียง ความรู้สึกเกี่ยวกับความดังจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับความเข้มเสียง โดยถ้า I แทนความเข้มเสียง ความดังของเสียงจะแปรผันโดยตรงกับ $\log I$ หรืออาจกล่าวได้ว่า ความดังก็คือระดับความเข้มเสียงนั่นเอง

2) ระดับเสียง (pitch) หมายถึง เสียงที่มีความยาวคลื่นและความถี่ต่างกัน โดยเสียงที่มีความถี่สูงหรือมีความเร็วของการสั่นสะเทือนในวัตถุที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงมาก จะมีระดับเสียงสูง (เสียงแหลม) และเสียงที่มีความถี่ต่ำหรือมีความเร็วของการสั่นสะเทือนในวัตถุที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงน้อยจะมี ระดับเสียงต่ำ (เสียงทุ้ม)



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบระหว่างเสียงที่มีความถี่ต่ำ(ก) และเสียงที่มีความถี่สูง (ข)

2.2 ทฤษฎีเสียงดนตรีไทย

เสียงดนตรี เป็นเสียงที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของมนุษย์ที่สามารถแปรเปลี่ยนอารมณ์ความรู้สึกของมนุษย์ ก่อให้เกิดความสุข ความบันเทิงใจ ดนตรี คือเสียง แต่เสียงทุกเสียงยังไม่ใช่ดนตรี เสียงเกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ แล้วเดินทางผ่านอากาศเข้ามาสู่โสตประสาทของเรา ดนตรีคือสิ่งที่เกิดขึ้นหลังจากนั้น เมื่อมนุษย์มีภูมิปัญญาและมีความเพียรพยายาม มนุษย์ก็จัดการสร้างเสียงให้อยู่ในระเบียบ จังหวะ ทำนอง สีสัน

2.2.1 องค์ประกอบของเสียงดนตรี

องค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้ดนตรีเป็นที่ชื่นชอบ ก่อให้เกิดความสุขแก่ผู้สัมผัส ได้แก่ จังหวะ ทำนอง ความดัง และคุณภาพของเสียง (ความกังวาลและสีสัน) เราจึงต้องศึกษาทำความเข้าใจถึงองค์ประกอบที่สำคัญเหล่านี้ เพื่อจะได้นำไปประยุกต์ใช้ให้เป็นประโยชน์

1) ระดับเสียง (Pitch) หมายถึง เสียงสูง-เสียงต่ำ เราสามารถเปรียบเทียบเสียง 2 เสียงได้ว่า เสียงไหนมีระดับสูงกว่าและเสียงไหนมีระดับต่ำกว่าโดยการฟัง ถ้าระดับเสียงต่างกันมากก็จะฟังง่าย ถ้าต่างกันเพียงเล็กน้อยก็จะฟังยากและแยกแยะได้ยากกว่า

ระดับเสียง เกิดจากความถี่ของการสั่นสะเทือนของวัตถุ หรืออาจกล่าวได้ว่า ความถี่ของการสั่นสะเทือนเป็นตัวกำหนดระดับเสียง วัตถุที่สั่นสะเทือนเร็วกว่าทำให้เกิดระดับเสียงสูงกว่า ในขณะที่วัตถุที่สั่นสะเทือนช้ากว่าทำให้เกิดระดับเสียงที่ต่ำกว่า ความถี่ซึ่งเป็นตัวกำหนดระดับเสียงได้มาจากการวัดการสั่นสะเทือนของวัตถุ โดยมีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ ซึ่งเท่ากับการสั่นครบหนึ่งรอบต่อวินาทีนั่นเอง



รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนของเสียงสูง(ก) และเสียงต่ำ (ข)

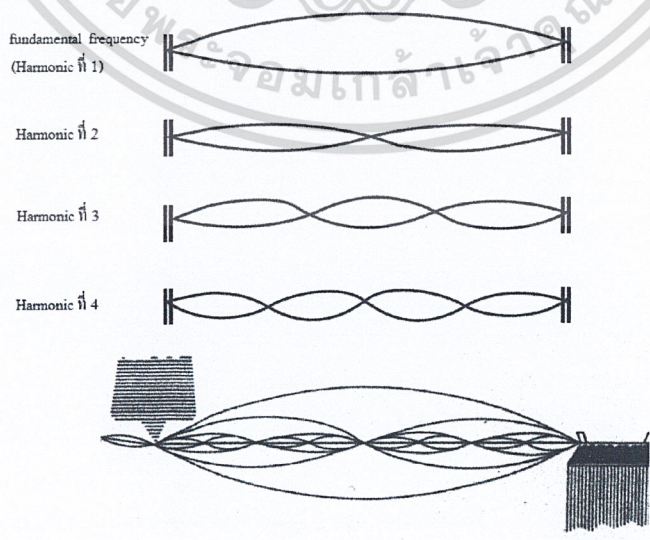
2) ความเข้มของเสียง (Volume or Intensity) หรือความดัง-เบาของเสียง เกิดขึ้นจากความแตกต่างของช่วงความกว้างหรือความสูงของคลื่นเสียง ความดังและความเบาในทางดนตรีเรียกว่า “Dynamic” เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในทางดนตรี มีความสัมพันธ์กับช่วงความกว้างของคลื่นเสียง (Amplitude) ในการสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดเสียงนั้น ๆ ช่วงกว้างมากเสียงจะดัง และช่วงกว้างน้อยเสียงจะเบา เช่น ถ้าเราคิดสายกีตาร์แรงเท่าใดเสียงที่ออกมาก็จะดัง ในการตรงกันข้าม หากเราคิดสายกีตาร์เบา เสียงที่ออกมาก็จะเบา ความเข้มเสียงวัดได้จากความกว้างของคลื่นเสียง (amplitude) ถ้าคลื่นเสียงยิ่งกว้าง เสียงก็จะยิ่งดัง ในขณะที่เสียงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศนั้น ความเข้มเสียงจะน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือ เสียงจะเบาลง ดังนั้นระยะทางที่เสียงต้องเดินทางก็จะมีผลต่อความเข้มเสียงด้วย



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบระหว่าง Dynamic ของเสียงดัง (ก) และเสียงเบา (ข)

ขณะที่นักดนตรีบรรเลงอยู่ในวงดนตรีนั้น เขาสามารถจะปฏิบัติเสียงของการเล่นโน้ตตัวใดตัวหนึ่งให้เด่นขึ้นได้โดยวิธีการ “การเน้นเสียง” (dynamic accent) การเน้นเสียงนั้นเป็นการกระทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความดัง – ค่อยของเพลง มีผลทำให้บทเพลงนั้น ๆ มีอารมณ์ของการแสดงออกเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ในการปฏิบัติการเล่นเสียงดังกล่าวนั้นปกติผู้ประพันธ์เพลงจะเขียนกำกับไว้ในโน้ตเพลง แต่ก็มีบ่อยครั้งที่ไม่มีเขียนกำกับไว้แต่จะปล่อยให้เป็นการแสดงออกโดย อารมณ์ความรู้สึก (feelings) ของนักดนตรีเอง

3) สีสันเสียง (Timbre หรือ Tone color) หมายถึง เสียงที่มาจากแหล่งกำเนิดเสียงต่างๆ กัน เช่น เสียงเปียโน เสียงกีตาร์ เสียงกริ่ง เสียงลม เสียงร้อง ฯลฯ คลื่นเสียงที่เกิดจากแหล่งที่มีสีสันเสียงต่างกันจะมีคลื่นรูปร่างลักษณะต่างกัน เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดเสียงหนึ่งๆ พบว่าจะมีเสียงเกิดขึ้นพร้อมกันได้หลายความถี่ ซึ่งความถี่ต่ำสุดที่เกิดขึ้นเรียกว่าความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ของแหล่งกำเนิดนั้น สำหรับความถี่อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นพร้อมกันแต่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานเราเรียกว่า ฮาร์โมนิก (harmonic) เสียงที่เกิดขึ้นจึงเกิดจากการผสม (การรวมกัน) ของความถี่เสียงที่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ ที่มีแอมพลิจูดต่างกัน ทำให้เสียงผสมที่เราได้ยินต่างกันไป รูปร่างของคลื่นเสียงจะขึ้นอยู่กับฮาร์โมนิกต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเสียง เนื่องจากเครื่องดนตรีต่างๆ เช่น สายกีตาร์ก็จะสั่นได้เป็น 1 loop, 2 loop, 3 loop,... ซึ่งให้ความถี่และแอมพลิจูดต่างๆ กันออกมา ผลลัพธ์ที่เราได้ยินคือ เอาทุก mode มารวมกัน รูปร่างและวัสดุที่ใช้ทำเครื่องดนตรีก็เป็นตัวกำหนดสีสันของเสียงเช่นกัน ทำให้มี mode ของการสั่นต่างๆ กัน และสั่นตามความถี่ต่างๆ ได้ไม่เท่ากัน รูปคลื่นก็เลยออกมาไม่เหมือนกัน เราจึงแยกแยะได้ว่า เสียงที่ฟังนั้นเกิดจากเครื่องดนตรีอะไร เช่น คลื่นเสียงของไวโอลินจะมีรูปร่างต่างจากคลื่นเสียงของทรัมเป็ต เป็นต้น



รูปที่ 2.7 การกำเนิดเสียงของเปียโน

4) คุณภาพเสียง (Tone Quality) หมายถึง เสียงดีมากหรือดีน้อย เช่น เสียงโน้ตตัวเดียวกันที่เกิดจากเปียโน 2 ตัว จะมีคุณภาพเสียงไม่เหมือนกันทีเดียว แม้จะมีระดับเสียง ความเข้มเสียง และสีต้นเสียงเหมือนกันทุกประการ เวลาเลือกซื้อเครื่องดนตรีจึงต้องคำนึงถึงคุณภาพเสียง ซึ่งแต่ละบุคคลจะชอบคุณภาพเสียงไม่เหมือนกัน บางคนชอบเปียโนยี่ห้อหนึ่งเพราะฟังนุ่มไพเราะ ส่วนอีกยี่ห้อหนึ่งเสียงใส เกินไป ในขณะที่อีกคนหนึ่งชอบเปียโนเสียงใส เสียงร้องหรือเสียงพูดของคนก็เช่นเดียวกัน บางคนมีคุณภาพเสียงที่ทุ้มนุ่มนวล ในขณะที่อีกคนหนึ่งมีคุณภาพเสียงที่ก้องกังวาน ในการปฏิบัติเครื่องดนตรี นักดนตรีต้องคำนึงอย่างมากถึงคุณภาพเสียง เพื่อให้ได้น้ำเสียงที่ไพเราะน่าฟัง

5) ความยาวเสียง (Duration) เป็นพื้นฐานของดนตรีที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลา เสียงแต่ละเสียงที่เกิดขึ้นต้องมีระยะเวลาซึ่งทำให้เกิดเสียงยาวเสียงสั้น เสียงไม่ว่าจะมีระดับเสียงที่แน่นอนหรือไม่ ก็ต้องมีความยาวเข้ามาเกี่ยวข้อง ความยาวเสียงเป็นที่มาของจังหวะซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในดนตรีของทุกชาติทุกภาษา ความยาวเสียงในที่นี้หมายรวมถึง ความเงียบของตัวหยุดด้วย เนื่องจากดนตรีเป็นผลของกระบวนการเกิดเสียง (Sound) สลับกับความเงียบ (Silence) ไม่ว่าจะ เป็นเสียง (ซึ่งใช้สัญลักษณ์ตัวโน้ต) หรือความเงียบ (ซึ่งใช้สัญลักษณ์ตัวหยุด) ย่อมต้องมีความยาวหรือระยะเวลาทั้งสิ้น

2.2.2 การแบ่งระดับเสียงดนตรีไทย

การแบ่งระดับเสียงอาจทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งก็คือเป็นระดับเสียงดนตรี ในการแบ่งระดับเสียงของเครื่องดนตรีสากล เสียงต่างๆมีความถี่ตามตาราง

ตารางที่ 2.1 การแบ่งระดับเสียงดนตรีในทางวิทยาศาสตร์

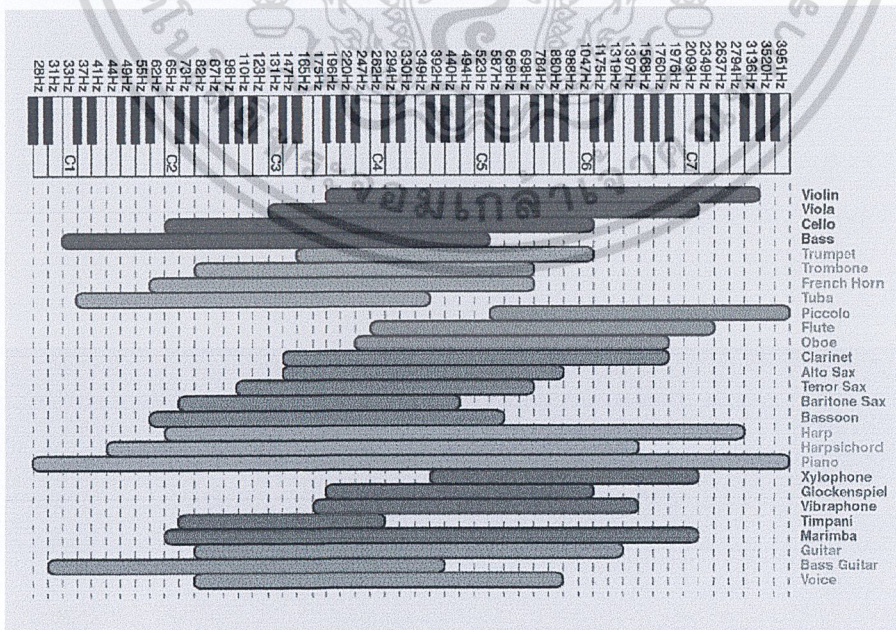
ระดับเสียงดนตรี	C(โด)	D(เร)	E(มิ)	F(ฟา)	G(ซอล)	A(ลา)	B(ที)	C'(โด)
ความถี่(Hz)	256	288	320	341	384	427	480	512

ตารางที่ 2.2 การแบ่งระดับเสียงดนตรีในทางดนตรีศาสตร์

ระดับเสียงดนตรี	C(โด)	D(เร)	E(มิ)	F(ฟา)	G(ซอล)	A(ลา)	B(ที)	C'(โด)
ความถี่(Hz)	261.6	293.7	329.6	349.2	392.0	440.0	493.9	523.3

ระดับเสียงดนตรีไทยแม้จะเป็นที่รู้จักกันอย่างดีในหมู่นักดนตรี แต่ก็ยังไม่มีมีการประกาศความถี่เสียงของบันไดเสียงไทยให้ใช้เป็นที่ยอ้างอิงได้ การเทียบเสียงของเครื่องดนตรีในวง อาศัย ความชำนาญของครู หรือนักดนตรีอาวุโสผู้ควบคุมดูแล โดยอาศัยเสียงจากเครื่องดนตรีที่ปรับแต่งเสียงไม่ได้ หรือทำได้ยาก เช่น ปี่ ขลุ่ย ระนาดเหล็ก เป็นต้นำในการเทียบเสียง จึงมักพบว่า เครื่องดนตรีของวงต่างๆที่มาจากต่างถิ่น มีเสียงเพี้ยนไปจากกันบ้าง เมื่อมีการรวมวงก็จะประสบปัญหาในการเล่นบ้าง หากมีการประกาศความถี่เสียงอันเป็นมาตรฐานของมาตรฐานของมาตรฐานแบบไทย ผลที่จะตามมาประการหนึ่งก็คือ การมีเครื่องเทียบเสียงเหมือนอย่างเช่นของฝรั่ง วงดนตรีต่างๆ โดยเฉพาอย่างยิ่งตามสถานศึกษาต่างๆ ก็สามารถเทียบเสียงตามมาตรฐานกลางได้โดยไม่ผิดเพี้ยน การบรรเลงรวมวงก็จะมีแต่ความลงรอยกัน ผลดีประการอื่นๆก็ยังมีตามมาอีก เช่น ในการสร้างเครื่องสังเคราะห์เสียงดนตรี(music synthesizer) ที่ผลิตเสียงเครื่องดนตรีไทยต่างๆได้ไม่ผิดเพี้ยน การสร้างเครื่องดนตรีขึ้นจากวัสดุ ทดแทนต่างๆ เหล่านี้ ต้องการการตรวจวัดคุณภาพเสียงตามหลักการทาง วิทยาศาสตร์ทั้งสิ้น ถ้าเราต้องการให้เครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้นมีคุณภาพ ความถี่ของเสียงอันเป็นมาตรฐานจะเป็นสิ่งอ้างอิงที่มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการวัดและทดสอบนี้

การแบ่งระดับเสียงดนตรีของไทยในยุคใหม่ ใกล้เคียงกับการแบ่งระดับเสียงของดนตรีสากล ทำให้เครื่องดนตรีไทยสามารถเล่นเพลงสากลบางเพลงได้ และเครื่องดนตรีสากลก็สามารถเล่นเพลงไทยบางเพลงได้เช่นกัน จึงมีการนำเครื่องดนตรีสากลมาบรรเลงร่วมกับดนตรีไทย เช่น เครื่องสายผสมออร์แกน หรือ เครื่องสายผสมเปียโน เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ระดับเสียงของเครื่องดนตรีชนิดต่างๆ เทียบกับระดับเสียงของเปียโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 องค์ประกอบของเพลงไทย

1) มาตรฐานเสียง หรือระดับความสูง-ต่ำของเสียง

เสียงดนตรีไทยมีอยู่ 7 ชั้นหรือ 7 เสียง เทียบได้กับเสียงดนตรีสากล (โด เร มี ฟา ซอล ลา ที) แต่มีข้อแตกต่างคือ แต่ละชั้นเสียงในดนตรีไทยมีความห่างของเสียงเท่ากันตลอดทั้ง 7 ชั้น ซึ่งต่างจากดนตรีสากลที่มีความห่างบางชั้นแค่ครึ่งเสียงดนตรี สำหรับในวัฒนธรรมดนตรีตะวันตก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับเสียง อาศัยระดับความสูง-ต่ำ ของบรรทัด 5 เส้น เป็นตัวกำหนด สำหรับในดนตรีไทย สัญลักษณ์ที่ใช้แทน ถูกกำหนดโดยตัวอักษร 7 ตัว และสัญลักษณ์การแทนเสียงสูง-ต่ำ โดยมีจุด (.) ข้างล่างตัวอักษรเป็นเสียงต่ำ จุดข้างบนตัวอักษรเป็นเสียงสูง ถึงแม้ว่าชื่อประจำระดับเสียงโน้ตต่างๆที่เขียนแบบระบบโน้ตดนตรีสากลต่างๆ ขอให้เข้าใจว่าชื่อเรียกระดับเสียงต่างๆ ในดนตรีไทยและสากลที่เหมือนกันนั้น มีระดับความสูง-ต่ำของเสียงและชั้นคู่เสียงไม่เท่ากัน จากการที่ความสูง-ต่ำของเสียงที่เกิดจากการใช้สัญลักษณ์นั้น ไม่สามารถมองเห็นเป็นความสูง-ต่ำลดหลั่นกันเหมือนเช่นระบบโน้ตในดนตรีตะวันตกได้ จึงไม่สามารถเล่นควบคู่กับเครื่องดนตรีสากลได้ นอกจากนี้จะมีการพัฒนาปรับแต่งเครื่องดนตรี หรือการปรับแต่งโน้ตเพลง เป็นต้น

2) ความสั้น-ยาวของเสียง

มีความสำคัญยิ่งต่อการกำหนดคลีตาจังหวะ ในดนตรีตะวันตก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความสั้น-ยาวของเสียง สังกัดได้จากลักษณะที่แตกต่างกันของตัวโน้ต เช่น ตัวกลม ตัวขาว ตัวดำ ตัวเข็บบีต เป็นต้น ระบบโน้ตดนตรีไทยมีสัญลักษณ์ที่ตรงกันข้ามกับระบบโน้ตสากล อัตราความสั้น-ยาวของเสียงในระบบโน้ตสากล ขึ้นอยู่กับสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันของโน้ตเป็นสำคัญ ในขณะที่ตัวโน้ตตามระบบดนตรีไทยนั้น ไม่สามารถแทนค่าความสั้น-ยาวของเสียงได้ อัตราความสั้น-ยาวตามระบบโน้ตดนตรีไทยจะเกิดขึ้นได้ ต้องอาศัยองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ห้องเพลงและการจัดเรียงโน้ต

- ห้องเพลง ห้องเพลงในระบบโน้ตดนตรีไทย ทำหน้าที่เช่นเดียวกับจังหวะเคาะ (Beat) โดยจะมีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในอัตราความช้า-เร็วอย่างสม่ำเสมอทุกบรรทัดที่ใช้บันทึกโน้ตจะประกอบด้วย 8 ห้องเพลง โดยตำแหน่งของจังหวะเคาะจะอยู่ที่ส่วนท้ายสุดของแต่ละห้องเพลง

- การจัดเรียงโน้ต เนื่องจากสัญลักษณ์ของอักษร ค ร ม ฟ ซ ล ท ไม่สามารถแยกแยะอัตราความสั้น-ยาวของเสียงที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยการจัดเรียงตัวโน้ตตามหลักการพื้นฐานของการจัดเรียงตัวโน้ต ซึ่งในแต่ละห้องเพลงจะบรรจุได้ด้วยหน่วยเคาะย่อยเท่ากับ 4 หน่วยเคาะย่อย ในการบันทึกตามระบบโน้ตของดนตรีไทย โน้ตอักษร ค ร ม ฟ ซ ล ท แต่ละตัวและเครื่องหมาย - (ขีด) แต่ละอันมีความยาวเท่ากับ 1 จังหวะเคาะย่อยเท่ากันหมด

เพลงลาวต่อนถ

				---ค		-ค	-ร
		ฟ	-ช-ล			-ล--	-ฟ
----	----	ค ร ค					-ร

----	---ร	----	-ค-ร			-ม	ร
				-ฟ ฟ ฟ	ช ล ช ฟ		
----	---ร	----	-ค-ร			-ม-ร	ค ล ค ร

กลับคืน

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการแทนสัญลักษณ์ห้องเพลงและการจัดเรียงโน้ต

อย่างไรก็ตามในเพลงไทยมีการแบ่งความสั้นยาวของเพลงตามอัตราจังหวะ ออกเป็น 3 ระดับ ด้วยกันคือ

- อัตราจังหวะชั้นเดียว
- อัตราจังหวะ 2 ชั้น (มีจำนวนห้องเพลงเป็น 2 เท่าของชั้นเดียว)
- อัตราจังหวะ 3 ชั้น (มีจำนวนห้อง เพลงเป็น 2 เท่าของ 2 ชั้น, หรือ 4 เท่าของชั้นเดียว)

2.3 เครื่องดนตรีไทย (ขลุ่ย)

เครื่องดนตรีไทย คือ เครื่องดนตรี ที่สร้างสรรค์ขึ้นตามศิลปวัฒนธรรมดนตรีของไทย มีรูปแบบเอกลักษณ์ของความเป็นไทย ซึ่งสัมพันธ์กับชีวิตความเป็นอยู่และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตของคนไทย

2.3.1 ประเภทของเครื่องดนตรีไทย

สามารถแบ่งประเภทของเครื่องดนตรีได้ 2 ประเภท คือ แบ่งประเภทตามวิธีการบรรเลง และแบ่งตามประเภทวงดนตรีไทย ดังนี้

1) แบ่งประเภทตามวิธีการบรรเลง

- เครื่องดีด เป็นเครื่องดนตรีไทยที่บรรเลงหรือ เล่นด้วยการใช้นิ้วมือ หรือไม้ดีด ดีดสาย ให้สั่นสะเทือนจึงเกิดเสียง เช่น กระจับ พิณ และจะเข้

- เครื่องสี เป็นเครื่องสายที่ทำให้เกิดเสียงด้วยการใช้คันชักสีเข้ากับสาย ในดนตรีไทยมีอยู่ 3 ชนิดคือ ซออด้วง ซออสามสาย และซออู้

- เครื่องตี เป็นเครื่องดนตรีที่ทำให้เกิดเสียงดนตรีด้วยการใช้ของสองสิ่งกระทบกัน ด้วยการตี นับว่าเป็นเครื่องดนตรีที่เก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์รู้จักใช้ มีวิวัฒนาการจากอุปกรณ์ง่ายๆ ให้มีความหลากหลาย สำหรับเครื่องดนตรีไทยที่เป็นประเภทเครื่องตีแบ่งออกเป็น เครื่องตีที่ทำด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม้ เช่น กรับพวง กรับเสภา ระนาดเอก ระนาดทุ้ม เครื่องตีที่ทำด้วยโลหะ เช่น ฆ้องวงใหญ่ ฆ้องวงเล็ก ฉาบ ฉิ่ง และเครื่องตีที่ทำด้วยหนัง กลองแขก กลองทัด กลองยาว ตะโพน

- เครื่องเป่า เป็นเครื่องดนตรีที่ทำให้เกิดเสียงจากลมเป่า อุปกรณ์ดั้งเดิมได้จากพืช ไม้แก่ หลอดไม้ต่าง ๆ และจากสัตว์ ไม้แก่ เขาสัตว์ต่างๆ ต่อมาได้มีวิวัฒนาการด้วยการเจาะรูและทำลิ้น เพื่อให้เกิดระดับเสียงได้มาก เครื่องดนตรีเหล่านี้ ได้แก่ ขลุ่ย ปี่ และแคน เป็นต้น

2) แบ่งตามประเภทวงดนตรีไทย

- วงเครื่องสาย มีลักษณะเด่นชัด คือใช้เครื่องดนตรีมีสาย เช่น เครื่องคิด และเครื่องตี เป็นประธานของวง พระเอกในวงได้แก่ ซอด้วง แบ่งออกเป็นเครื่องสายวงเล็ก เครื่องสายเครื่องคู่ เครื่องสายผสม เครื่องใหญ่หรือวงใหญ่

- วงปี่พาทย์ ประกอบด้วยเครื่องตี เครื่องเป่า เครื่องกำกับจังหวะ แบ่งเป็นปี่พาทย์ไม้แข็ง และปี่พาทย์ไม้นวมตามลักษณะไม้ที่ใช้ตี

- วงมโหรี ประกอบด้วยเครื่องตี ตี ตี เป่า เข้ารวมกันหมด แต่จะมีขนาดเล็กกว่าวงเครื่องสายและปี่พาทย์

2.3.2 ประวัติของขลุ่ย



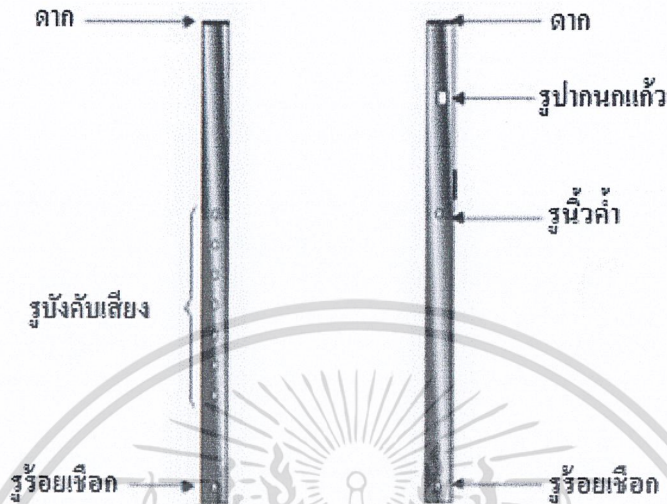
รูปที่ 2.10 ขลุ่ย (เครื่องดนตรีประเภทเป่า)

ขลุ่ยเป็นเครื่องดนตรีดั้งเดิมของไทยชนิดหนึ่ง แต่ว่าจะเป่าเป็นเครื่องดนตรีที่คนไทยคิดประดิษฐ์ขึ้นใช้เอง หรือได้รับอิทธิพลจากชาติอื่นไม่มีหลักฐานปรากฏแน่ชัด เพราะชาติอื่นก็มีเครื่องเป่าซึ่งมีลักษณะคล้ายกับขลุ่ยของคนไทยเหมือนกัน เช่น ขลุ่ยของญี่ปุ่น เรียก ซากุฮาชิ ซึ่งใช้เป่าเหมือนกับขลุ่ยไทย ขลุ่ยของอินเดีย เรียก มุราตี ส่วนของจีนก็มีขลุ่ยเช่นเดียวกัน แต่ใช้เป่าด้านข้างเรียกว่า ฮวยเต็ก ถ้าเป็นแบบที่ใช้เป่าตรงแบบขลุ่ยไทยจะเรียกว่า โถ่งเซียว แต่จะต่างกันตรงที่ขลุ่ยของจีนไม่มีคาก การเป่าต้องใช้การพินลมจึงจะเกิดเสียง

ขลุ่ย ทำด้วยไม้ไผ่ปล้องยาวๆ ไร่ข้อทางปลายแต่เจาะทะลุขลุ่ยอย่างไรให้แห้งแล้วตบแต่งผิวให้ใหม่เกรียมเป็นลวดลายสวยงาม ด้านหน้าเจาะรูกลมๆ เรียงแถวกัน 7 รู สำหรับนิ้วปิดเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียง(รูบั้งคับเสียง) ขลุ่ยไม่มีลิ้นเหมือนปี่ แต่ใช้ไม้อุดเต็มปล้อง แล้วปาดด้านล่างให้มีช่อง ไม้อุดนี้เรียกว่า ดาก ทำด้วยไม้สักเพราะไม่มีจุกมาบังลม



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของขลุ่ย

ด้านหลังได้ดากลงมา เจาะรูเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่ปาดตอนล่างเป็นทางเฉียงไม่เจาะทะลุตรงเหมือนรูด้านหน้า รูที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ เรียกว่า รูปากนกแก้ว ได้รูปากนกแก้วลงมา เจาะรูอีก 1 รู เรียกว่า รูนิ้วค้ำ เพราะเวลาเป่า ผู้เป่าจะใช้หัวแม่มือค้ำปิดเปิดที่รูนี้ เหนือรูนิ้วค้ำด้านหลัง และเหนือรูด้านหน้าทั้งเจ็ดรู แต่อยู่ทางด้านขวา จะมีอีกรูหนึ่งเรียกว่า รูเยื่อ เพราะแต่ก่อนจะใช้เยื่อไม้ไปปิดรูนี้ ต่อมาก็ไม่ค่อยได้ใช้ ตรงปลายเลาขลุ่ยจะเจาะรูให้ซ้ายขวา ตรงกันเพื่อร้อยเชือก เรียกว่า รูร้อยเชือก ปัจจุบันขลุ่ยเป็นเครื่องดนตรีที่มีบทบาทสำคัญ วงดนตรีหลายประเภทจึงขาดขลุ่ยไม่ได้เลยทีเดียว เช่น วงมโหรี วงเครื่องสายชนิดต่างๆ วงปี่พาทย์ไม้นวม วงปี่พาทย์ดึกดำบรรพ์ เป็นต้น

เอกลักษณ์ที่สำคัญของขลุ่ยไทย คือ การทำลายบนเลาขลุ่ยให้เป็นลวดลายต่างๆ ซึ่งการทำลายนั้นอาจมาจากการใช้ความร้อนจากตะกั่วที่หลอมละลาย หรือการลนไฟ เป็นต้น เพื่อให้ขลุ่ยมีความสวยงามมากยิ่งขึ้น เช่น ลายนํ้าไหล ลายหิน ลายกระจับ ลายผ้าปูม ลายดอกจิก เป็นต้น แต่ถ้าผิวของไม้ไผ่ที่นำมาทำขลุ่ยสวยอยู่แล้วอาจไม่ต้องทำลายก็ได้

โดยทั่วไปขลุ่ยไทยสามารถจำแนกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

1. ขลุ่ยหลีบ เป็นขลุ่ยที่มีขนาดเล็กที่สุดในบรรดาขลุ่ยไทยทั้งหมด มีความยาวประมาณ 25 เซนติเมตร มีเสียงสูงกว่าขลุ่ยเพียงออเป็นคู่สี่ คือปิดหมดทุกนิ้วเป่าเป็นเสียงฟา นิยมใช้เป่าในวงมโหรีเครื่องคู่ เครื่องใหญ่ และวงเครื่องสายคู่

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2. ขลุ่ยเพียงออ เป็นขลุ่ยที่นิยมใช้เป่ามากที่สุด มีความยาวประมาณ 45 เซนติเมตร กว้างประมาณ 2.5 เซนติเมตร มีระดับเสียงอยู่ในช่วงปานกลาง เมื่อปิดหมดทุกระยะเป่าเป็นเสียง โด คนทั่วไปนิยมเป่าเล่นใช้ในวงมโหรีหรือวงเครื่องสายต่างๆไป

3. ขลุ่ยอู้เป็นขลุ่ยที่มีขนาดใหญ่มีความยาวประมาณ 60 เซนติเมตร กว้างประมาณ 4 เซนติเมตร เสียงต่ำกว่าขลุ่ยเพียงออสามเสียง คือปิดหมดทุกระยะเป็นเสียงซอล นิยมใช้ในเครื่องเป่าพาทย์ดึกดำบรรพ์ ซึ่งเป็นดนตรีที่มีระดับเสียงต่ำ แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยได้ใช้เนื่องจากหาคนที่มีความชำนาญในการเป่าได้ยาก

4. ขลุ่ยเคียงออ หรือ ขลุ่ยกรวด เป็นขลุ่ยที่มีขนาดใหญ่กว่าขลุ่ยหลิบนแต่เล็กกว่าขลุ่ยเพียงออ มีความยาวประมาณ 40 เซนติเมตร กว้างประมาณ 2.2 เซนติเมตร ระดับเสียงสูงกว่าขลุ่ยเพียงออหนึ่งเสียง แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยนิยมมากนัก

5. ขลุ่ยรองออ เป็นขลุ่ยที่มีขนาดใหญ่กว่าขลุ่ยเพียงออ และมีระดับเสียงต่ำกว่าหนึ่งเสียง อาจจะใช้ในวงมโหรีแทนขลุ่ยเพียงออในกรณีที่ต้องการเสียงต่ำ

6. ขลุ่ยออร์แกน เกิดขึ้นเนื่องจากในระยะหลังวงเครื่องสายได้นำเอาเครื่องดนตรีตะวันตกเข้ามาร่วมเล่นด้วย ซึ่งเรียกว่าวงเครื่องสายผสม เช่น เล่นผสมกับเปียโนหรือออร์แกน เป็นต้น

7. ขลุ่ยนก ขลุ่ยชนิดนี้ใช้เป่าเป็นเพลงไม่ได้ เพราะมีเสียงไม่ครบเสียงดนตรี จึงใช้เป่าเป็นเสียงนกประกอบเพลงที่มีเสียงนก เช่น เพลงตับนก แม่ศรีทรงเครื่อง เป็นต้น

2.3.3 การเกิดเสียงขลุ่ย

เสียงขลุ่ยเกิดจากการสั่นของลำอากาศในกระบอกขลุ่ย เมื่อเป่าลมเข้าไปในรูเป่า จะทำให้อากาศภายในหลอดสั่นสะเทือนออกมาผ่านรูปากนกแก้วของตัวขลุ่ย ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดเสียง และเทียบได้กับลิ้นของขลุ่ย โดยระดับเสียงจะเปลี่ยนจากการเปิดปิดรูบังคับเสียง และมีรูเยื่อที่ใช้เฉพาะปิดเยื่อไผ่ เยื่อขลุ่ยเมื่อได้รับการสั่นสะเทือนของลมที่เป่าเข้าไป จะทำให้ได้เสียงนุ่มนวลและไพเราะ (แต่ขลุ่ยปัจจุบันไม่รูเยื่อไผ่แล้ว)

2.4 ทฤษฎีโกลวน (Chaos Theory)

ทฤษฎีโกลวนเป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงลักษณะพฤติกรรมของระบบพลวัต (Dynamic system) คือ ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป) โดยในความหมายทางวิทยาศาสตร์ คือ สภาพหรือกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพ (unstable) หากมีการกระทบเพียงเล็กน้อย อาจจะทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เป็นเส้นทางคดเคี้ยว วุ่นวายโกลวน หรือในบางครั้งอาจจะเกิดการกระโดดข้าม ดังนั้นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจึงไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายให้ถูกต้องแม่นยำได้ ถึงแม้การเปลี่ยนแปลงของระบบโกลวนที่เรียกว่าเคออสนี่ จะมีลักษณะที่เป็น

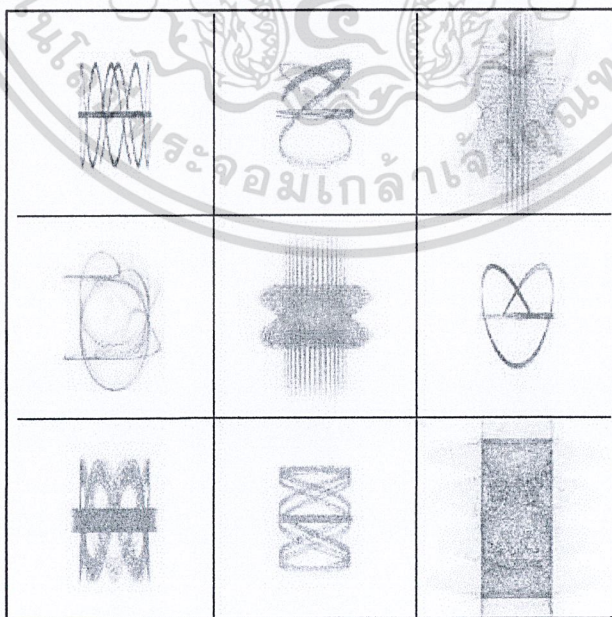
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบสุ่มหรือไร้ระเบียบ แต่จริงๆแล้วพฤติกรรมที่ดูเหมือนเป็นเชิงสุ่มนี้สามารถกำหนดพฤติกรรมได้จากค่าเริ่มต้น หรือเป็นระบบที่เจาะจงพฤติกรรม(deterministic system) นั่นเอง

พฤติกรรมแบบอลวน (Chaotic behavior) เป็นพฤติกรรมที่ดูไร้ระเบียบ ที่ดูเหมือนว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างสะเปะสะปะหรือเชิงสุ่ม (random) แต่เป็นระบบที่เจาะจงพฤติกรรม (Deterministic system) ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งที่จริงแล้วแฝงไปด้วยความเป็นระเบียบ (Order)

ระบบที่มีพฤติกรรมแบบอลวนจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้น (sensitivity dependent on initial condition) ทำให้ไม่สามารถทำนายได้ในระยะยาว (long-term unpredictable) โดยความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการวัดเงื่อนไขเริ่มต้น จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล (exponential) เมื่อเวลาผ่านไป

ในทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ เคออสเกิดจากระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear system) ที่มีความไวต่อค่าเริ่มต้น ถ้าระบบ 2 ระบบนั้นเริ่มต้นจากค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สภาวะของระบบทั้งสองที่เราสังเกตได้เมื่อเวลาผ่านไปจะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นจะเกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อเวลาผ่านไปเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อนเริ่มแรก เนื่องจากมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นพฤติกรรมแบบอลวน (Chaotic behavior) จึงไม่มีในระบบที่เป็นเชิงเส้น เคออสจึงเกิดขึ้นได้เฉพาะกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) แต่ไม่ใช่ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดความอลวนเสมอไป จะมีช่วงพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบประพฤติตัวแบบอลวน แต่ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นบางระบบก็เป็นเคออสตลอดเวลา



รูปที่ 2.12 สัญญาณเคออสรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 คุณลักษณะของระบบที่เป็นแบบอลวน

ระบบที่เป็นแบบอลวน จะต้องประกอบด้วยลักษณะดังต่อไปนี้

1) มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) มีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับคุณสมบัติแบบเป็นเชิงเส้น โดยฟังก์ชัน f จะมีคุณสมบัติเชิงเส้นก็ต่อเมื่อ $f(ax+\beta f) = \alpha f(x) + \beta f(y)$ เมื่อ α และ β เป็นค่าคงที่ นั่นก็คือ ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผลลัพธ์ของระบบทั้งหมดจะไม่เท่ากับผลรวมของผลลัพธ์ที่เกิดจากระบบย่อยรวมกัน ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้เองที่ทำให้ระบบที่แสดงความเป็นอลวนไม่ได้รับการศึกษามากนักในอดีต เพราะค่อนข้างยากในการที่จะศึกษาและเข้าใจ ระบบอลวนจำเป็นต้องเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่นั่นไม่ได้หมายความว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นทุกระบบจะเป็นระบบอลวนเสมอไป

2) ไม่ใช่เกิดแบบสุ่ม (Deterministic not Probabilistic) ในระบบอลวน พฤติกรรมทั้งหลายเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอน สามารถอธิบายได้โดยสมการคณิตศาสตร์ ดังนั้นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม (Randomness) เช่น การโยนลูกเต๋าจึงไม่เป็นความอลวน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเข้าใจผิดว่าความอลวนคือการสุ่ม จึงมีการเรียก Chaos ว่า Deterministic Chaos

3) ไวต่อสภาวะเริ่มต้น (Sensitivity to initial conditions) ในภาวะเริ่มต้นของระบบการเริ่มต้นที่เงื่อนไขต่างกันเพียงเล็กน้อย ก่อให้เกิดผลลัพธ์ในภายหลังที่มีความแตกต่างกันมาก สาเหตุที่ระบบอลวน ไวต่อสภาวะเริ่มต้นก็เพราะว่ามันจะขยายความแตกต่างให้เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่พบบ่อยจะเป็นการขยายความแตกต่างให้เร็วขึ้นในระดับเลขยกกำลัง (exponential) ของเวลา

4) ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าในระยะยาวได้ (Long-term prediction is impossible) เป็นผลสืบเนื่องมาจากความไวต่อสภาวะเริ่มต้น ทำให้ในระยะยาวผลการเปลี่ยนแปลงจะไม่สามารถทำนายได้ แต่อย่างไรก็ตามยังเป็นไปได้ในการทำนายผลในระยะสั้น (Short-term prediction)

นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่น่าสนใจของระบบอลวน คือ การแสดงลักษณะคล้ายตัวเอง (Self similarity) หรือเรียกว่า แฟร็กทัล (Fractal) คุณลักษณะนี้จะปรากฏขึ้นเมื่อทำการแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในระบบพิกัดที่บ่งถึงสภาวะ (phase space) ลักษณะคล้ายตัวเองหมายความว่าไม่ว่าเราจะมองเส้นทางการเคลื่อนที่จากระดับใดก็ตามมันจะมีลักษณะเดียวกัน แต่คุณสมบัตินี้ไม่ได้เป็นเงื่อนไขที่จำเป็นต่อการเกิดสภาวะอลวนแต่อย่างใด เพียงแต่มักพบร่วมกันเท่านั้น

2.4.2 ประโยชน์ของการศึกษาทฤษฎีอลวน

สาเหตุที่การศึกษาทฤษฎีอลวนมีความสำคัญ เนื่องด้วยระบบในธรรมชาติโดยมากมีลักษณะพฤติกรรมแบบอลวน แม้ว่าจะไม่มีวิธีการที่แน่นอนในการตัดสินใจว่า ระบบใดบ้างที่เป็นระบบอลวน ทั้งนี้ก็เพราะเหตุผลหลายๆประการ เช่น มีหลักฐานว่าระบบในธรรมชาติที่เป็นระบบเชิงเส้นจริงๆมีน้อยมาก จนถือได้เลยว่าเป็นข้อยกเว้น แม้แต่กฎของ Hook ที่อธิบายถึงการยืดของสปริงด้วยสมการเชิงเส้น ก็เป็นเพียงการประมาณอย่างหยาบๆ นอกจากนั้นยังพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไม่น้อยที่แสดงคุณสมบัติไวต่อสภาวะเริ่มต้น เมื่อเป็นเช่นนั้นการศึกษาทฤษฎีอลวนจึงเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ส่วนประโยชน์ของการศึกษาทฤษฎีอลวนมีอย่างน้อย 3 ทางด้วยกัน สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1) ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต ดังที่กล่าวมาข้างต้น แม้ว่าจะไม่สามารถทำนายอนาคตของระบบอลวนในระยะยาวได้ แต่เราก็ยังสามารถทำนายอนาคตของมันในระยะสั้นได้ หากเราสามารถหาโมเดลที่อธิบายพฤติกรรมของระบบนั้นได้ และทราบสภาวะเริ่มต้นอย่างแม่นยำพอสมควร เช่น ในปัจจุบัน ใช้แนวคิดของทฤษฎีอลวนทำการวิจัยเพื่อทำนายอนุกรมตามลำดับเวลา (time-series data)

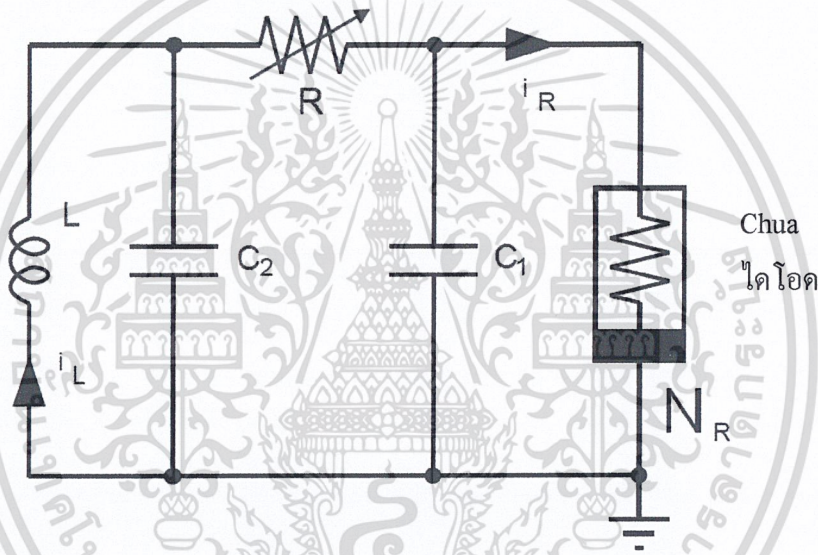
2) ใช้ในการสร้างระบบอลวน เหตุผลที่เราต้องสร้างระบบเคออสขึ้นมาเพราะมีผู้เชื่อว่า “ในธรรมชาติ ความอลวนเป็นสิ่งสากลมากกว่าและดีกว่าระเบียบเรียบร้อย” เช่น เราเคยเชื่อว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับมนุษย์ คือ อุณหภูมิคงที่ แต่มีการทดลองบางชิ้นทำให้ทราบว่า มีอุณหภูมิที่ทำให้มนุษย์รู้สึกสบายตัวกว่า คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมาอย่างอลวนรอบๆจุดๆหนึ่ง แบบที่เรียกกันว่าสั้นแกว่งแบบคาบ แนวคิดนี้นำมาสู่การสร้างเครื่องทำความร้อนของบริษัทซันโย (Sanyo) ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านชิ้นแรกที่ใช้ทฤษฎีอลวน นอกจากนี้บริษัทซัมซุงชิซิตะ (Matsushita) ยังใช้ทฤษฎีอลวนควบคุมหัวฉีดของเครื่องล้างจาน ซึ่งพบว่าสามารถล้างจานได้สะอาด โดยประหยัดน้ำได้มากกว่าเครื่องล้างจานแบบอื่นๆ เพราะเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดที่เหมือนไร้ระเบียบ ทำให้ครอบคลุมพื้นที่ได้ดีกว่าการเคลื่อนที่ตามแบบแผนปกติ

3) ใช้ในการควบคุมหรือสร้างความเสถียรให้กับระบบ การที่ระบบอลวนนั้นไวต่อสภาวะเริ่มต้นมาก การรบกวนเพียงเล็กน้อยจึงอาจก่อให้เกิดผลขยายได้มาก ในงานด้านวิศวกรรมควบคุม (Control engineering) การเติมสัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยที่เหมาะสมสู่ระบบอลวน จึงสามารถใช้ควบคุมให้ระบบนั้นอยู่ในสภาวะเสถียร หรือจับเคลื่อนให้ระบบนั้นไปสู่สภาวะที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แนวคิดนี้ได้แก่ องค์การนาซ่า (NASA) สามารถควบคุมยานอวกาศ ISEE-3 ให้ลอยไปจุดดาวหางที่ต้องการสำรวจ โดยใช้เชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อย และการใช้สัญญาณไฟฟ้าช่วยรักษาโรคหัวใจในกระต่าย ซึ่งช่วยทำให้หัวใจมันเต้นตามจังหวะปกติได้

นอกจากการประยุกต์ใช้หลักๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทฤษฎีอลวนยังสามารถประยุกต์ใช้ได้อีกในหลายสาขา เช่น ในด้านการสื่อสาร เราสามารถใช้สัญญาณอลวนในการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) เพื่อป้องกันการแอบดูข้อมูล หรือใช้หลักการของทฤษฎีนี้ช่วยให้การหาค่าที่ดีที่สุด (optimization) ของฟังก์ชันหนึ่ง ได้ค่าที่ดีที่สุดที่แท้จริง (global optimum) ได้ง่ายขึ้น เพราะความอลวนสามารถช่วยให้หลบการได้ค่าที่ดีที่สุดเฉพาะบริเวณ (local optimum) ได้

2.5 วงจร Chua (Chua's circuit)

การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณออสซิลเลชันโดยใช้ทฤษฎีออสซิลเลชัน มีรูปแบบในการสร้างได้หลากหลายทฤษฎี ซึ่ง Chua's Circuit หรือวงจรแบบ Chua เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างสัญญาณออสซิลเลชันแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นโดย Leon Chua เป็นวงจรสร้างสัญญาณออสซิลเลชันที่นิยมใช้งาน เนื่องจากเป็นวงจรที่ไม่ซับซ้อน สามารถสร้างสัญญาณออสซิลเลชันที่มีความหลากหลาย จากความหลากหลายและเป็นสากลนี้ทำให้วงจร Chua ได้รับความสนใจอย่างมาก สาเหตุสำคัญที่ทำให้วงจร Chua ไม่ซับซ้อน เพราะส่วนประกอบของวงจรประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 อุปกรณ์ และอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีก 1 อุปกรณ์เท่านั้น



รูปที่ 2.13 วงจร Chua

วงจร Chua ได้แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว ได้แก่ ตัวเก็บประจุ 2 ตัว (C_1 , C_2), ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว (L), ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว (R) คู่ร่วมกับอุปกรณ์ ตัวตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (N_R) ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการแสดงคุณลักษณะได้ตามสมการที่ (2.2)

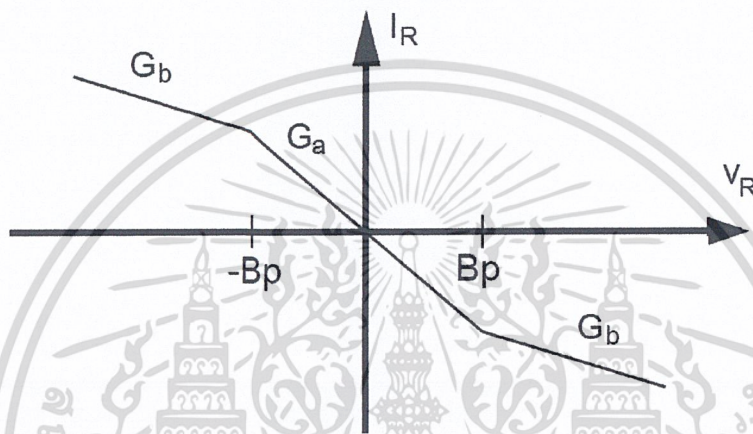
$$\begin{aligned} C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} &= \frac{1}{R}(V_{C_2} - V_{C_1}) - f(V_{C_1}) \\ C_2 \frac{dV_{C_2}}{dt} &= \frac{1}{R}(V_{C_1} - V_{C_2}) + i_L \\ L \frac{di_L}{dt} &= -V_{C_2} \end{aligned} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$f(V_R) = G_b V_R + \frac{1}{2} (G_a - G_b) (|V_R + B_p| - |V_R - B_p|) \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) เป็นการแสดงคุณลักษณะของตัวต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Chua ไคโอค) โดยมีความชันภายในและภายนอกเป็น G_a , G_b และจุดแรงดันพังทลาย (breakpoint) อยู่ที่ $V_R = -B_p$ และ $V_R = B_p$ (อาจเรียกว่าเป็นจุดสิ้นสุดช่วงเวลาที่เป็นเชิงเส้น)



รูปที่ 2.14 ช่วงความชันของ Chua ไคโอค

สมการอนุพันธ์ (differential equation) ดังที่แสดงในสมการที่ (2.2) จัดเป็น autonomous dynamical system ซึ่งแสดงว่าเมื่อไม่มีการส่งสัญญาณจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ระบบจะดำเนินไปเรื่อยๆ ตามคุณสมบัติธรรมชาติ (natural dynamics) เมื่อ R , L และ (C_1, C_2) ในวงจร Chua มีค่าเป็นบวกจุดที่แสดงถึงพลังงานสะสม ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำงานเพื่อกำเนิดสัญญาณ (oscillate) และเป็นตัวเดียวที่จะทำให้เกิดความอลวน โดยที่ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ตัวอื่นในวงจร (passive linear elements) ในขณะที่ตัวต้านทานจะได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟ

เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรในของสมการสถานะ (state equation) ในสมการที่ (2.2) ให้อยู่ในรูปที่ไม่มีมิติ (dimensionless) จะได้ดังนี้

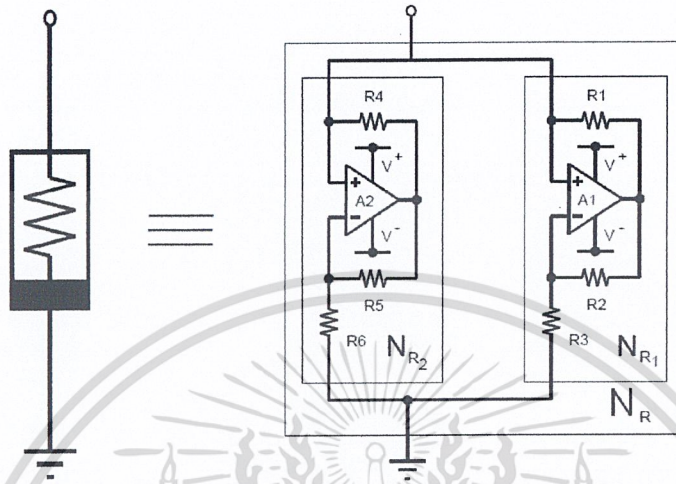
$$\frac{dx}{dt} = a(y - x - f(x)) \quad (2.4)$$

$$\frac{dy}{dt} = b(x - y + z) \quad (2.5)$$

$$\frac{dz}{dt} = -cy \quad (2.6)$$

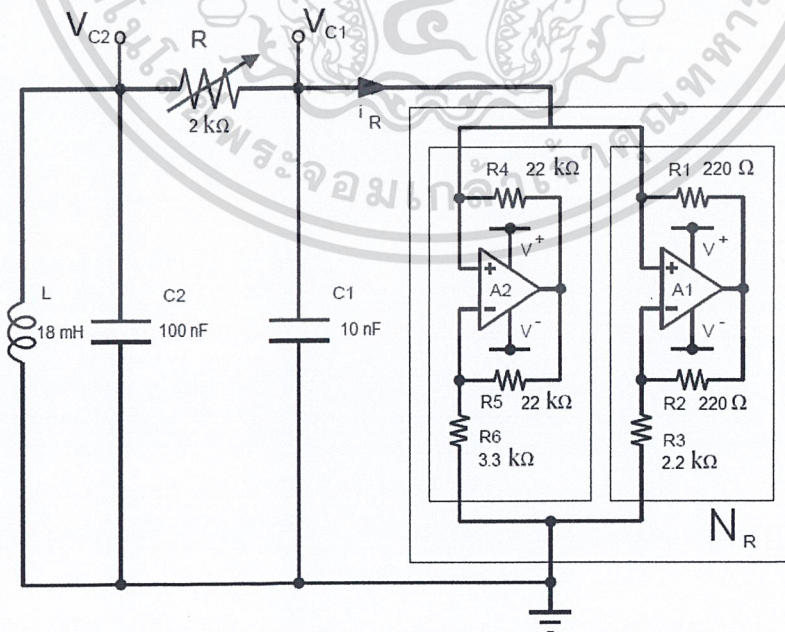
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.13 วงจร Chua มีตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในวงจร Chua มักจะเรียกว่า Chua ไดโอด โดย Chua ไดโอดจะมีคุณลักษณะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear characteristic) ซึ่งสามารถสร้างได้โดยใช้ออปแอมป์ (OP-AMP)



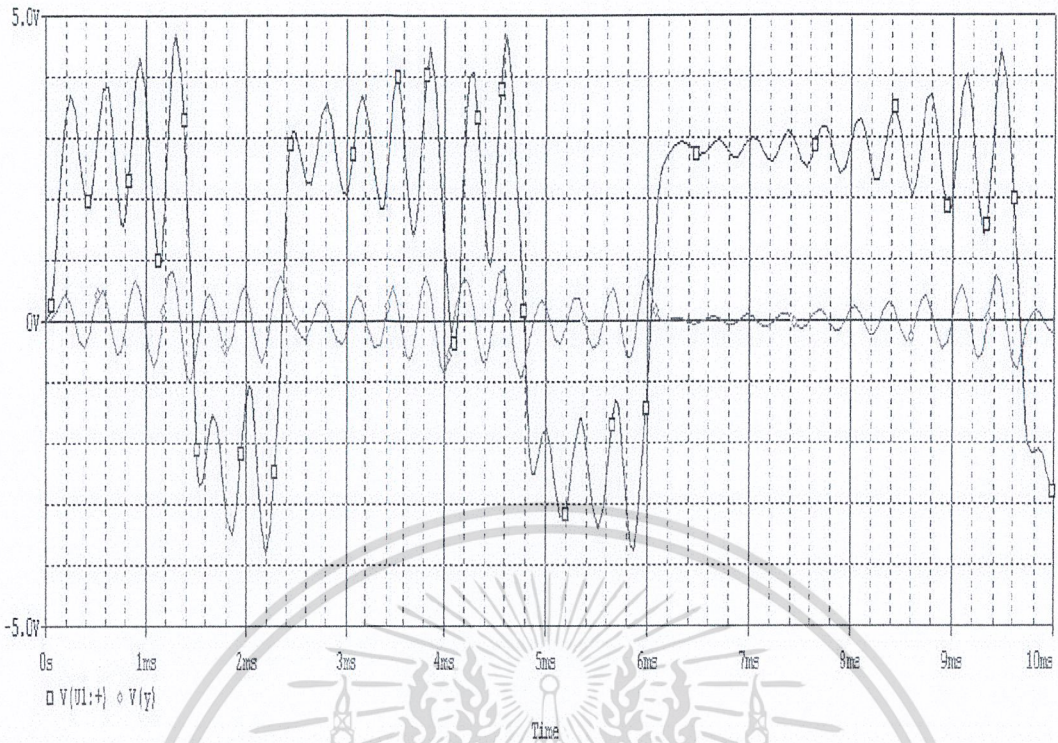
รูปที่ 2.15 Chua ไดโอด

สำหรับตัวอย่างของวงจร Chua ที่ใช้ออปแอมป์ แสดงดังรูป 2.16 ซึ่งนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ และสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยที่ความต่างศักย์ที่ V_{C1}, V_{C2} เทียบกับเวลาจากวงจรรูปที่ 2.16 จะแสดงในรูปที่ 2.17 และเมื่อนำเอาความต่างศักย์ V_{C1}, V_{C2} มาเปรียบเทียบกันแสดงในรูปที่ 2.18

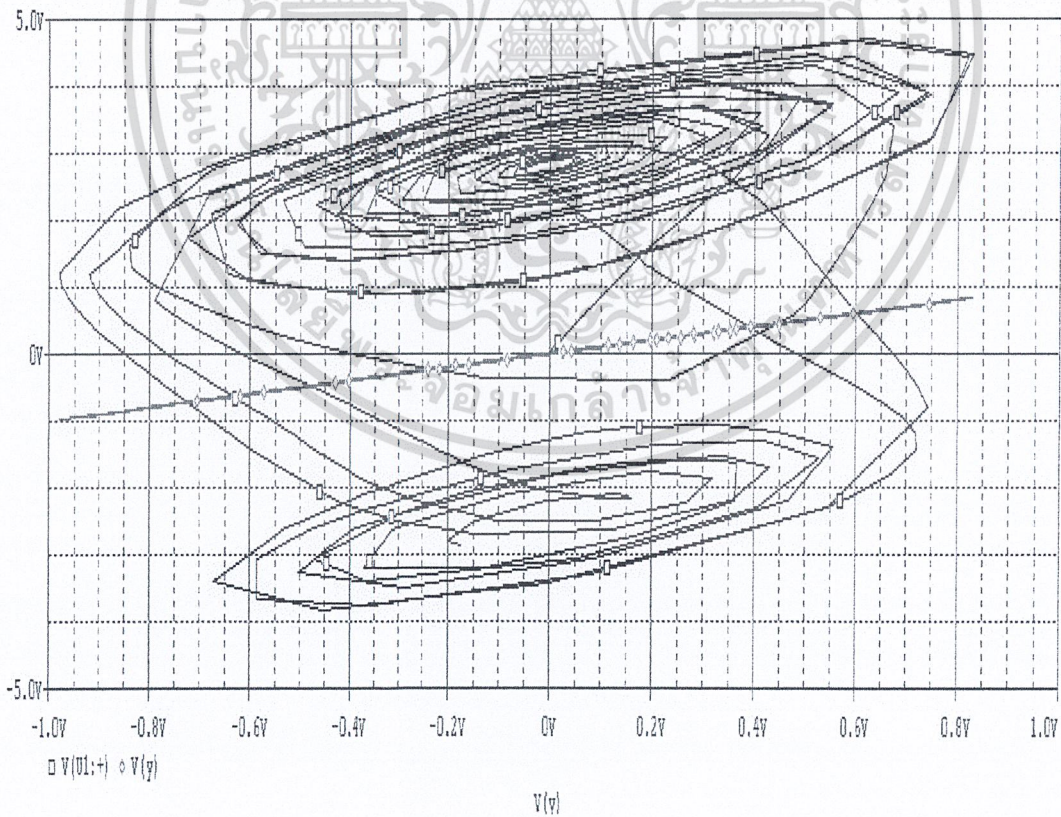


รูปที่ 2.16 ตัวอย่างวงจร Chua ที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 สัญญาณอลวนจาก V_{C1}, V_{C2} เมื่อเทียบกับเวลา



รูปที่ 2.18 สัญญาณอลวนเมื่อ V_{C1} เป็นแกน y และ V_{C2} เป็นแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Inductance simulation)

ตัวเหนี่ยวนำในเนตเวิร์ค หรือ วงจรใดๆ สามารถใช้อุปกรณ์ RC แทนได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำเลย ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า การสังเคราะห์ความเหนี่ยวนำ (synthetic inductors)

การสังเคราะห์ความเหนี่ยวนำ (Synthetic inductors)

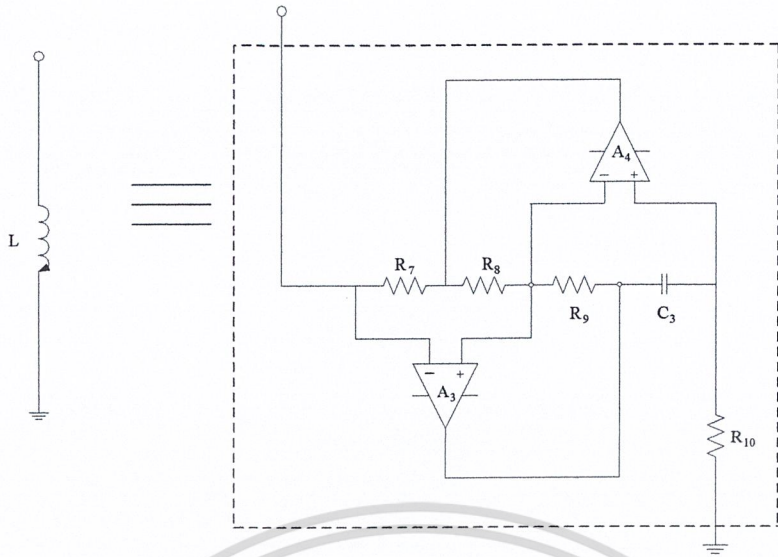
จากรูปด้านล่าง ตัวเก็บประจุ C_4 และทำการแทน Z_i ($i=1,2,3,5$) ด้วย ตัวต้านทาน R จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.16)

$$Z_{in}(s) = \frac{sR_1R_3C_4R_5}{R_2} ; \quad L_{eq} = \frac{R_1R_3C_4R_5}{R_2} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.19 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (inductance simulation)

ในการศึกษาครั้งนี้ เราต้องการวงจรกำเนิดสัญญาณอนวน ที่ให้กำเนิดความถี่เสียงในหลายระดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นหากต้องการ $L=42\text{H}$ สามารถใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนได้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน (inductance simulation) ที่นำมาใช้แทนตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง

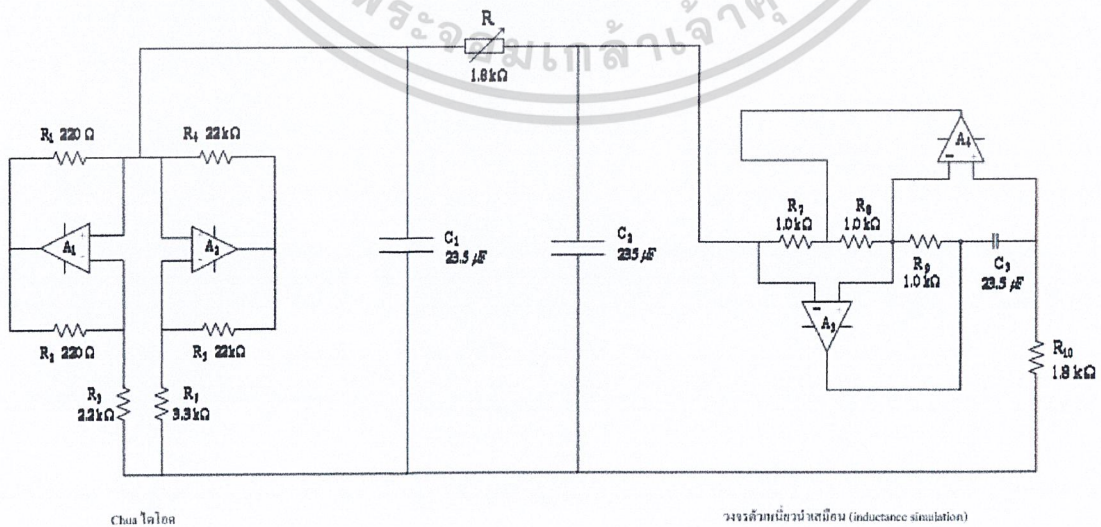
ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.8)

$$L_{eq} = \frac{R_7 R_9 R_{10} C_3}{R_8} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) นั้นถ้าต้องการ $L = L_{eq} = 42.3\text{H}$ แล้ว

ค่า $R_7 = 1.0\text{k}\Omega$, $R_8 = 1.0\text{k}\Omega$, $R_9 = 1.0\text{k}\Omega$, $R_{10} = 1.8\text{k}\Omega$ และค่า $C_3 = 23.5\mu\text{F}$

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่มีความถี่ต่ำ โดยใช้วงจร Chua จะได้ดังรูปที่ 2.14



Chua ไดโอด

วงจรถ่ายแทนตัวเหนี่ยวนำเสมือน (inductance simulation)

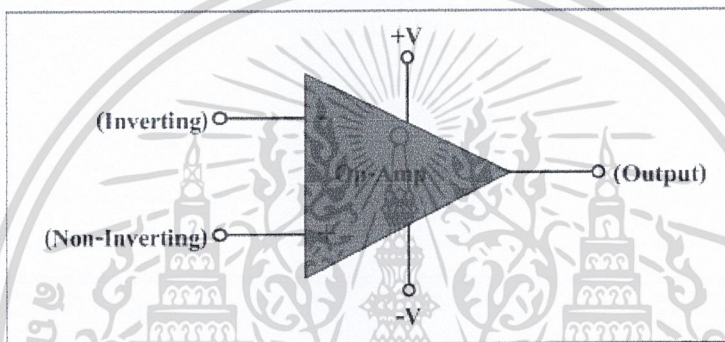
รูปที่ 2.21 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบความถี่ต่ำ โดยใช้วงจร Chua

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ออปแอมป์ (Op-Amp)

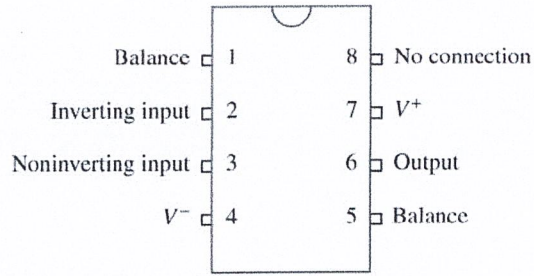
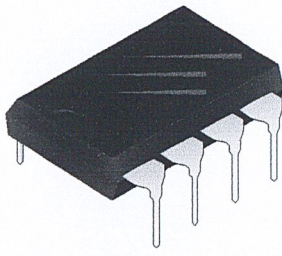
ออปแอมป์ (Op-Amp : Operational amplifiers) มีส่วนสำคัญในการสร้างวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างภายในประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำอยู่หลายชนิด เช่น อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์(BJT) อุปกรณ์มอสเฟต(MOSFET) อุปกรณ์ไดโอด(Diode) และตัวต้านทาน(R) โดยอุปกรณ์ทั้งหมดนี้จะถูกประกอบและต่อรวมกันอยู่ในรูปของวงจรรวมที่เรียกว่า ไอซี (IC : Integrated Circuit) ซึ่งวงจรรวมที่ได้นี้จะมีลักษณะเป็นวงจรรขยายสัญญาณ โดยมีอัตราการขยายแรงดันที่สูง หรือที่เรียกว่า Voltage Gain ซึ่งเราสามารถเขียนสัญลักษณ์ของออปแอมป์ที่แสดงถึงลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของออปแอมป์(Op-Amp)ได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของออปแอมป์(Op-Amp)

สัญลักษณ์ของออปแอมป์ที่แสดงดังรูป มีขาที่ต่อใช้งานคือ

- 1) ขา Non-Inverting เป็นขาอินพุตของออปแอมป์ ใช้ป้อนสัญญาณที่เป็นได้ทั้งสัญญาณไฟกระแสดตรงและสัญญาณไฟกระแสสลับ ซึ่งสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าไปที่ขา Non-Inverting นี้ จะได้สัญญาณที่ไม่กลับเฟสออกมาทางขาเอาต์พุต
- 2) ขา Inverting เป็นขาอินพุตของออปแอมป์ ใช้ป้อนสัญญาณ ที่เป็นได้ทั้งสัญญาณไฟกระแสดตรงและสัญญาณไฟกระแสสลับ ซึ่งสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าไปที่ขา Inverting นี้ จะได้สัญญาณที่ตรงกันข้ามหรือกลับเฟสออกมาทางขาเอาต์พุต
- 3) ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ จะบอกถึงสภาวะการทำงานของออปแอมป์ ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการที่เราทำการป้อนสัญญาณเข้าที่ขาอินพุตทั้งสองขาของออปแอมป์
- 4) +V เป็นขาที่ใช้ป้อนไฟบวก โดยจะมีค่าแรงดันไฟประมาณ 9 โวลต์ ถึง 18 โวลต์ โดยทั่วไปแล้วเราจะใช้แรงดันไฟประมาณ 15 โวลต์
- 5) -V เป็นขาที่ใช้ป้อนไฟลบ โดยจะมีค่าแรงดันไฟประมาณ -9 โวลต์ ถึง -18 โวลต์ โดยทั่วไปแล้วเราจะใช้แรงดันไฟประมาณ -15 โวลต์



รูปที่ 2.23 ออปแอมป์ที่อยู่ในรูปของ IC

ออปแอมป์ มีต้นกำเนิดในคอมพิวเตอร์อนาล็อกที่สามารถนำมาใช้ในการขยายสัญญาณรวมสัญญาณหรือนำมาทำเป็นตัวกระทำทางคณิตศาสตร์

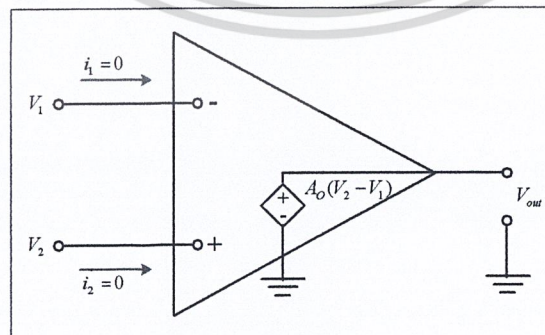
2.7.1 คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ (Ideal Op-Amp)

- 1) อัตราขยายของออปแอมป์แบบเปิดลูป (Open Loop Gain) มีค่าสูงมากจนเป็นอนันต์ (A_{vol} เท่ากับอนันต์)
- 2) Z_{in} หรือ R_{in} มีค่าสูงมากจนถือได้ว่าเป็นอนันต์
- 3) Z_{out} มีค่าต่ำมากจนถือได้ว่าเป็นศูนย์
- 4) อัตราขยายของออปแอมป์ไม่ขึ้นกับความถี่
- 5) เมื่อ V_{in} เท่ากับศูนย์ จะได้ V_{out} เป็นศูนย์ด้วย

จากคุณสมบัติดังกล่าว มีผลสืบเนื่องดังนี้

- 1) I_{in} เท่ากับศูนย์ เนื่องจาก Z_{in} สูงมาก
- 2) ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์เป็นศูนย์เนื่องจาก $I_{in} Z_{in} = 0$

2.7.2 วงจรสมมูลของออปแอมป์ในอุดมคติ



รูปที่ 2.24 ลักษณะของวงจรสมมูลของออปแอมป์ในอุดมคติ

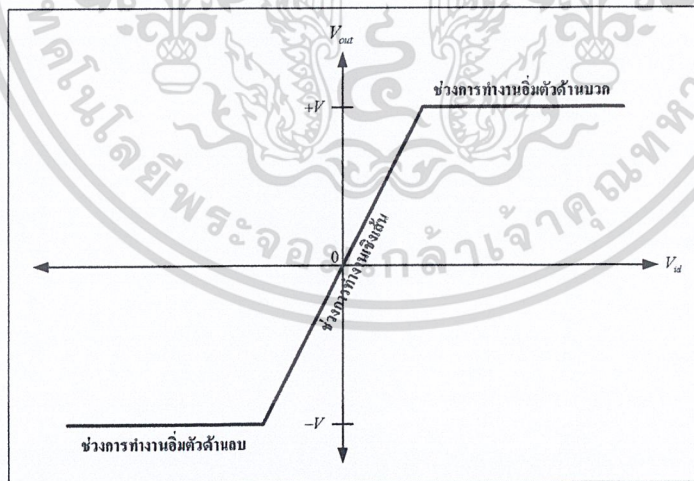
จากรูปที่ 2.24 จะเป็นลักษณะของวงจรมุมของออปแอมป์ในอุดมคติ ซึ่งถ้าพิจารณา ดูแล้วจะพบว่า ขาบวก(+) และขาลบ(-) ต่อไม่ครบวงจร จึงส่งผลให้กระแส (i_1) และกระแส (i_2) นั้นไม่สามารถที่จะไหลออกจาก (V_1) และ (V_2) ได้ ซึ่งหมายความว่าค่าของกระแสที่ไหลเข้าขา อินพุตของออปแอมป์ทั้งสองขานั้นมีค่าเป็นศูนย์นั่นเอง หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือไม่มีกระแสที่ ไหลเข้าที่ขาอินพุตของออปแอมป์ และถ้าพิจารณาถึงค่าของความต้านทานที่ขาอินพุตของออป แอมป์ หรือค่าความต้านทานอินพุต ก็จะพบว่าจะมีค่าเป็นอนันต์ และในส่วนของอัตราขยาย แรงดันรูปเปิด หรือที่เราเรียกว่า (Open-Loop-Gain : A_o) จะมีค่าเป็นอนันต์ ค่าความต้านทาน เอาต์พุตจะมีค่าเป็นศูนย์ จากวงจรมุมของออปแอมป์ในอุดมคติ เราสามารถเขียนสมการของ แรงดันระหว่างขาอินพุต (V_{id}) ได้ ดังสมการที่ (2.9)

$$V_{id} = V_2 - V_1 \quad (2.9)$$

และในส่วนของสมการของแรงดันเอาต์พุต (V_{out}) ก็สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.10)

$$V_{out} = A_o \times V_{id} = A_o \times (V_2 - V_1) \quad (2.10)$$

โดยที่ A_o คือ อัตราขยายแรงดันรูปเปิด



รูปที่ 2.25 กราฟแสดงช่วงการทำงานของออปแอมป์

จากรูปที่ 2.25 นั้นจะเป็นกราฟที่แสดงถึงช่วงการทำงานของออปแอมป์ โดยจะแบ่งออก ได้เป็น 3 ช่วงการทำงาน คือ

- ช่วงการทำงานในสภาวะอิ่มตัวด้านบวก หรือเรียกว่า (Positive Saturation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงการทำงานในสถานะอิ่มตัวด้านลบ หรือเรียกว่า (Negative Saturation)

- ช่วงการทำงานในสถานะเชิงเส้น หรือเรียกว่า (Linear Region)

จากช่วงการทำงานของออปแอมป์ทั้ง 3 ช่วงการทำงานนั้น เราก็จะเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขาอินพุต (V_{id}) กับแรงดันเอาต์พุต (V_{out}) โดยเราสามารถที่จะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ช่วงการทำงานในสถานะอิ่มตัวด้านบวก (Positive Saturation) เขียนได้ดังสมการที่ (2.11)

$$V_{out} = +V \quad (2.11)$$

ช่วงการทำงานในสถานะอิ่มตัวด้านลบ (Negative Saturation) เขียนได้ดังสมการที่ (2.12)

$$V_{out} = -V \quad (2.12)$$

ช่วงการทำงานในสถานะเชิงเส้น (Linear Region) เขียนได้ดังสมการที่ (2.13)

$$V_{out} = A_o \times V_{id} \quad (2.13)$$

2.7.3 คุณสมบัติของออปแอมป์ในทางปฏิบัติ

1) สถานะอิ่มตัวของเอาต์พุต (Output Saturation)

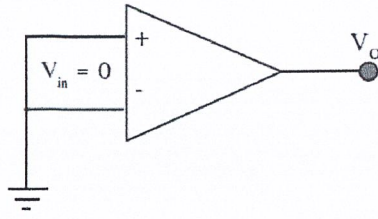
$$V_{in(sat)} = V_{sat}/A_{vol} \quad (2.14)$$

เมื่อ $V_{in(sat)}$ เป็นแรงดันอินพุตต่ำสุดที่ทำให้เอาต์พุตถึงจุดอิ่มตัว

2) Output Offset Voltage

ในกรณี อุดมคติจาก
$$V_o = A_{vol}(V_{in+} - V_{in-}) \quad (2.15)$$

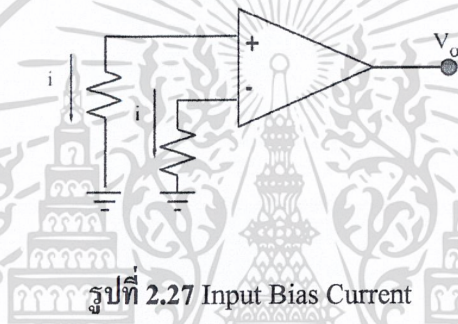
ในกรณี ไม่ใช่อุดมคติ เมื่อ $V_{in+} = V_{in-}$ แล้ว V_o ไม่เป็นศูนย์



รูปที่ 2.26 Output Offset Voltage กรณี ไม่ใช่จุดมคติ

3) Input Bias Current

กระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าต่ำ จะไหลออกหรือไหลเข้าขาอินพุตของออปแอมป์นี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของทรานซิสเตอร์ที่ใช้สร้าง ปกติอยู่ระหว่าง 0.1 pA - 0.1 uA



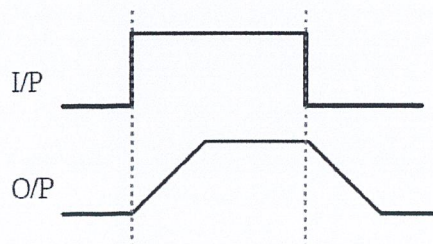
รูปที่ 2.27 Input Bias Current

4) Open-loop Gain and Frequency Response

โปรดักต์แบนด์วิดท์ของอัตรายาย (Gain Bandwidth Product, G-B Product) โดยใช้สัญลักษณ์ F_t หรือ F_u เป็นความถี่ที่มีอัตรายายหนึ่งเท่า ปกติออปแอมป์จะมี G-B Product ในช่วง 100 kHz ถึง ระดับ MHz และสูงกว่านี้สำหรับออปแอมป์ชนิดพิเศษ

5) อัตราการสลูว์ (Slew Rate)

ตัวอย่างเช่น LM741 มีค่า Slew rate = 0.5 V/uSec หมายถึง เอาต์พุตเปลี่ยนจาก 0 โวลต์ ไปเป็น 12 โวลต์ ใช้เวลา 24 uSec สำหรับ Step input



รูปที่ 2.28 อัตราการสลูว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

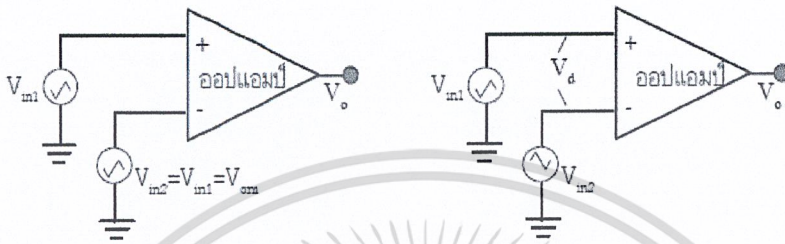
6) Common Mode Rejection Ratio, CMRR

$$CMRR = AVD/AVCM$$

$$CMRR(dB) = 20\log AVD/AVCM \text{ dB}$$

$$\text{Common Inputs } V_{cm} = V_{in1} = V_{in2}$$

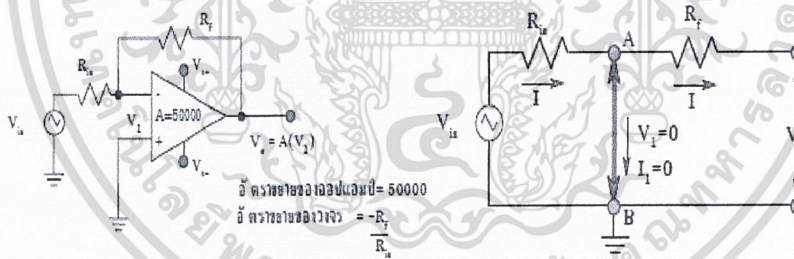
$$\text{Differential Inputs } V_d = V_{i1} - V_{i2}$$



รูปที่ 2.29 Common Mode Rejection Ratio

7) กราวด์เสมือน (Virtual Ground)

อินพุตของออปแอมป์เปรียบเสมือน Short Circuit เนื่องจาก $V_1=0$ แต่ไม่ได้เป็นกราวด์จริงๆ เพราะ V_{in} ไม่ได้ไหลผ่าน R_{in} ลงกราวด์



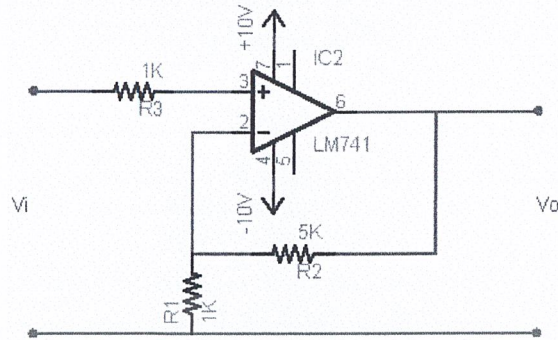
รูปที่ 2.30 วงจรกราวด์เสมือน

2.7.4 การใช้ออปแอมป์ในวงจรขยายสัญญาณ

1) วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier) จะขยายสัญญาณโดยให้สัญญาณขาออกที่มีเครื่องหมายเดียวกับสัญญาณขาเข้า ตัวอย่างการนำไปใช้ เช่น ใช้เป็น proportional controller ในระบบควบคุมอัตโนมัติ เป็นต้น จากรูปที่ 2.31 แสดง schematic ของวงจร Non-inverting Amplifier จากวงจรนี้ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก V_o ต่อ แรงดันขาเข้า V_i ดังสมการที่ (2.16)

$$V_o = (1 + (R_2/R_1))(V_i) \quad (2.16)$$



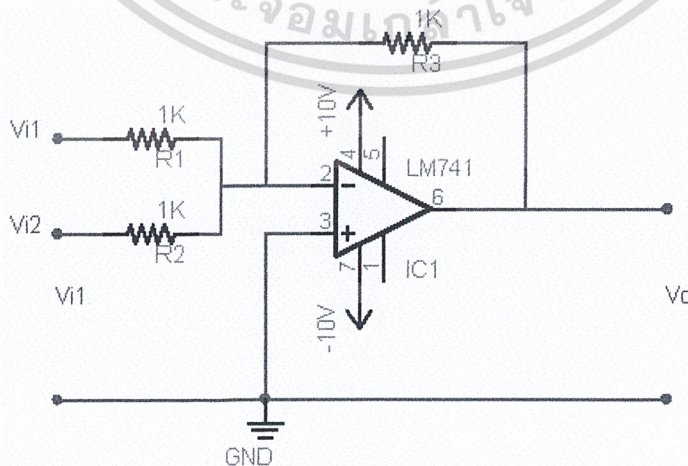
รูปที่ 2.31 Schematic diagram ของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

2) วงจรรวมสัญญาณ (Adder)

วงจรรวมหรือ Adder จะให้สัญญาณขาออกที่เป็นผลรวมของสัญญาณขาเข้าตั้งแต่สองขาขึ้นไป ตัวอย่างการนำไปใช้ เช่น ใช้เป็น Summing junction ในระบบควบคุมอัตโนมัติ เป็นต้น รูปที่ 2.30 แสดง schematic ของวงจร วงจรรวมสัญญาณ ให้ความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก V_o ต่อแรงดันขาเข้า V_1 และ V_2 ดังสมการที่ (2.17)

$$V_o = - ((R_3/R_1)V_1 + (R_3/R_2)V_2) \quad (2.17)$$

สังเกตว่า แรงดันขาออกจะเป็นค่าติดลบของผลบวก ถ้าต้องการไม่ให้มีค่าติดลบ จะต้องนำไปต่อกับ inverting amplifier ซึ่งจะได้กล่าวถึงเป็นวงจรต่อไป

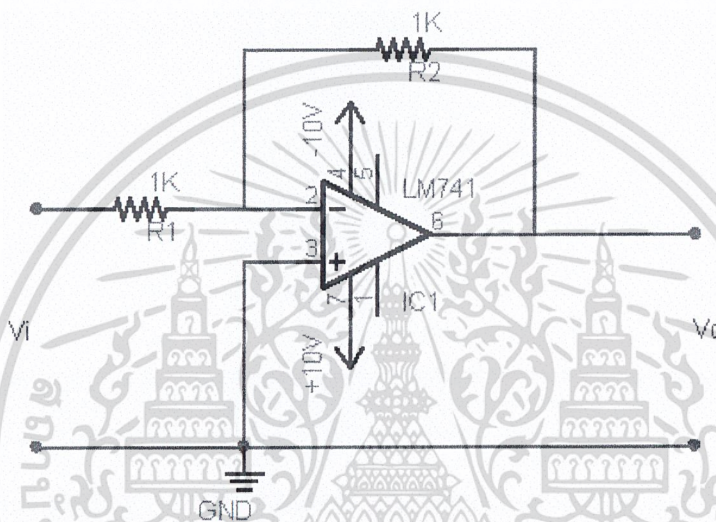


รูปที่ 2.32 Schematic diagram ของวงจรรวมสัญญาณ

3) วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Op-Amp)

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting amplifiers) จะให้ขยายสัญญาณโดยให้สัญญาณขาออกที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับสัญญาณขาเข้า รูปที่ 2.33 แสดง schematic ของวงจร วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสให้ความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก V_o ต่อแรงดันขาเข้า V_i ดังสมการที่ (2.18)

$$V_o/V_i = - (R_2/R_1) \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.33 Schematic diagram ของวงจร inverting amplifier

2.7.5 ออปแอมป์ที่ใช้ในการออกแบบวงจร (LF 351)

LF 351 มีอินพุตเป็น JFET ซึ่งใช้กระแสเพียงเล็กน้อย ทำให้ดึงกระแสจากต้นทางไม่มากและยังทำให้มี offset ต่ำช่วยป้องกันไฟรั่วที่ขาเอาต์พุต

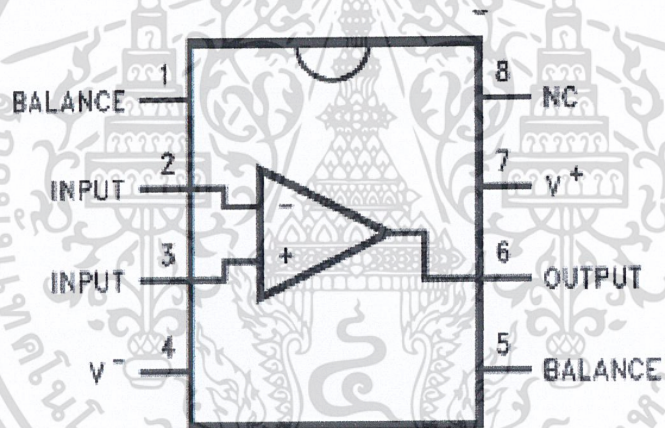
1) คุณสมบัติของ LF 351

- Internally trimmed offset voltage	10 mV
- Low input bias current	50 pA
- Low input noise voltage	25 nV/0Hz
- Low input noise current	0.01 pA/0Hz
- Wide gain bandwidth	4 MHz
- High slew rate	13 V/ms
- Low supply current	1.8 mA
- High input impedance	1012X
- Low total harmonic distortion $A_v = 10$,	<0.02%

- $R_1 = 10k$, $V_o = 20$ Vp-p, $BW = 20$ Hz - 20 kHz
- Low 1/f noise corner 50 Hz
- Fast settling time to 0.01% 2 us

2) ขาของไอซี LF 351

- ขาที่ 1 Balance (offset Null)
- ขาที่ 2 อินพุตขาลบ
- ขาที่ 3 อินพุตขาบวก
- ขาที่ 4 แรงดันป้อนเลี้ยงไอซีทางลบ
- ขาที่ 5 Balance (offset Null)
- ขาที่ 6 เอาต์พุต
- ขาที่ 7 แรงดันป้อนเลี้ยงไอซีทางบวก
- ขาที่ 8 NC



รูปที่ 2.34 ขาการใช้งานของไอซี LF351

2.8 OTA (Operation Transconductance Amplifier)

OTA จัดเป็นวงจรขยายที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มาเป็นกระแสไฟฟ้า โดยมีลักษณะการทำงานเป็นแรงดันไฟฟ้าควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Voltage Control Current Source) ซึ่งวงจรสมมูลทางอุดมคติ สัญลักษณ์และวงจรภายในของ OTA ที่สร้างจากทรานซิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.33 คุณสมบัติของ OTA นั้นจะมีอิมพีแดนซ์ทางอินพุตและเอาต์พุตสูงโดยในทางอุดมคติจะมีค่าเป็นอนันต์ จากวงจรสมมูลทางอุดมคติของ OTA เห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าทางเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงตามความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต อัตราการขยายความนำกระแสไฟฟ้าทางเอาต์พุตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.19) อัตราการขยายความนำกระแสไฟฟ้านี้สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ (2.20)

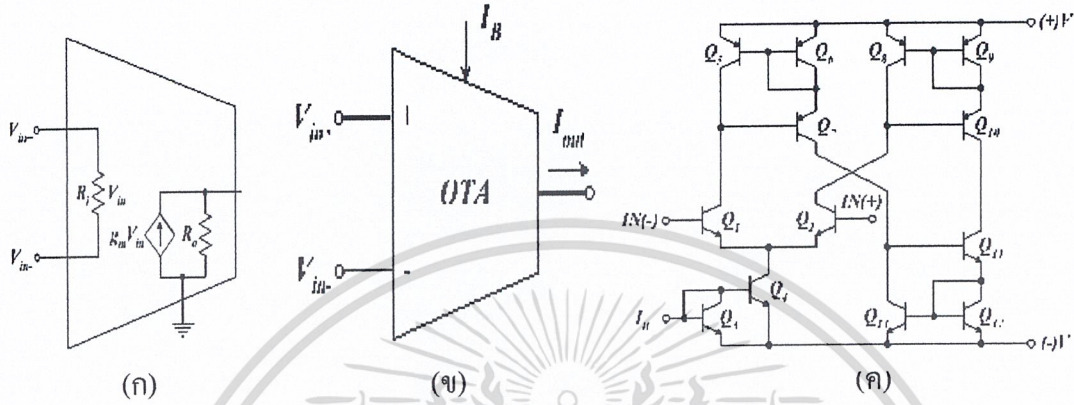
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{out} = g_m (V_{in+} - V_{in-}) \quad (2.19)$$

$$g_m = hI_B \approx I_B / 2V_T \quad (2.20)$$

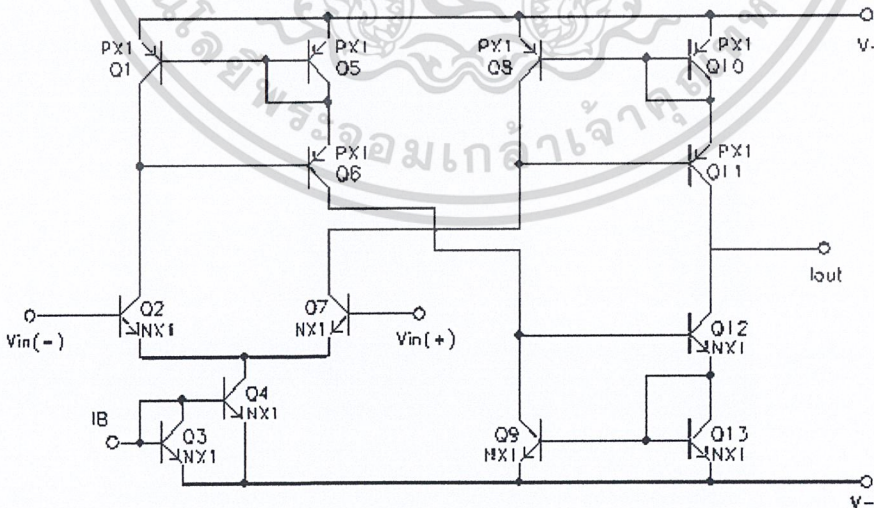
2.8.1 โครงสร้างของ OTA และความถี่เบื้องต้น



รูปที่ 2.35 โครงสร้างและความถี่เบื้องต้นของ OTA

(ก) วงจรสมมูลทางอุดมคติของ OTA , (ข) สัญลักษณ์ของ OTA , (ค) วงจรภายในของ OTA

โครงสร้างภายในของ OTA จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ *PR100N-1X PNP Transistor (PX1) จำนวน 6 ตัว และ *NR100N-1X NPN Transistor (NX1) จำนวน 7 ตัว บรรจุอยู่ใน IC โดยแต่ละขานี้ก็มีคุณลักษณะการต่อใช้งานที่แตกต่างกันไป แสดงดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 โครงสร้างและลักษณะของ OTA ที่นำมาใช้งาน

2.8.2 การประยุกต์ใช้ OTA (OTA Application)

การนำ OTA ไปประยุกต์ใช้งานสามารถทำหน้าที่ได้อย่างหลากหลาย เช่น วงจรขยายสัญญาณ วงจรกรองความถี่ วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรความต้านทานแปรผันตามแรงดันไฟฟ้า วงจรคูณสัญญาณอนาล็อก เป็นต้น สำหรับวงจรขยายพื้นฐานโดยใช้ OTA โดยทั่วไปการต่อใช้งาน OTA ในวงจรขยายนั้นสามารถต่อเป็นวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและวงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรามักจะเห็นการต่อได้ 2 รูปแบบใหญ่ คือ การต่อวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสและการต่อวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

1) วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสมีลักษณะดังรูปที่ 2.37 การต่อ OTA แบบวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสนี้ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตจะต่อเข้าที่ขา (-) และขา (+) ต่อดงกราวด์ สัญญาณเอาต์พุตจะต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต และถูกขยายขึ้นจากคุณสมบัติพื้นฐานของ OTA ค่า I_{out} สามารถหาได้จากสมการที่ (2.21)

$$I_{out} = -g_m \times V_{in} \quad (2.21)$$

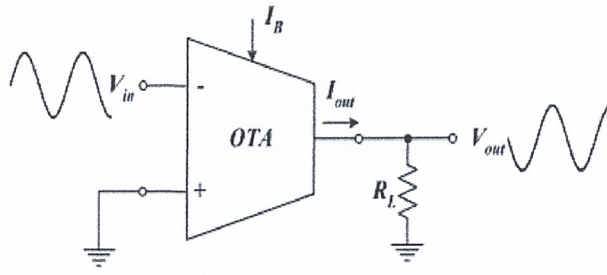
และสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (V_{out}) ของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส หรือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ R_L ได้จากสมการที่ (2.22)

$$V_{out} = -g_m \times V_{in} \times R_L \quad (2.22)$$

อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (V_{out}) กับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต (V_{in}) คืออัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (A_v) ของวงจร หาได้จากสมการที่ (2.23)

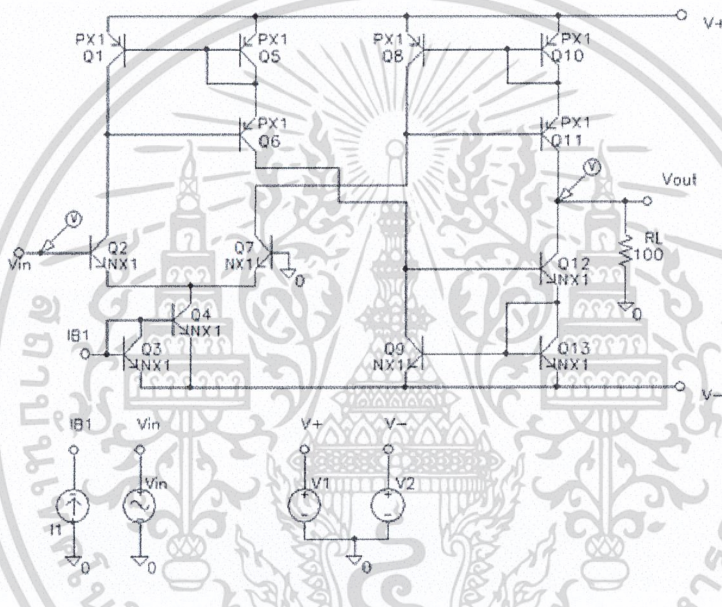
$$A_v = V_{out} / V_{in} = -g_m \times R_L \quad \text{เมื่อ } g_m = hI_B \quad (2.23)$$

เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) มีค่าเท่ากับ R_L จะเห็นได้ว่าเราสามารถกำหนดอัตราขยายได้โดยกำหนดจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ I_B และ R_L ได้

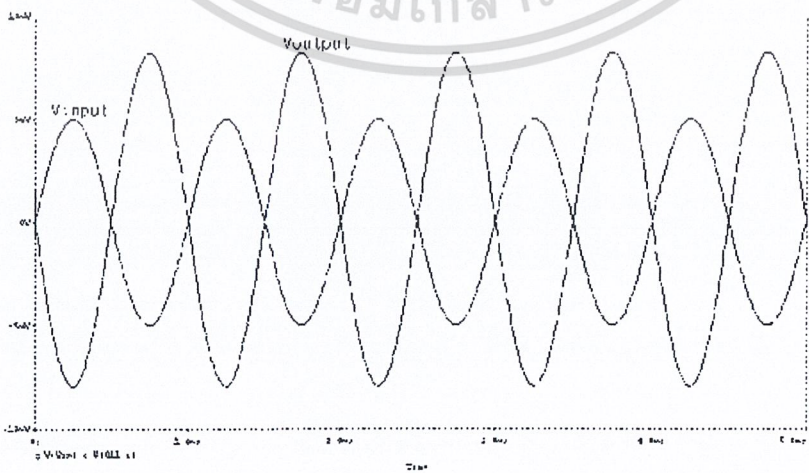


รูปที่ 2.37 วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ OTA แบบกลับเฟส

ตัวอย่างการจำลองการทำงานของ OTA โดยใช้โปรแกรม PSpice



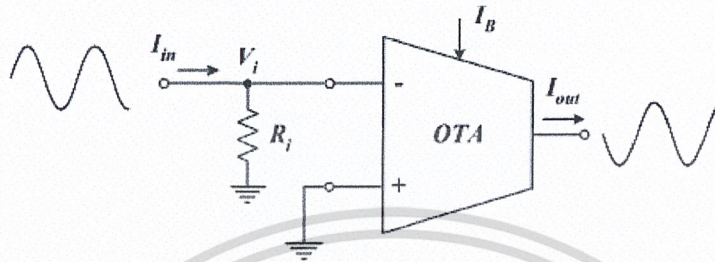
รูปที่ 2.38 วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟส



รูปที่ 2.39 ผลที่ได้จากการทำงานแบบ Time Domain จากวงจรรูปที่ 2.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้ถูกขยายขึ้นแต่มีการกลับเฟสกันอยู่เท่ากับ 180 องศา และมีอัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามค่าของ RL และค่า g_m นอกจากนี้ วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสแล้ว ยังมีวงจรขยายกระแสไฟฟ้าแบบกลับเฟสที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.40



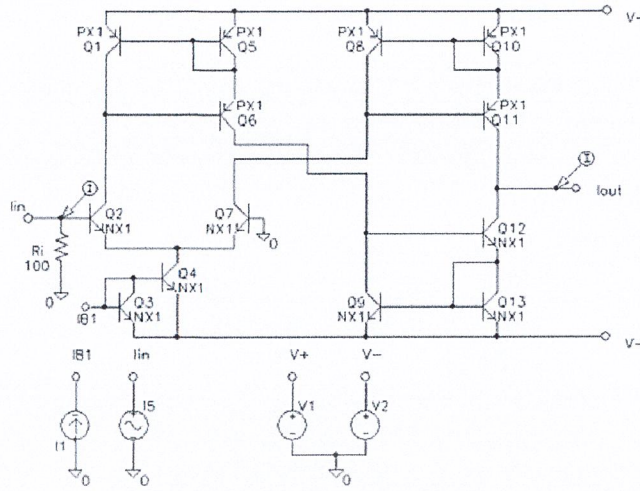
รูปที่ 2.40 วงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบกลับเฟสที่ใช้ OTA

วงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบกลับเฟสนี้ มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านอินพุตเป็นอนันต์ โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าที่ขั้วลบเป็นศูนย์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต (I_{in}) จะไหลไปที่ตัวต้านทาน R_i ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R_i ทำให้เราได้ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (I_{out}) ดังสมการที่ (2.24)

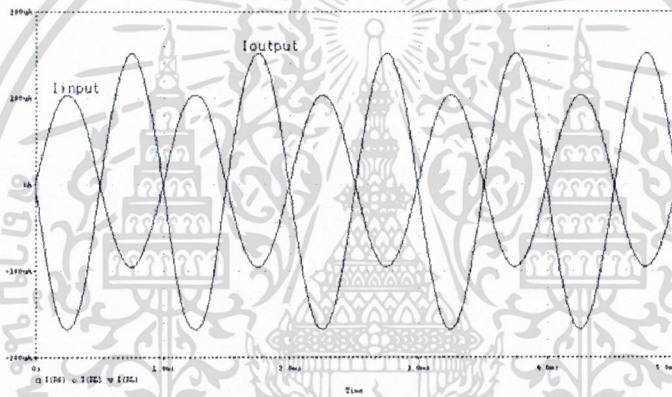
$$\begin{aligned} I_{out} &= -g_m V_i && \text{เมื่อ } V_i = I_{in} R_i \\ I_{out} &= -g_m I_{in} R_i \end{aligned} \quad (2.24)$$

ในส่วนของอัตราขยายของกระแสไฟฟ้าหรือ (A_I) คืออัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตกับกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตดังสมการที่ และเราสามารถควบคุมอัตราการขยายได้จากกระแสไฟฟ้า I_B และที่ตัวต้านทาน R_i ดังสมการที่ (2.25)

$$A_I = I_{out}/I_{in} = -g_m R_i \quad (2.25)$$



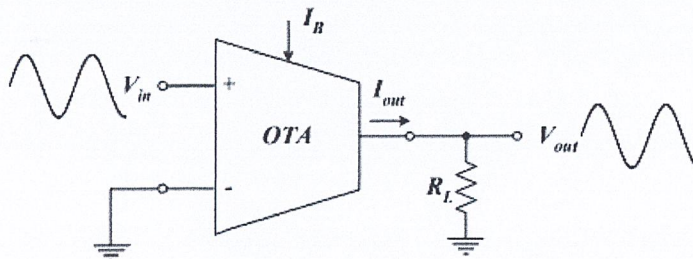
รูปที่ 2.41 วงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบกลับเฟสที่จำลองโดยใช้โปรแกรม PSpice



รูปที่ 2.42 ผลที่ได้จากการทำงานแบบ Time Domain จากวงจรรูปที่ 2.41

2) วงจรขยายสัญญาณแบบ ไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสแสดงดังในรูปที่ 2.43 เป็นลักษณะของวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส เป็นวงจรขยายสัญญาณที่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้าินเอาต์พุตจะเหมือนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้าินอินพุต แต่ถูกขยายให้มีขนาดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.43 วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

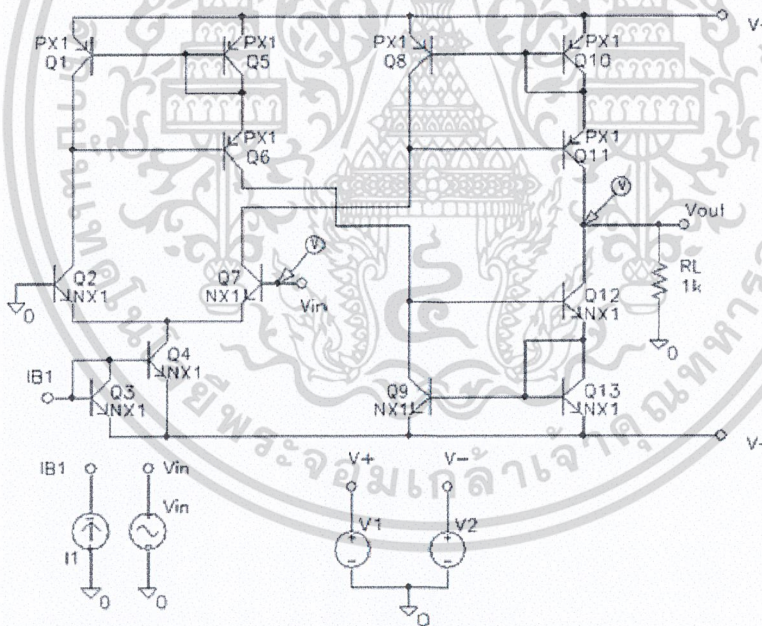
กระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของ OTA (I_{out}) มีค่าคงสมการที่ (2.26) กระแสไฟฟ้า I_{out} ที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_L ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R_L ซึ่งคือแรงดันไฟฟ้า V_{out}

$$I_{out} = g_m V_{in} \quad (2.26)$$

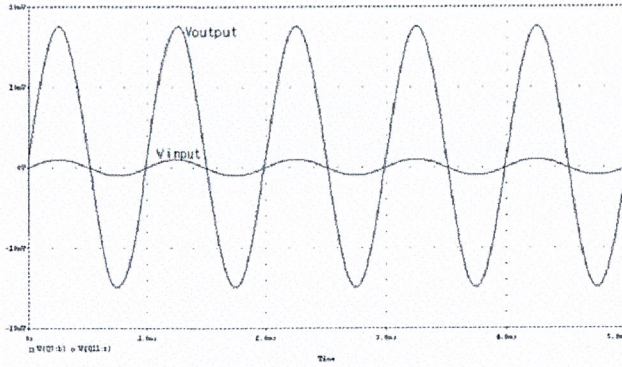
$$V_{out} = I_{out} R_L = g_m R_L V_{in} \quad (2.27)$$

โดยอัตราขยายของแรงดันไฟฟ้าของวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสหาได้จากสมการที่ (2.27) จะเห็นได้ว่าสมการอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสและแบบไม่กลับเฟส จะมีตัวแปรที่ไม่แตกต่างกัน ส่วนที่แตกต่างกันคืออัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสจะมีค่าเป็นบวก แต่อัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสจะมีค่าเป็นลบ

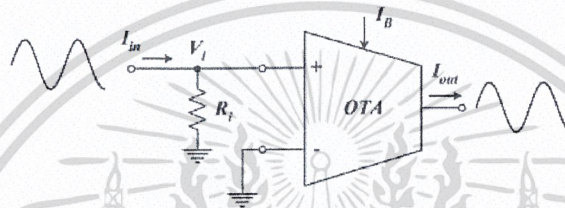
$$A_v = V_{out} / V_{in} = g_m R_L \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.44 วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสที่จำลองโดยใช้โปรแกรม PSpice



รูปที่ 2.45 ผลที่ได้จากการทำงานแบบ Time Domain จากวงจรรูปที่ 2.44

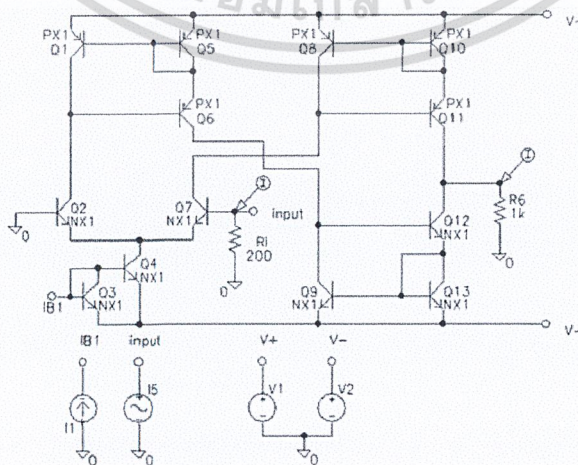


รูปที่ 2.46 วงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส

รูปที่ 2.46 เป็นรูปที่แสดงลักษณะวงจขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟส จากรูปสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตได้จากสมการที่ (2.29) และหาอัตราขยายของกระแสไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.30)

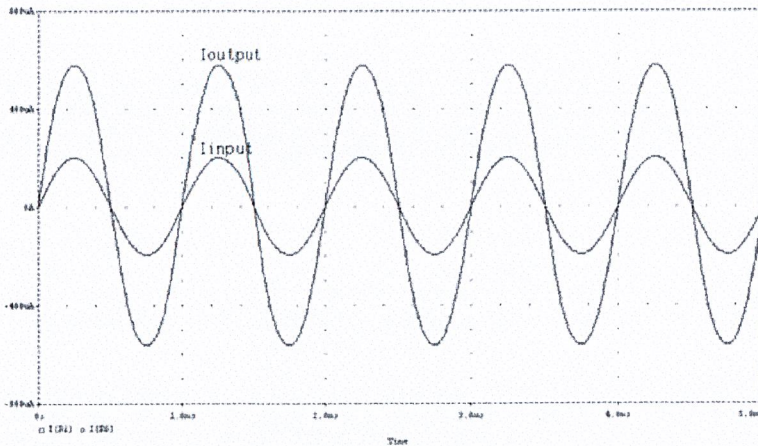
$$I_{out} = g_m R_i I_{in} \quad (2.29)$$

$$A_v = V_{out} / V_{in} = g_m R_i \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.47 วงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบไม่กลับเฟสที่จำลองโดยใช้โปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.48 ผลที่ได้จากการทำงานแบบ Time Domain จากวงจรรูปที่ 2.47

จากผลที่ได้จะเห็นว่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตได้ถูกขยายขึ้น จากสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตและไม่กลับเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.48 และมีอัตราการขยายของสัญญาณกระแสไฟฟ้าตามค่าของ R_f และค่า g_m ตามสมการที่ (2.30)

2.8.3 OTA ที่ใช้ในการออกแบบวงจร (LM 13700)

LM13700 ประกอบด้วยค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (transconductance amplifiers) ควบคุมกระแสสองตัวแสดงดังรูปที่ 2.49 โดยที่ทั้งสองตัวมีอินพุตและเอาต์พุตที่แยกจากกัน อุปกรณ์เครื่องขยายเสียงทั้งสองจะทำงานร่วมกันอย่างอิสระ

1) คุณสมบัติของ LM 13700

- g_m adjustable over 6 decades
- Excellent g_m linearity
- Excellent matching between amplifiers
- Linearizing diodes
- High impedance buffers
- High output signal-to-noise ratio
- ใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงคู่ สูงสุด $\pm 18V$
- ผลต่างของสัญญาณอินพุตสูงสุด $\pm 5V$
- กระแสไบอัสสูงสุด $2mA$
- สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิ $0^\circ C$ ถึง $70^\circ C$
- อัตราสลับ $50V/\mu s$
- ช่วงการตอบสนองความถี่สูงสุด $2MHz$
- ค่าความนำถ่ายโอน g_m $I/2V_T$

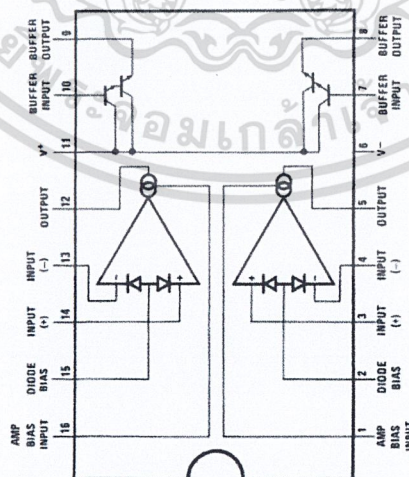
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการกำจัดโหมคร่วม CMRR 110dB
- จำนวน OTA ภายในตัวไอซี (ตัว) 2

2) ขาของไอซี LF351

- ขา 1 เป็นขาอินพุตไบแอส (Amp bias input)ของ OTA ตัวที่หนึ่ง
- ขา 2 เป็นขาไดโอดไบแอส (Diode bias)ของ OTA ตัวที่หนึ่ง
- ขา 3 เป็นอินพุตขาบวกของ OTA ตัวที่หนึ่ง
- ขา 4 เป็นอินพุตขาลบของ OTA ตัวที่หนึ่ง
- ขา 5 เป็นเอาต์พุตของ OTA ตัวที่หนึ่ง
- ขา 6 เป็นแรงดัน ไฟฟ้าขาลบ จะใช้ร่วมกันทั้งสองตัว
- ขา 7 เป็นอินพุตบัฟเฟอร์(Input buffer)ของ OTA ตัวที่หนึ่ง
- ขา 8 เป็นเอาต์พุตบัฟเฟอร์(Output buffer)ของ OTA ตัวที่หนึ่ง
- ขา 9 เป็นเอาต์พุตบัฟเฟอร์(Output buffer)ของ OTA ตัวที่สอง
- ขา 10 เป็นอินพุตบัฟเฟอร์(Input buffer)ของ OTA ตัวที่สอง
- ขา 11 เป็นแรงดัน ไฟฟ้าขาลบ จะใช้ร่วมกันทั้งสองตัว
- ขา 12 เป็นเอาต์พุตของ OTA ตัวที่สอง
- ขา 13 เป็นอินพุตขาลบของ OTA ตัวที่สอง
- ขา 14 เป็นอินพุตขาบวกของ OTA ตัวที่สอง
- ขา 15 เป็นขาไดโอดไบแอส (Diode bias)ของ OTA ตัวที่สอง
- ขา 16 เป็นขาอินพุตไบแอส (Amp bias input)ของ OTA ตัวที่สอง



รูปที่ 2.49 ขาการใช้งานของไอซี LF351

บทที่ 3

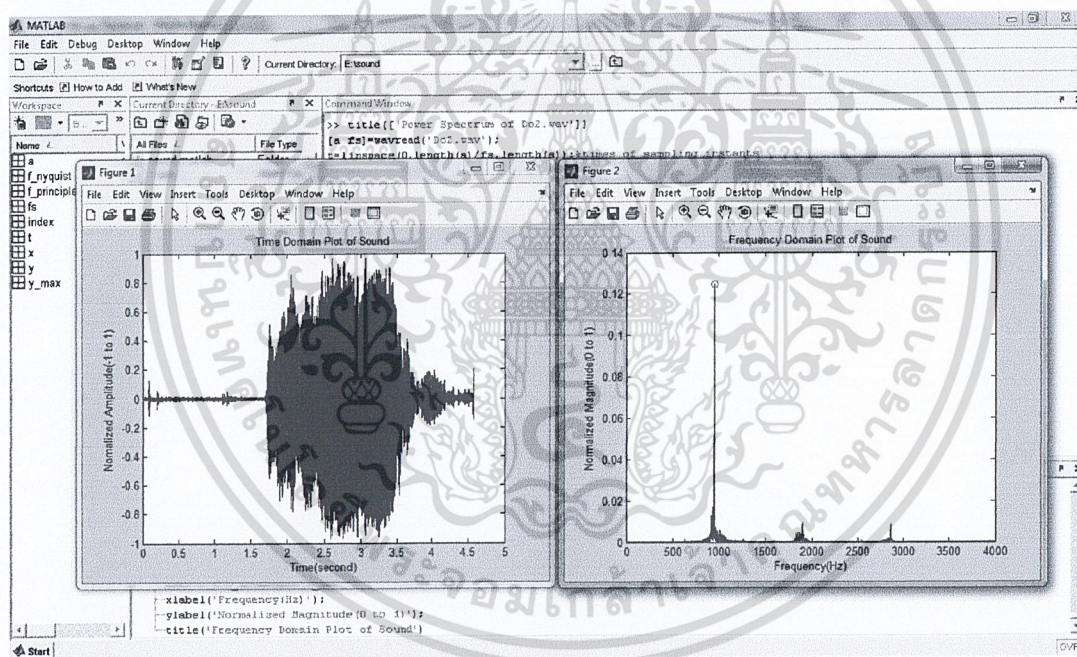
ออกแบบการทดลอง

3.1 ทดลองวัดความถี่เสียงของขลุ่ย

ทดลองวัดความถี่ของเสียงขลุ่ย โดยใช้โปรแกรม Matlab และโปรแกรม Soundcard Ozilloscope

3.1.1 วัดความถี่ของเสียงบนโปรแกรม Matlab

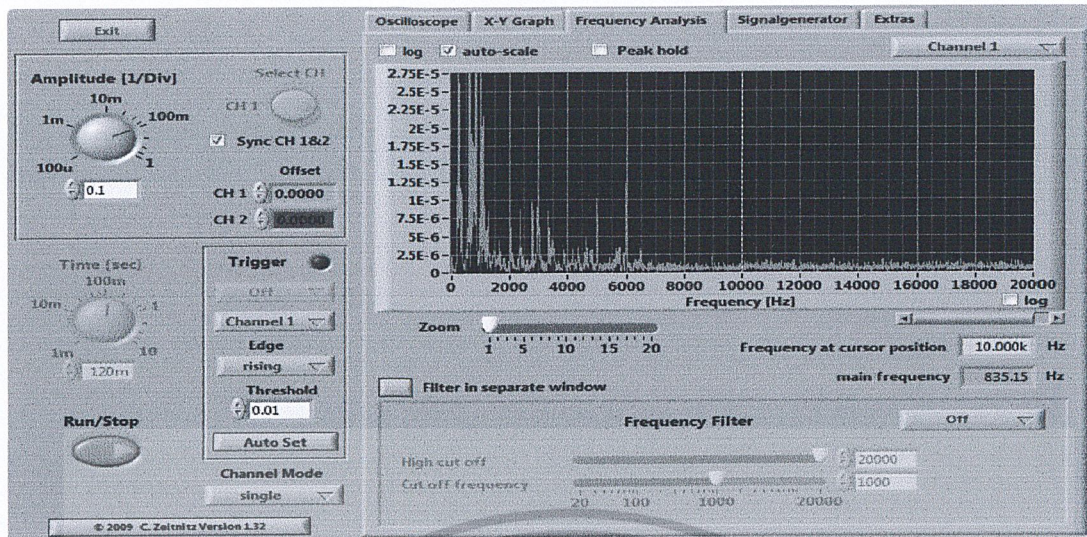
- 1) ทำการบันทึกเสียงขลุ่ยในแต่ละตัวโน้ต
- 2) นำเสียงที่บันทึกไว้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่สเปกตรัมใน โปรแกรม Matlab



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าความถี่สเปกตรัมของโน้ตโด้ โดยใช้โปรแกรม Matlab

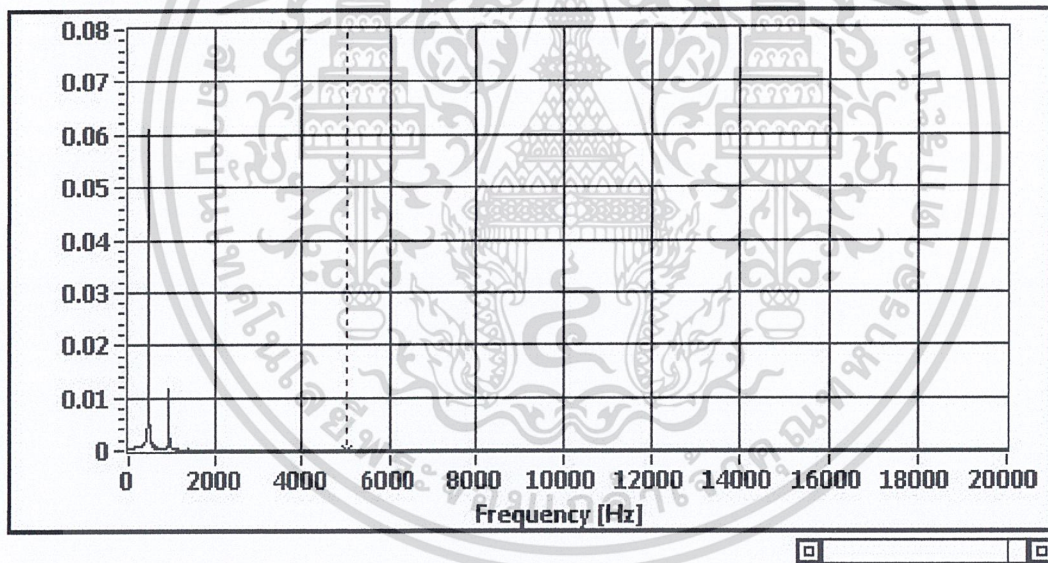
3.1.2 วัดความถี่ของเสียงบนโปรแกรม Soundcard Ozilloscope

- 1) เปิดหน้าโปรแกรม Soundcard Ozilloscope เลือกเมนูที่ Tob Manu เป็น Frequency Analysis



รูปที่ 3.2 การหาความถี่โดยใช้โปรแกรม Soundcard Oscilloscope

2) เป้าขลุ่ยแต่ละตัว โน้ตแล้วคลิกที่ปุ่ม Stop อ่านค่าความถี่ที่ช่อง main frequency



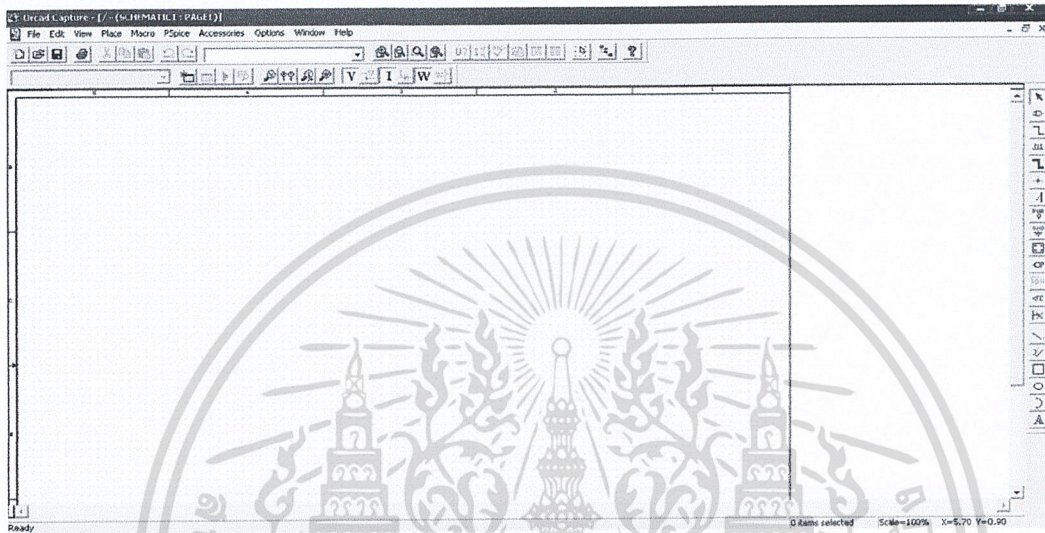
รูปที่ 3.3 กราฟที่ได้จากโปรแกรม Soundcard Oscilloscope ของเสียง โด มีความถี่เท่ากับ 456.99

3.2 ทดลองเขียนวงจรอลวนสร้างสัญญาณเสียงจากวงจรของ Chua

ทดลองเขียนวงจรอลวนสร้างสัญญาณเสียงจากวงจรของ Chua โดยใช้โปรแกรม PSpice จากทฤษฎีอลวนพบว่า ระบบอลวนเป็นระบบที่อาจทำให้เกิดสัญญาณไม่เป็นเส้นตรง อาจจะมีอลวนหรือไร้ระเบียบ แต่จริงๆแล้ว พฤติกรรมหรือสัญญาณที่อลวนหรือไร้ระเบียบสามารถกำหนดได้จากค่าเริ่มต้น เนื่องจากระบบอลวนมีความไวต่อค่าเริ่มต้น ดังนั้นในการออกแบบจึงใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

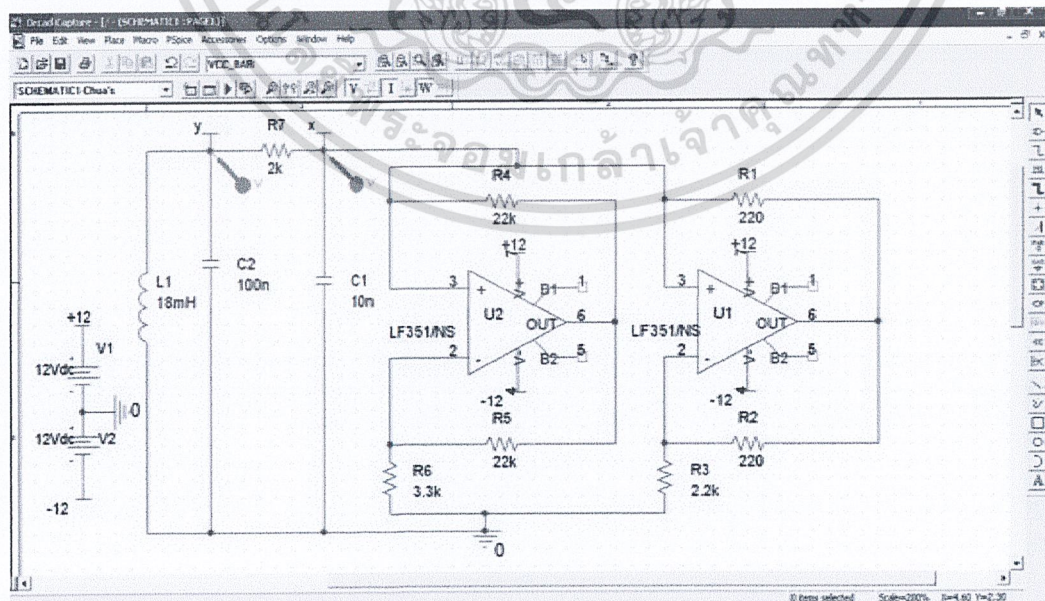
หลักของการกำหนดค่าเริ่มต้นที่มีค่าต่างกันให้กับวงจร เพื่อสร้างสัญญาณเสียงที่มีระดับเสียงแตกต่างกัน

- 1) ทำการ Create New Project จากนั้นตั้งชื่อ Project และเลือก Create a blank project
- 2) จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Schematic ที่หน้าต่างนี้เราสามารถเลือกเมนูหรืออุปกรณ์ต่างๆที่ต้องการใช้วาดวงจร



รูปที่ 3.4 แสดงหน้าต่าง Schematic ของโปรแกรม PSpice

- 3) สร้างวงจรของ Chua ซึ่งจะประกอบด้วยชื่ออุปกรณ์ในโปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 3.5



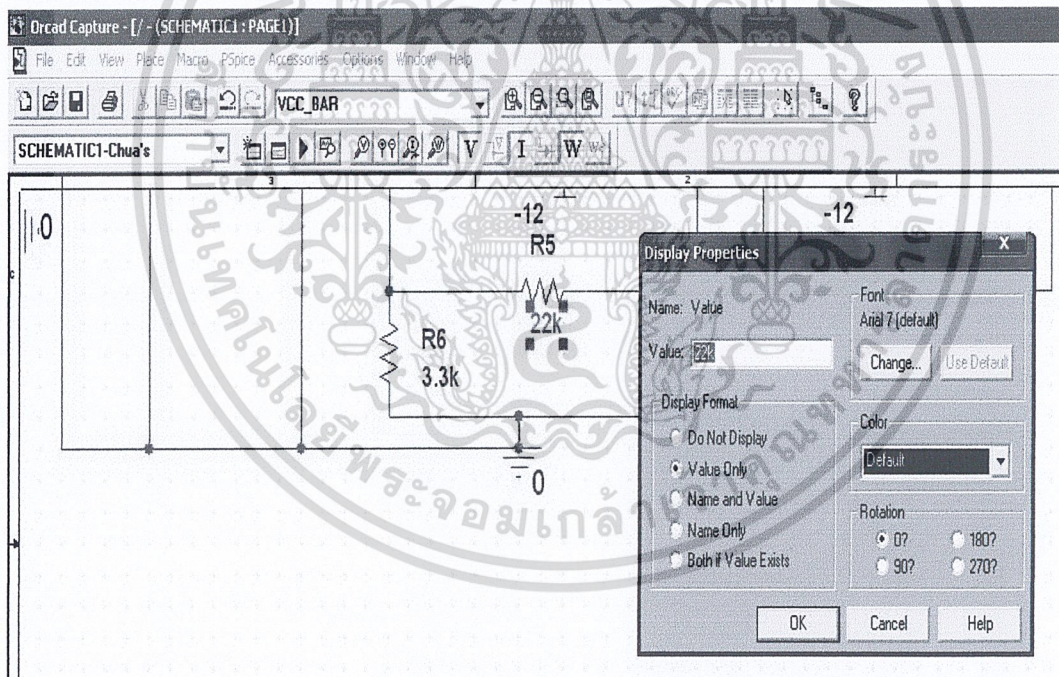
รูปที่ 3.5 วงจร Chua จากโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงชื่อของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม PSpice สำหรับวงจร Chua

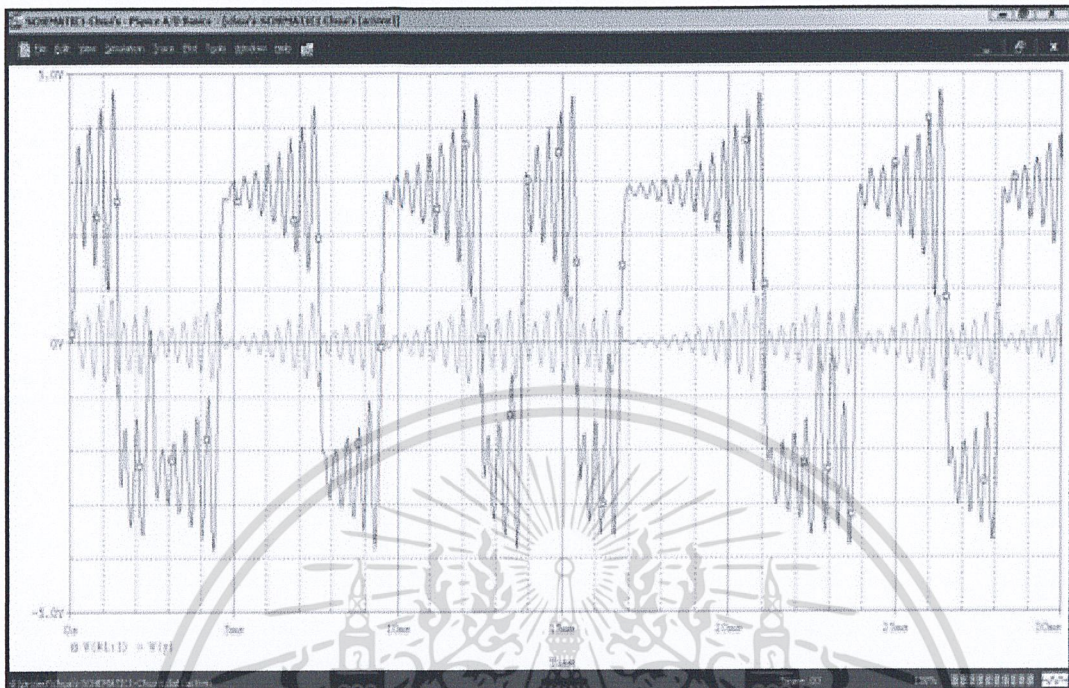
อุปกรณ์ในวงจร	ชื่ออุปกรณ์ในโปรแกรม PSpice
LF351	LF351/NS
R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7	R
C1,C2	C
L	L
V	VCC_BAR , Vdc
GND	0/SOURCE

4) เมื่อสร้างวงจรในโปรแกรม PSpice เรียบร้อยแล้ว เราสามารถกำหนดค่าให้กับอุปกรณ์ได้จากการดับเบิลคลิกที่ตัวอุปกรณ์นั้น จะปรากฏหน้าต่าง Display Property ให้ใส่ค่าของอุปกรณ์ลงในแท็บ Value

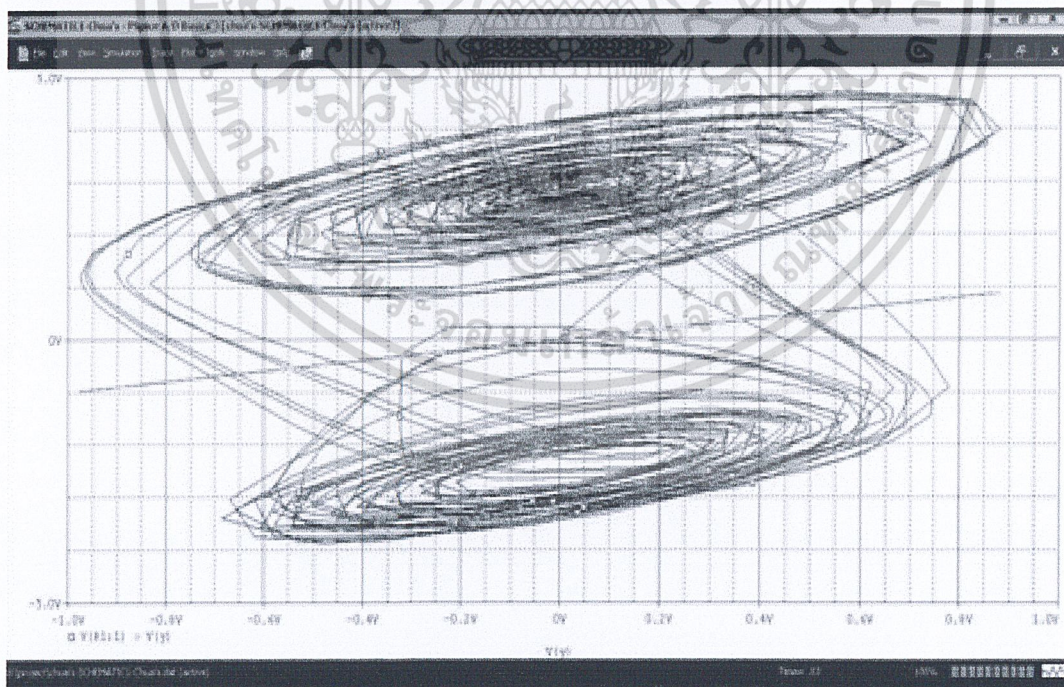


รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดค่าของอุปกรณ์ในโปรแกรม PSpice

5) ดูผลจากวงจร โดยการ Run PSpice 



รูปที่ 3.7 กราฟที่ได้จากการวัดค่าวงจรของ Chua จากโปรแกรม PSpice



รูปที่ 3.8 กราฟที่ได้จากการวัดค่าวงจรของ Chua จากโปรแกรม PSpice ในเชิง xy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

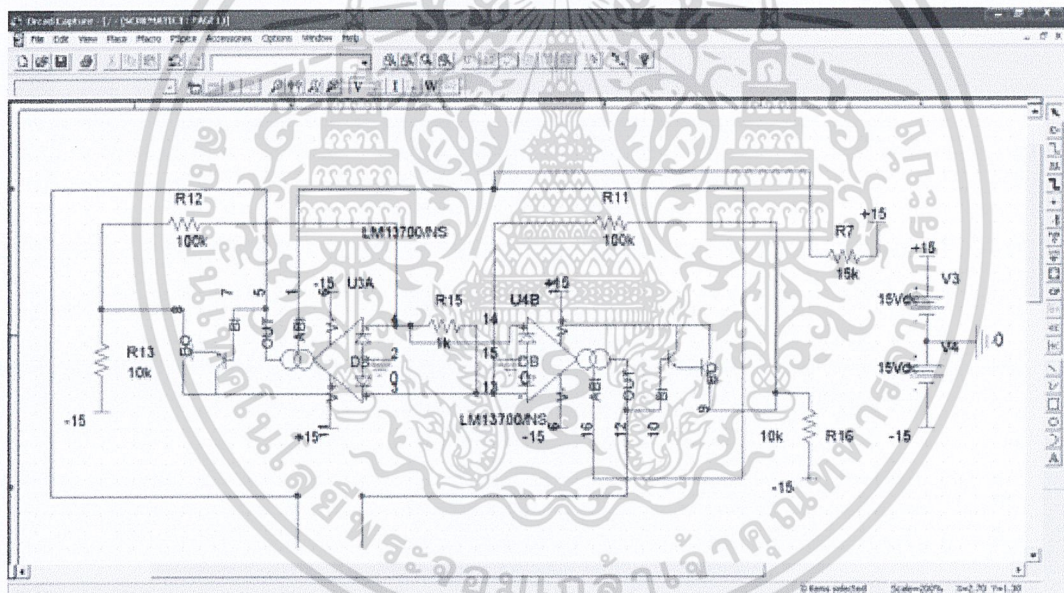
3.3 ทดสอบวงจรลอวนหาตัวแปรที่มีผลต่อความถี่

ในการสร้างวงจรลอวนให้ได้ความถี่ตามที่ต้องการนั้น จะต้องศึกษาหาตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของวงจร โดยการทดสอบเปลี่ยนค่าของตัวต้านทานปรับค่าได้และตัวเหนี่ยวนำ

3.3.1 ทดลองปรับค่าตัวต้านทาน

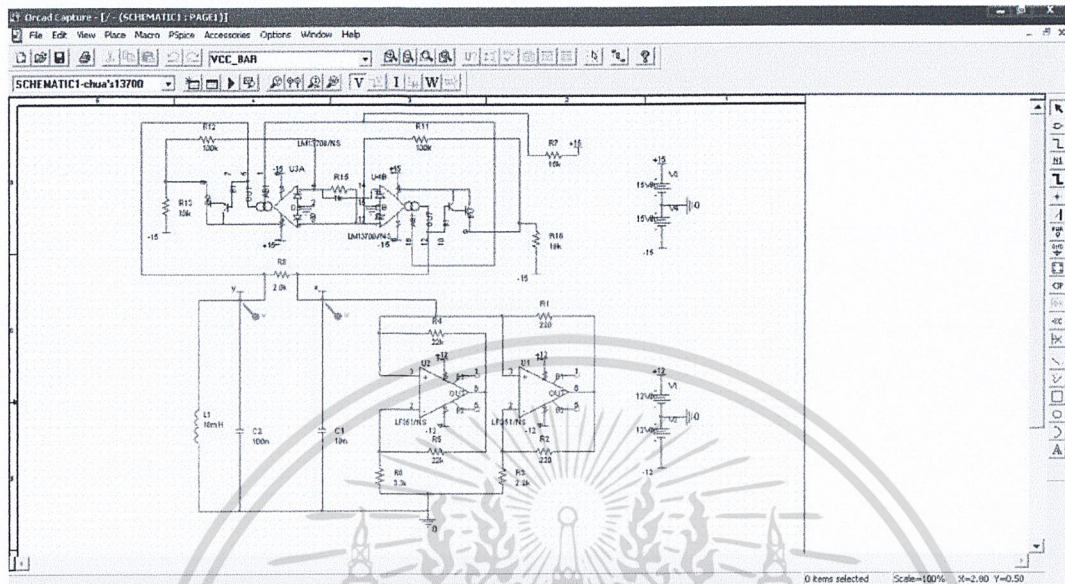
จากการสร้างสัญญาณเสียงจากวงจรลอวนของ Chua เพื่อให้เกิดเสียงที่มีความหลากหลายมากขึ้น จึงทำการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และ 2 (C1 และ C2) โดยใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า OTA หรือ ไอซีเบอร์ LM13700 ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวต้านทานตัวหนึ่ง เข้าไปต่อขนานกับวงจร Chua

1) ทดลองเขียนวงจร Floating Voltage Controlled Resistor โดยใช้ไอซีเบอร์ LM13700 ดังรูปที่ 3.9



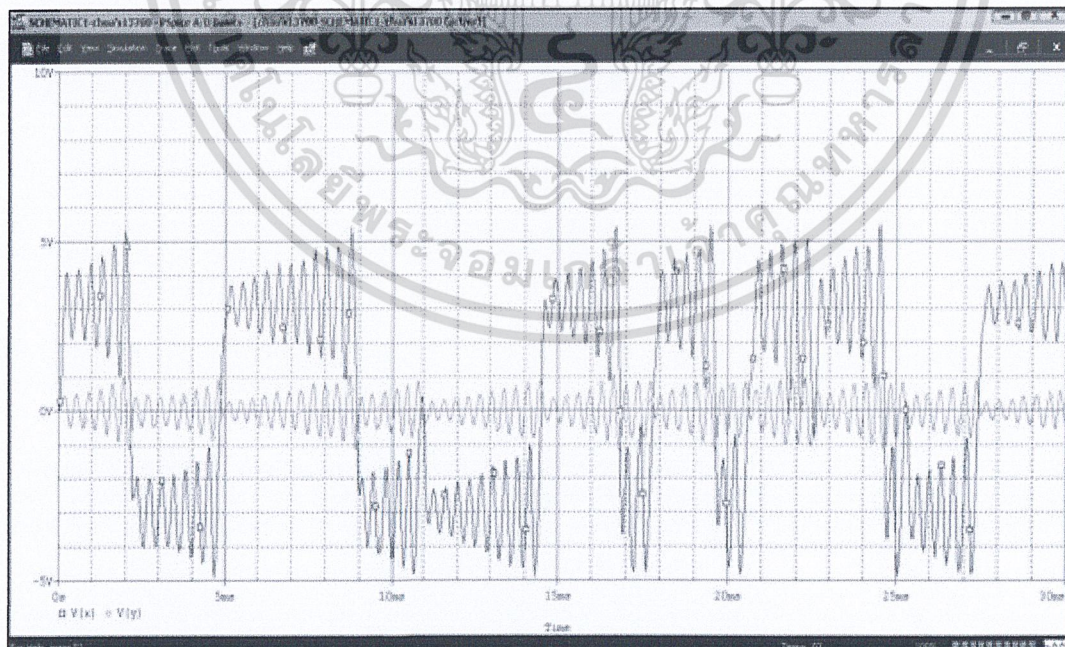
รูปที่ 3.9 วงจร Floating Voltage Controlled Resistor โดยใช้ไอซี LM13700 ใน PSpice

2) นำวงจร Floating Voltage Controlled Resistor ที่ใช้ไอซี LM13700 มาต่อเข้ากับวงจรของ chua ที่มีอยู่



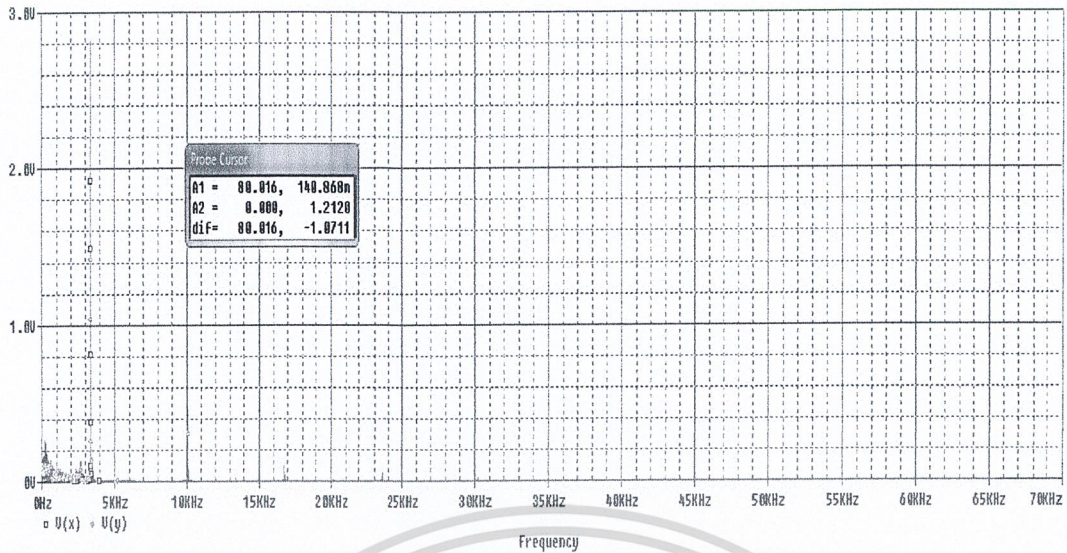
รูปที่ 3.10 นำวงจร Floating Voltage Controlled Resistor มาต่อเข้ากับวงจร chua

3) ดูผลจากวงจร โดยการ Run PSpice



รูปที่ 3.11 กราฟที่ได้จากการวัดค่าของวงจรที่ปรับปรุงจากวงจรของ Chua จาก โปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

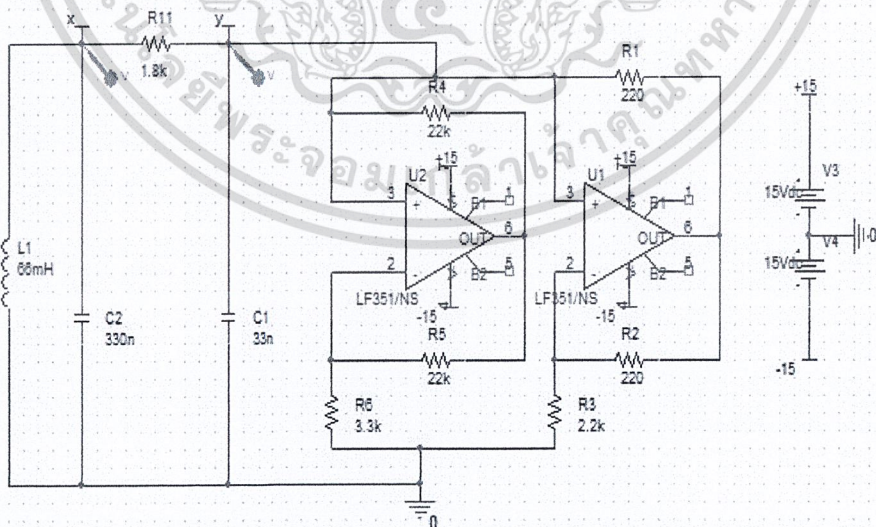


รูปที่ 3.12 กราฟความถี่ที่ได้จากการใช้ฟังก์ชัน FFT บน PSpice

3.3.2 ทดลองปรับค่าตัวเหนี่ยวนำ

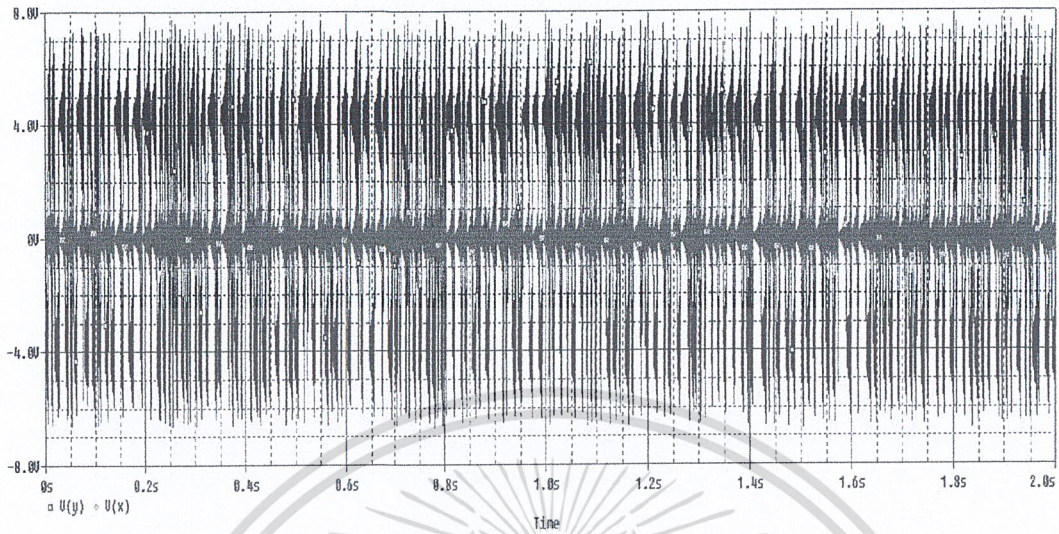
จากการสร้างสัญญาณเสียงจากวงจรลอว์นของ Chua เพื่อให้เกิดเสียงที่มีความหลากหลายมากขึ้น จึงทำการปรับค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุตัวที่ 2 (C2) ในการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำนั้น จะต้องทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุทั้งสองด้วย (C1,C2) เพื่อให้เกิดความสอดคล้องของสมการโดยที่ค่าตัวเก็บประจุตัวที่ 2(C2) จะเป็น 10 เท่าของตัวเก็บประจุตัวที่ 1 (C1)

1) เปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุทั้งสองตัว

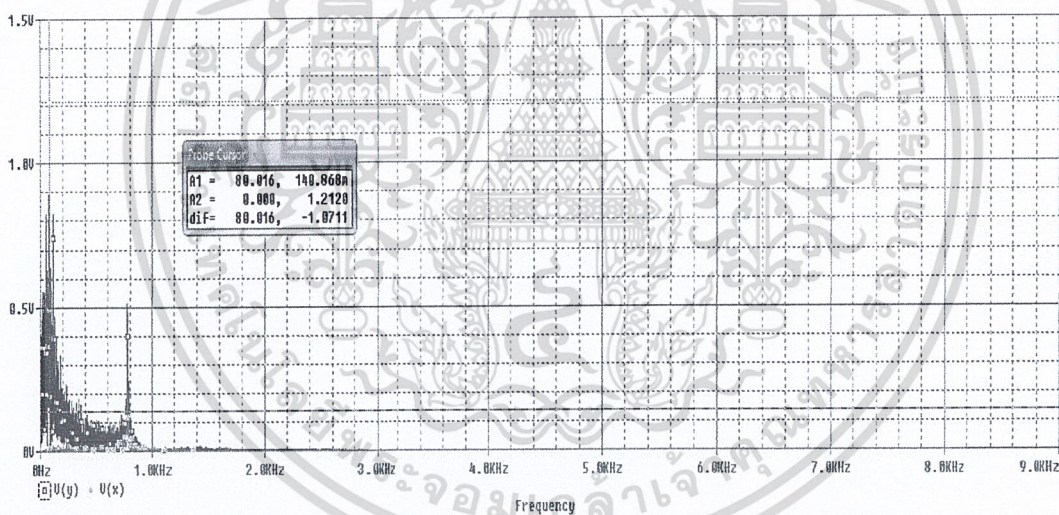


รูปที่ 3.13 เปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

2) คู่มือ จากวงจร โดยRun บน Pspice



รูปที่ 3.14 กราฟที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.15 กราฟความถี่ที่ได้จากการใช้ฟังก์ชัน FFT บน PSpice

3.4 ทดลองวาดวงจรออกแบบสร้างสัญญาณเสียงที่ใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน

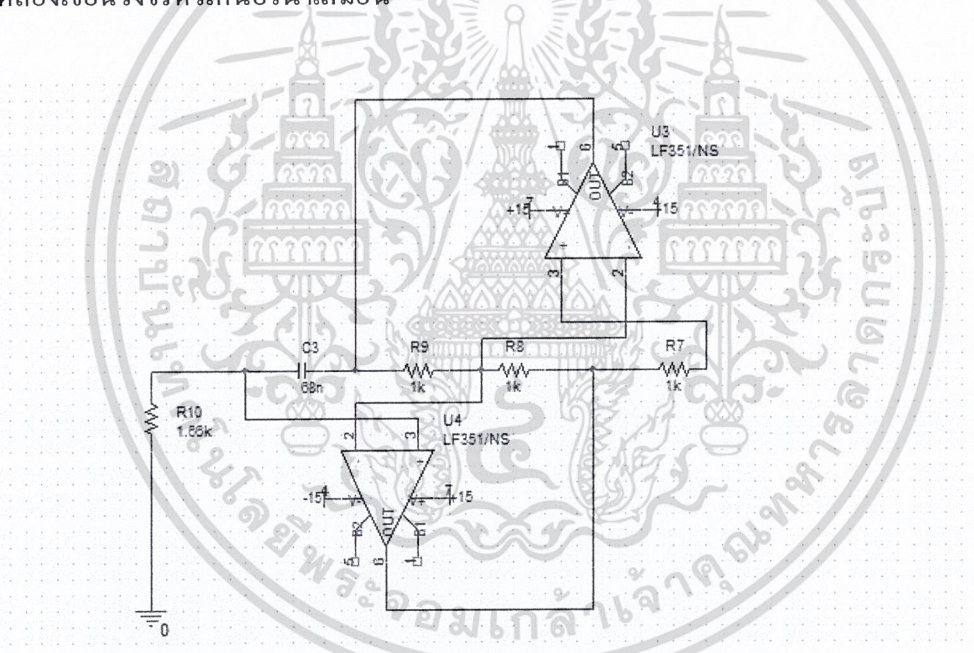
จากการสร้างสัญญาณเสียงจากวงจรอลวนของ Chua ตัวเหนี่ยวนำที่ต้องใช้ เพื่อให้เกิดสัญญาณเสียงที่ความถี่ต่างๆนั้น มีค่าที่น้อยจึงจำเป็นต้องใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน ที่ทำหน้าที่แทนตัวเหนี่ยวนำที่เป็นแบบขดลวด โดยวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนประกอบไปด้วย Op-Amp 2 ตัว ตัวต้านทาน 4 ตัว และตัวเก็บประจุ 1 ตัว

ตารางที่ 3.2 แสดงชื่อของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม PSpice สำหรับวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน

อุปกรณ์ในวงจร	ชื่ออุปกรณ์ในโปรแกรม PSpice
LF351	LF351/NS
R7,R8,R9,R10	R
C3	C
V	VCC_BAR , Vdc
GND	0/SOURCE

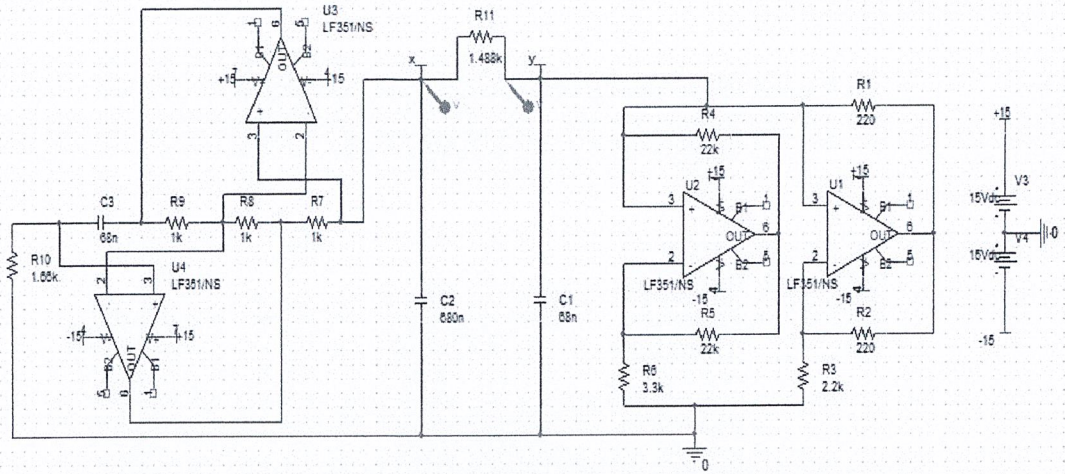
ในการกำหนดค่าของอุปกรณ์นั้นเราจะกำหนดให้ตัวต้านทานตัวที่ 7 (R7) , 8 (R8) และ 9 (R9) ให้มีค่าเท่ากับ $1K\Omega$ และตัวเก็บประจุตัวที่ 3 (C3)มีค่าเท่ากับ ตัวเก็บประจุตัวที่ 1(C1) ส่วนตัวต้านทานตัวที่ 10 (R10) นั้นจะเปลี่ยนแปลงตามแต่เราต้องการ

1) ทดลองเขียนวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน



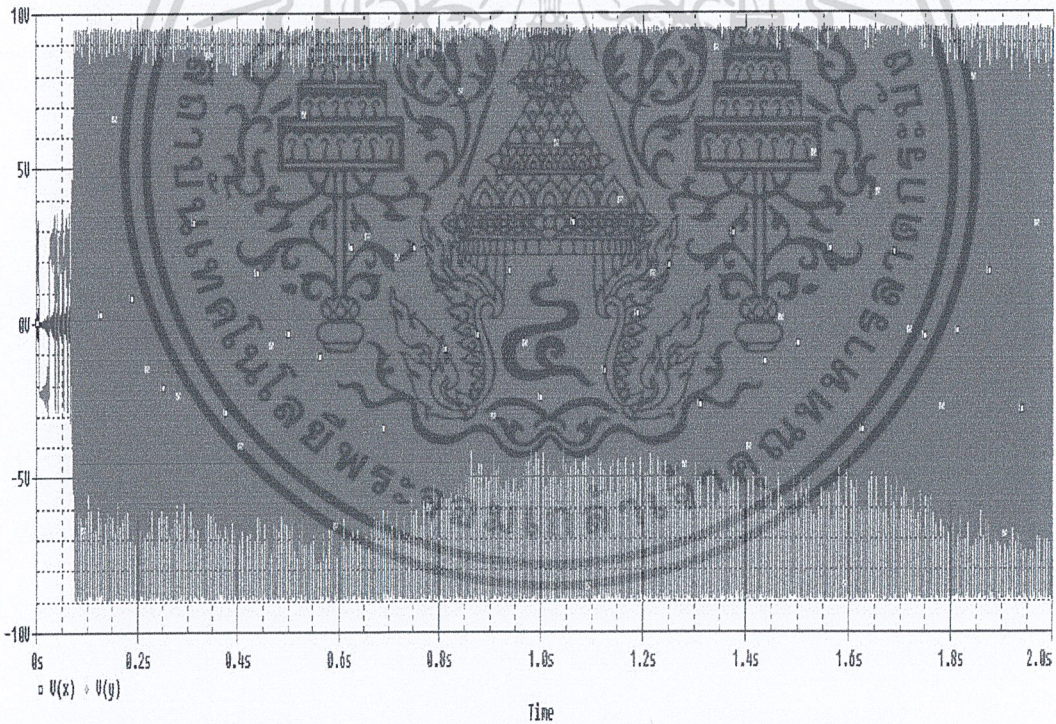
รูปที่ 3.16 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน จากโปรแกรม PSpice

2) นำวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนมาต่อขนานกับตัวเก็บประจุตัวที่ 2 (C2) ในวงจรอควมของ Chua แทนที่ตัวเหนี่ยวนำเดิม



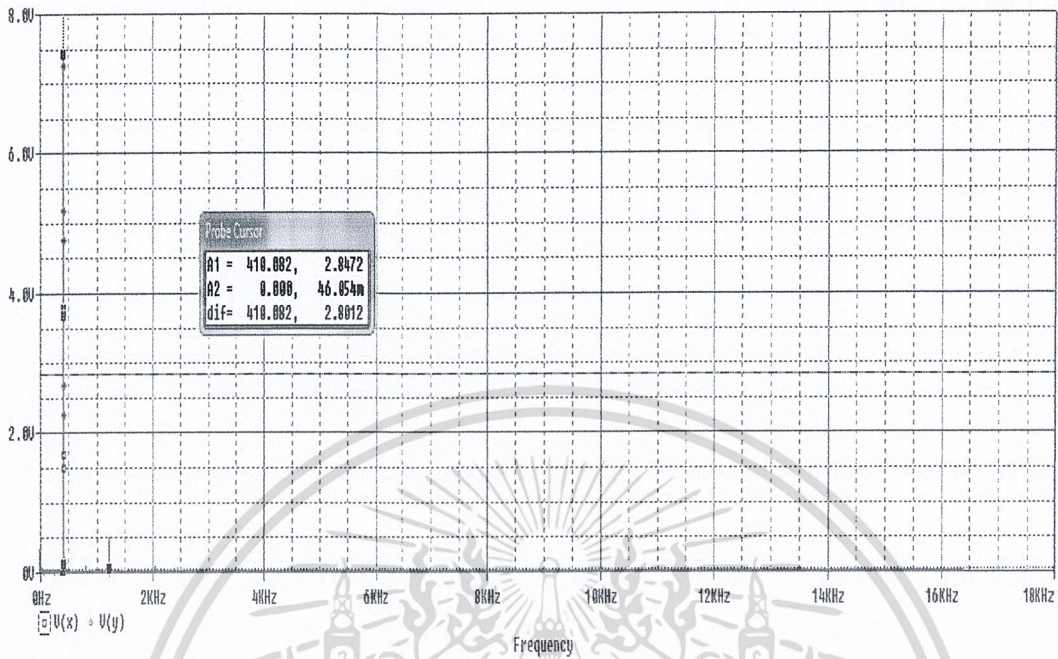
รูปที่ 3.17 วงจรลอทวนของ Chua ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือนแทนตัวเหนี่ยวนำเดิม

3) ดูผลจากวงจร โดยการ Run PSpice



รูปที่ 3.18 กราฟที่ได้จากวงจร Chua ที่ใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนแทนตัวเหนี่ยวนำเดิม

4) หาค่าความถี่ที่ได้จากวงจรลวดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเสมือน โดยใช้ฟังก์ชัน FFT บน PSpice



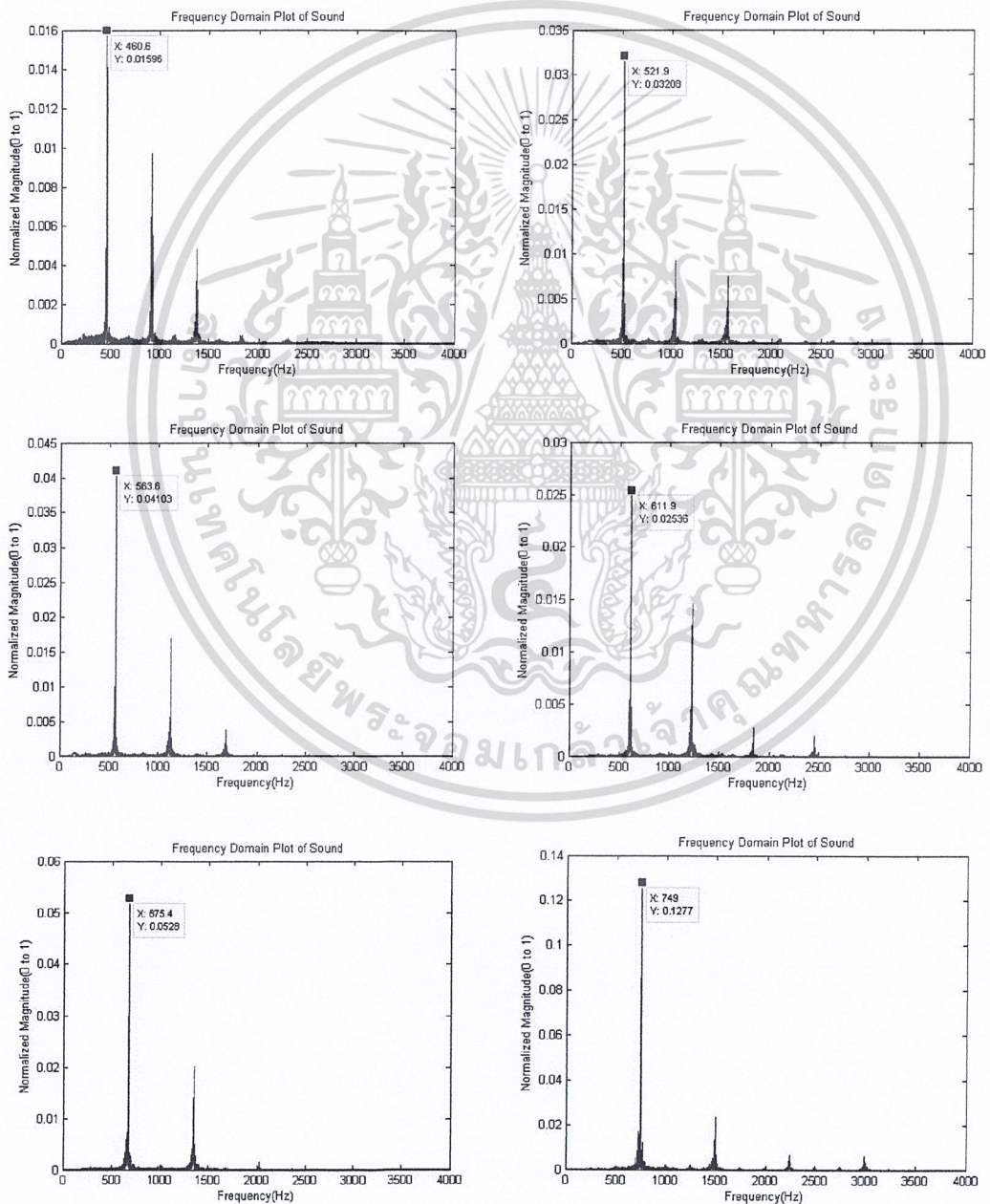
รูปที่ 3.19 กราฟความถี่ที่ได้จากวงจร โดยใช้ฟังก์ชัน FFT บน PSpice

บทที่ 4

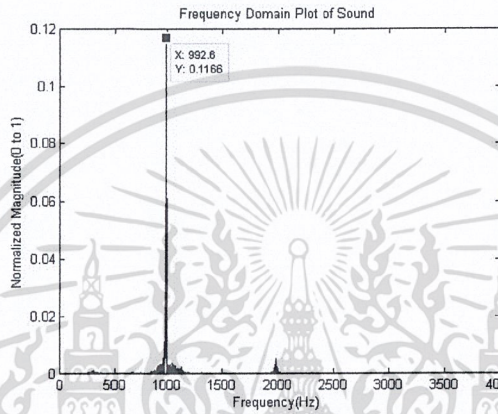
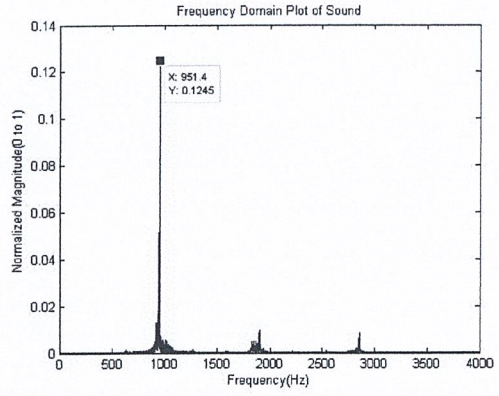
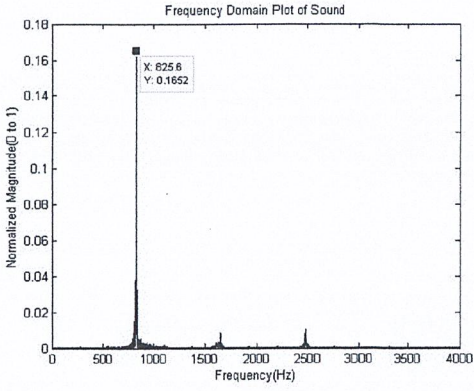
ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองวัดความถี่ของเสียงขลุ่ย

กราฟความถี่เสียงขลุ่ยที่ได้จากโปรแกรม Matlab โดยเรียงตามตัวโน้ต โด เร มี ฟา ซอล ลา ที โค้ และเร่



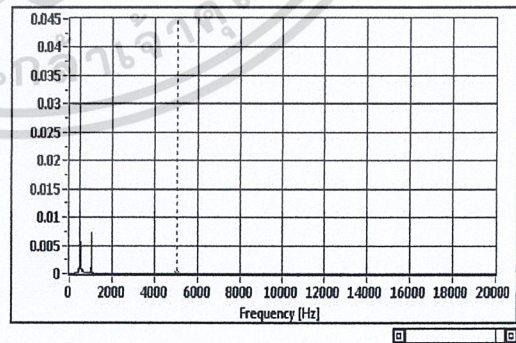
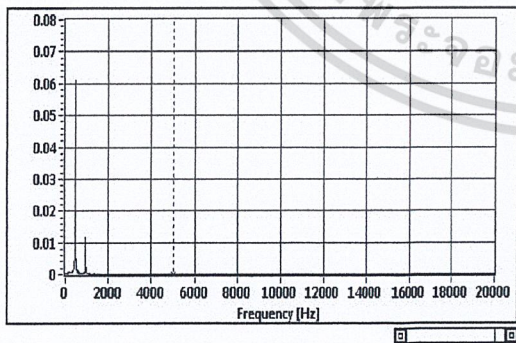
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

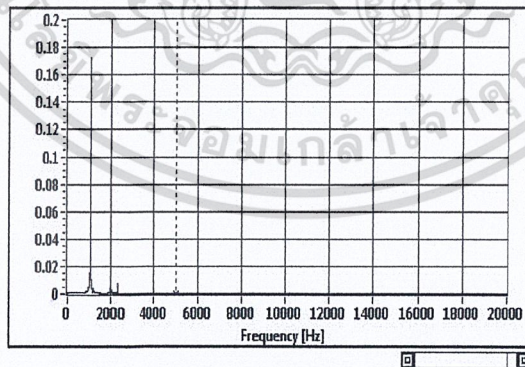
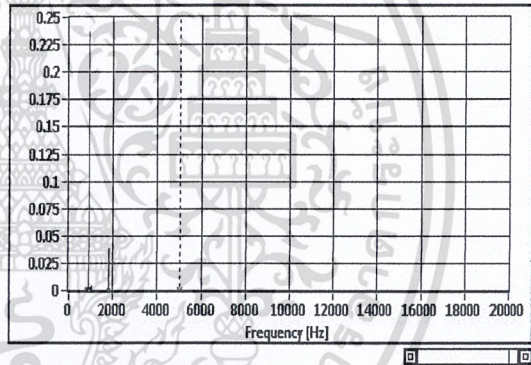
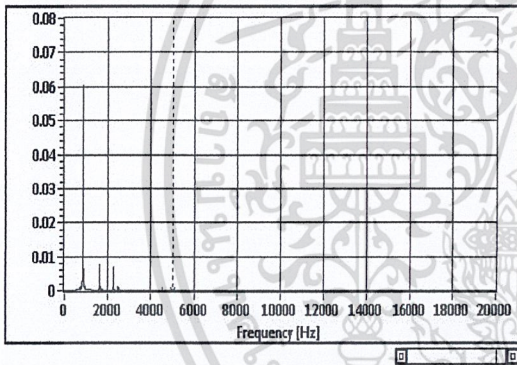
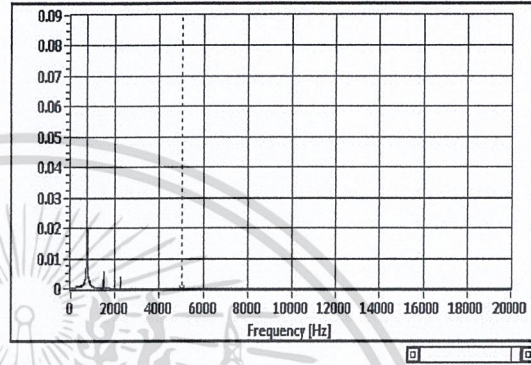
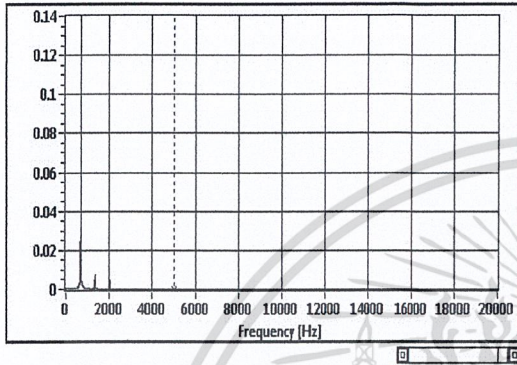
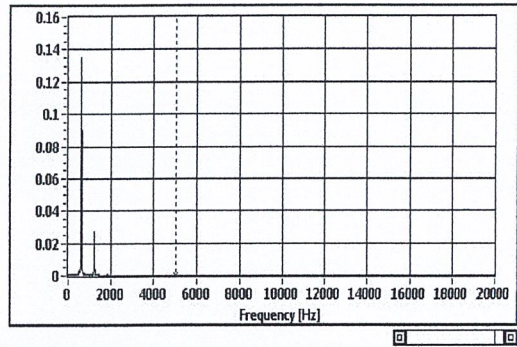
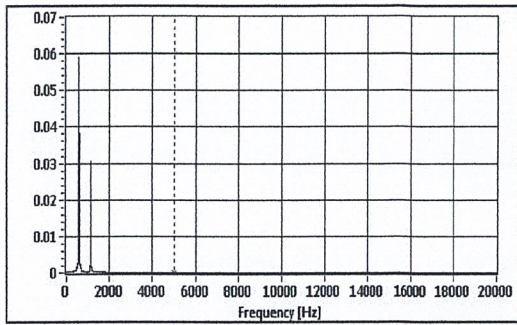


รูปที่ 4.1 กราฟความถี่ที่ได้จากโปรแกรม Matlab

โดยเรียงตามลำดับ โด เร มี ฟา ซอล ลา ที โด และเร

กราฟความถี่เสียงขลุ่ยที่ได้จากโปรแกรม Soundcard Ozilloscope โดยเรียงตามตัวโน้ต โด เร มี ฟา ซอล ลา ที โด และเร





รูปที่ 4.2 กราฟความถี่ที่ได้จากโปรแกรม Soundcard Ozilloscope โดยเรียงตามลำดับ โด เร มี ฟา ซอล ลา ที โด และเร

หลังจากที่ทำการวัดความถี่ของเสียงขลุ่ยโดยใช้โปรแกรม Matlab และ โปรแกรม

Soundcard Ozilloscope จะ ได้ค่าดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

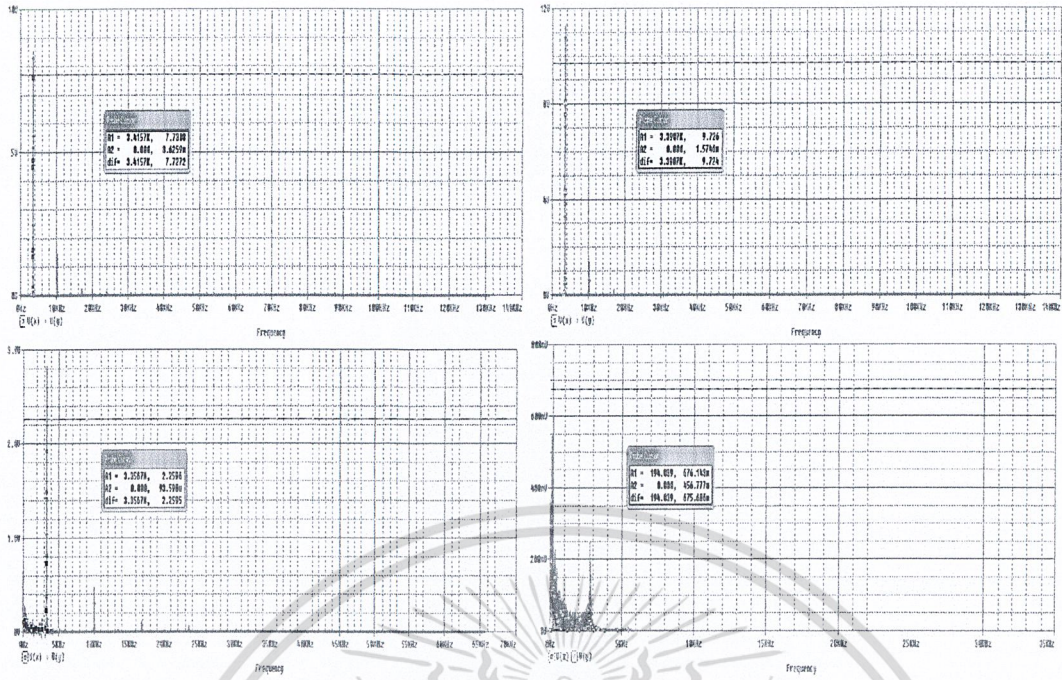
ตารางที่ 4.1 ค่าความถี่ของเสียง

โน้ต	ความถี่มาตรฐานจากเว็บไซต์(Hz)	อัตราส่วนระหว่างโน้ต	ความถี่จาก Matlab (Hz)	อัตราส่วนระหว่างโน้ต	ความถี่จาก Soundcard Ozilloscope(Hz)	อัตราส่วนระหว่างโน้ต
โด	457.14	≈ 1.12	458.20	≈ 1.12	456.99	≈ 1.12
เร	514.29	≈ 1.1	514.80	≈ 1.1	515.33	≈ 1.1
มี	557.14	≈ 1.1	563.60	≈ 1.1	563.14	≈ 1.1
ฟา	600.00	≈ 1.1	611.90	≈ 1.1	611.12	≈ 1.1
ซอล	657.14	≈ 1.1	675.40	≈ 1.1	671.22	≈ 1.1
ลา	714.29	≈ 1.14	738.30	≈ 1.12	737.35	≈ 1.12
ที	814.29	≈ 1.1	822.10	≈ 1.1	821.84	≈ 1.1
โด	900.00		908.40	≈ 1.1	905.07	≈ 1.1
เร	-		992.60		991.84	

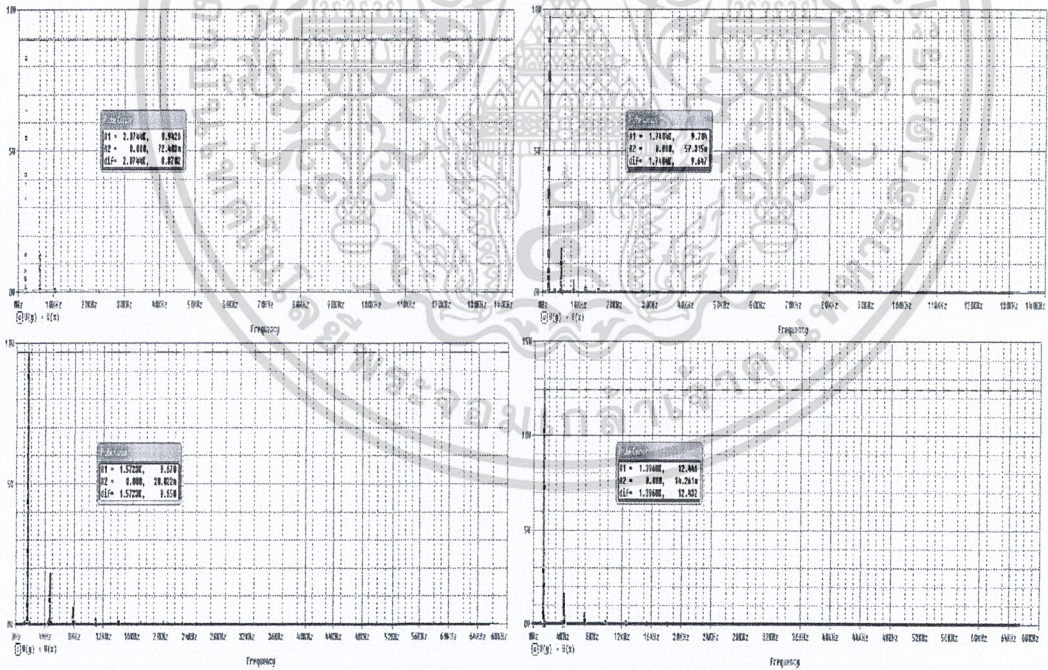
จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ของแต่ละโน้ตเสียงที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรม Matlab และโปรแกรม Soundcard Ozilloscope จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานที่ได้จากเว็บไซต์ จะไม่สามารถเท่ากันพอดีได้เนื่องจากผลในการเป่าขลุ่ยของแต่ละคนจะมีแรงที่ต่างกัน แต่ก็จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน รวมถึงค่าอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ได้จากเว็บไซต์ จากโปรแกรม Matlab และจากโปรแกรม Soundcard Ozilloscope มีค่าใกล้เคียงกันด้วยเช่นกัน

4.2 ผลการทดลองสร้างวงจรถนมหาคตัวแปรที่มีผลต่อความถี่

จากการทดลองพบว่า เมื่อต่อวงจร Floating voltage controlled resistor ขนานกับตัวต้านทานที่ 11 (R11) ที่อยู่ระหว่างตัวเก็บประจุตัวที่ 1 (C1) และ 2 (C2) ขณะที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดเท่าเดิม ค่าความถี่ที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปแต่ยังคงยากที่จะตรงกับความถี่ที่ต้องการ และเมื่อเปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำเป็นวงจรถนมหาคตัวเหนี่ยวนำเสมือน จะพบว่าความถี่นั้นเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ดังนั้นตัวแปรทั้งสองมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ ตัวอย่างการทดลอง



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความถี่เมื่อเปลี่ยนค่าตัวต้านทานตัวที่ 11 (R11) เป็น 1.4K, 1.6K, 1.8K และ 2.0K ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความถี่เมื่อเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุที่ 3 (C3) เป็น 18mH, 47mH, 68mH และ 100mH ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลของค่าความถี่เมื่อเปลี่ยนค่าตัวต้านทานตัวที่ 11(R11) และตัวเหนี่ยวนำ

การทดลอง	เปลี่ยนค่าตัวต้านทานที่ 11 (R11)		เปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำ	
	ค่าตัวต้านทาน(KΩ)	ความถี่(KHz)	ค่าตัวเหนี่ยวนำ(mH)	ความถี่(KHz)
1	1.4	3.4157	18	2.8066
2	1.6	3.3907	68	2.0744
3	1.8	3.3567	80	1.5723
4	2.0	194.039	100	1.3968

4.3 ผลการทดลองสร้างวงจรลวนสร้างสัญญาณเสียงที่ใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน

หลังจากที่เปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำเป็นวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน จะพบว่าเราสามารถที่จะเลือกค่าของตัวเหนี่ยวนำได้มากกว่า ละเอียดกว่า สามารถเลือกใช้ทำให้เกิดความถี่ตรงตามที่ต้องการได้ง่ายกว่าตัวเหนี่ยวนำปกติ ซึ่งค่าเหนี่ยวนำของวงจรเหนี่ยวนำเสมือนเราสามารถหาได้จากสมการที่เคยกล่าวมาแล้วในสมการที่ (2.8)

$$L_{eq} = \frac{R7R9C3R10}{R8}$$

เมื่อทดลองต่อวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนบนโปรแกรม PSpice แทนตัวเหนี่ยวนำเดิม โดยค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในนี้มีค่าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวเหนี่ยวนำและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน

โน้ต	R7(KΩ)	R8(KΩ)	R9(KΩ)	R10(KΩ)	C3(nF)	ตัวเหนี่ยวนำเสมือน(mH)
โด	1	1	1	1.66	68	112.88
เร	1	1	1	2.20	47	103.40
มี	1	1	1	2.20	47	103.40
ฟา	1	1	1	1.80	47	84.60
ซอล	1	1	1	1.52	47	71.44
ลา	1	1	1	2.20	33	72.60
ที	1	1	1	2.00	33	66.00
โด	1	1	1	1.80	33	59.40
เร	1	1	1	2.33	22	51.26

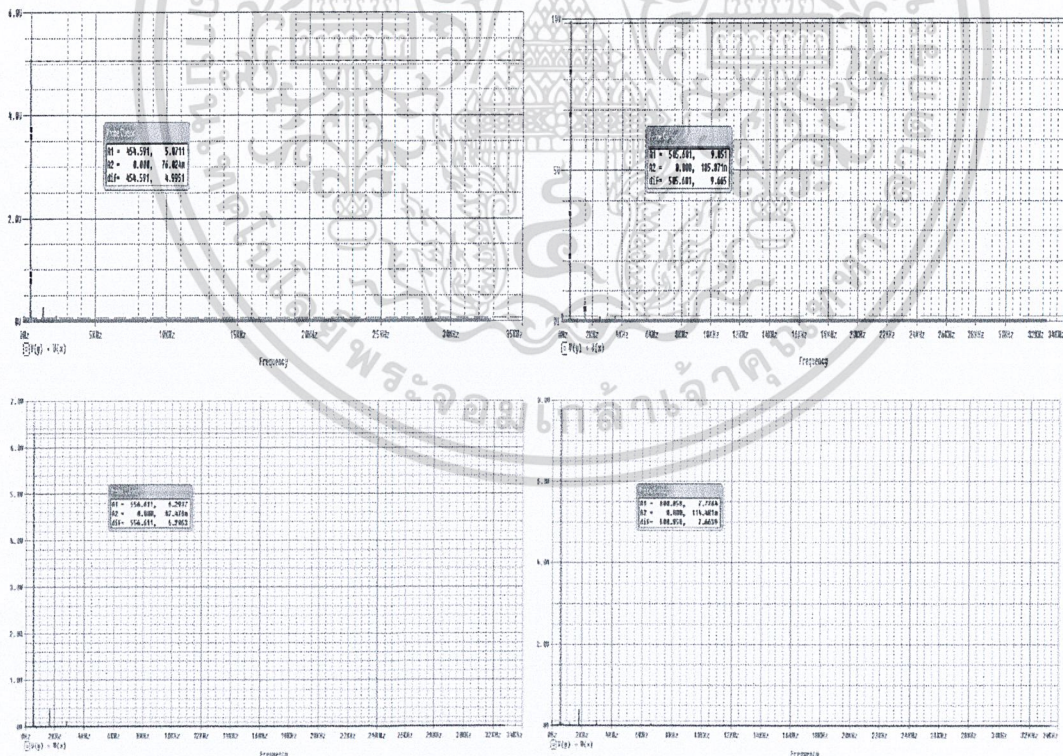
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

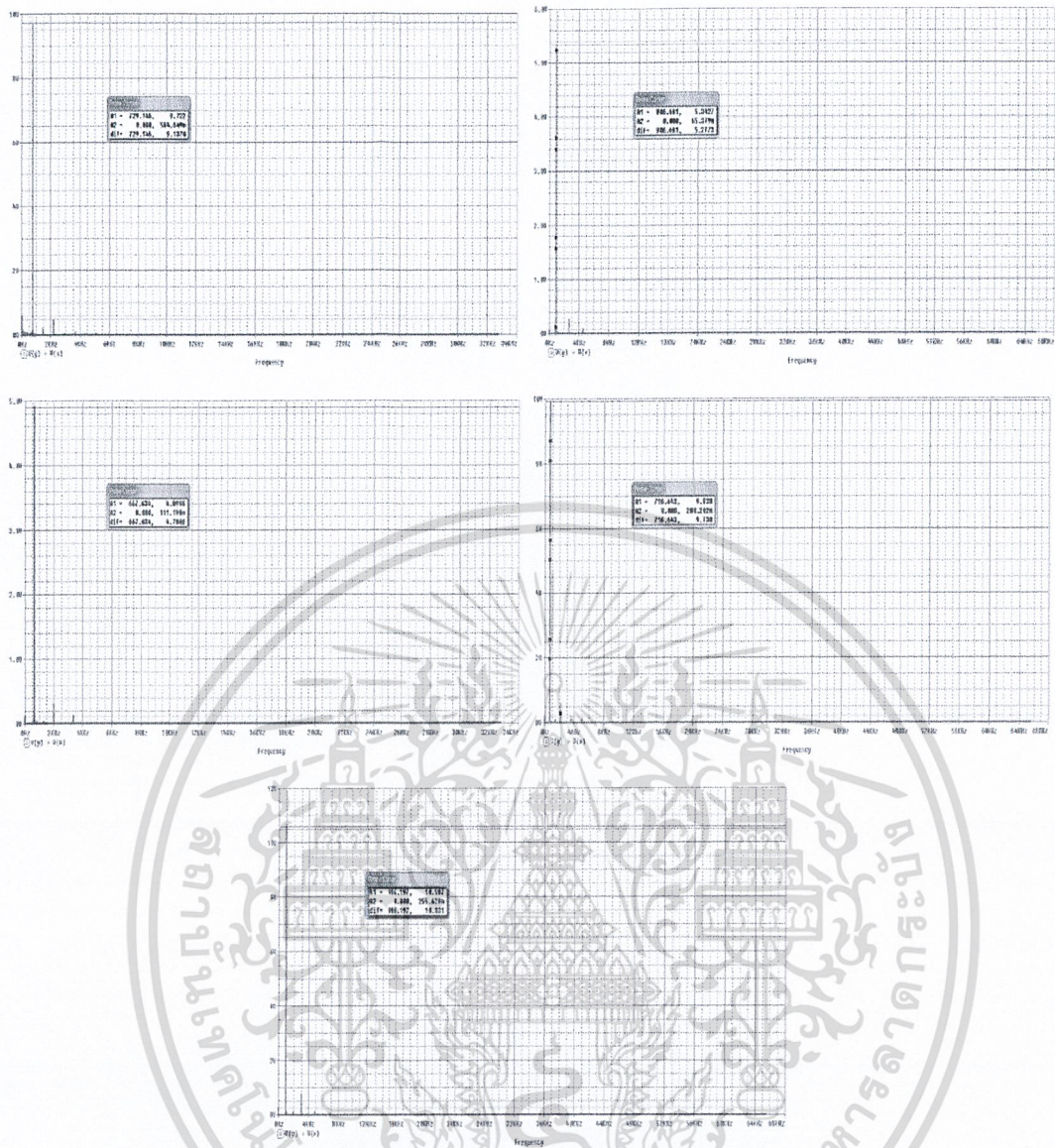
เนื่องจากการปรับค่าวงจรเหนี่ยวนำเสมือนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ได้ความถี่ที่ต้องการได้เราจึงต้องปรับค่าตัวต้านทานตัวที่ 11 (R11) ด้วย โดยจะมีค่าดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวต้านทานที่ต่ออยู่ระหว่างตัวเก็บประจุตัวที่ 1 (C1) และ 2 (C2) กับค่าความถี่ที่ได้

โน้ต	ตัวเหนี่ยวนำเสมือน(mH)	ตัวต้านทานตัวที่ 11 (KΩ)	ความถี่ที่ได้(Hz)
โด	112.88	0.65	454.591
เร	103.40	1.10	506.601
มี	103.40	0.65	556.611
ฟา	84.60	0.90	600.858
ซอล	71.44	0.90	667.634
ลา	72.60	1.12	716.643
ที	66.00	1.70	729.460
โด้	59.40	0.55	906.681
เร้	51.26	1.30	986.107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความถี่ของเสียงที่ได้จากโปรแกรม PSpice เรียงตามลำดับ โด, เร, มี, ฟา, ซอล, ลา, ที, โด และ เร

เมื่อต่อวงจรลงบน Prototype Board วัดค่าความถี่ของวงจรด้วยออสซิลอสโคปเทียบกับความถี่ของเสียงขลุ่ยจริง โดยทำการปรับค่าตัวต้านทานตัวที่ 11 (R11) ของวงจรจนได้ค่าความถี่และเสียงที่ต้องการ จะได้ค่าตัวต้านทานและความถี่ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรที่ต่อบน Prototype Broad และความถี่จาก ออสซิลโลสโคป

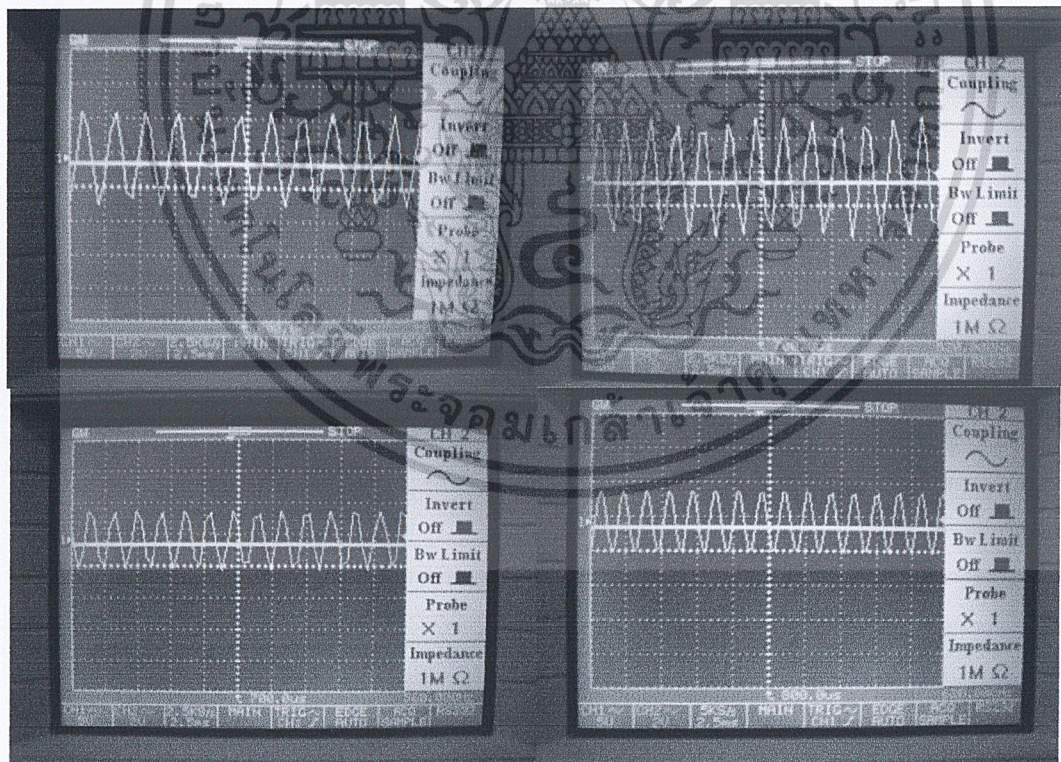
โน้ต	ค่าอุปกรณ์ของวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน					ตัวเหนี่ยวนำเสมือน(mH)	R11(K Ω)	ความถี่ที่ได้ (Hz)
	R7 (K Ω)	R8 (K Ω)	R9 (K Ω)	R10 (K Ω)	C3 (nF)			
โด	1	1	1	1.66	68	112.88	0.959	460
เร	1	1	1	2.20	47	103.40	1.468	520
มี	1	1	1	2.20	47	103.40	1.370	560
ฟา	1	1	1	1.80	47	84.60	1.469	600
ซอล	1	1	1	1.52	47	71.44	1.140	660
ลา	1	1	1	2.20	33	72.60	1.397	720
ที	1	1	1	2.00	33	66.00	0.87	820
โด้	1	1	1	1.80	33	59.40	0.857	900
เร้	1	1	1	2.33	22	51.26	1.756	990

จากการทดลองต่อบน Prototype Broad จะพบว่าค่าของอุปกรณ์ภายในวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนจะมีเท่ากับที่ทดลองบนโปรแกรม PSpice แต่ในส่วนของค่าตัวต้านทานตัวที่ 11 (R11) ค่าจะต่างกัน เนื่องจากการต่อในโปรแกรมออกแบบวงจรนั้น จะไม่มีการคำนวณค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ให้เหมือนกับเวลาต่อบนแผ่นวงจรจริง

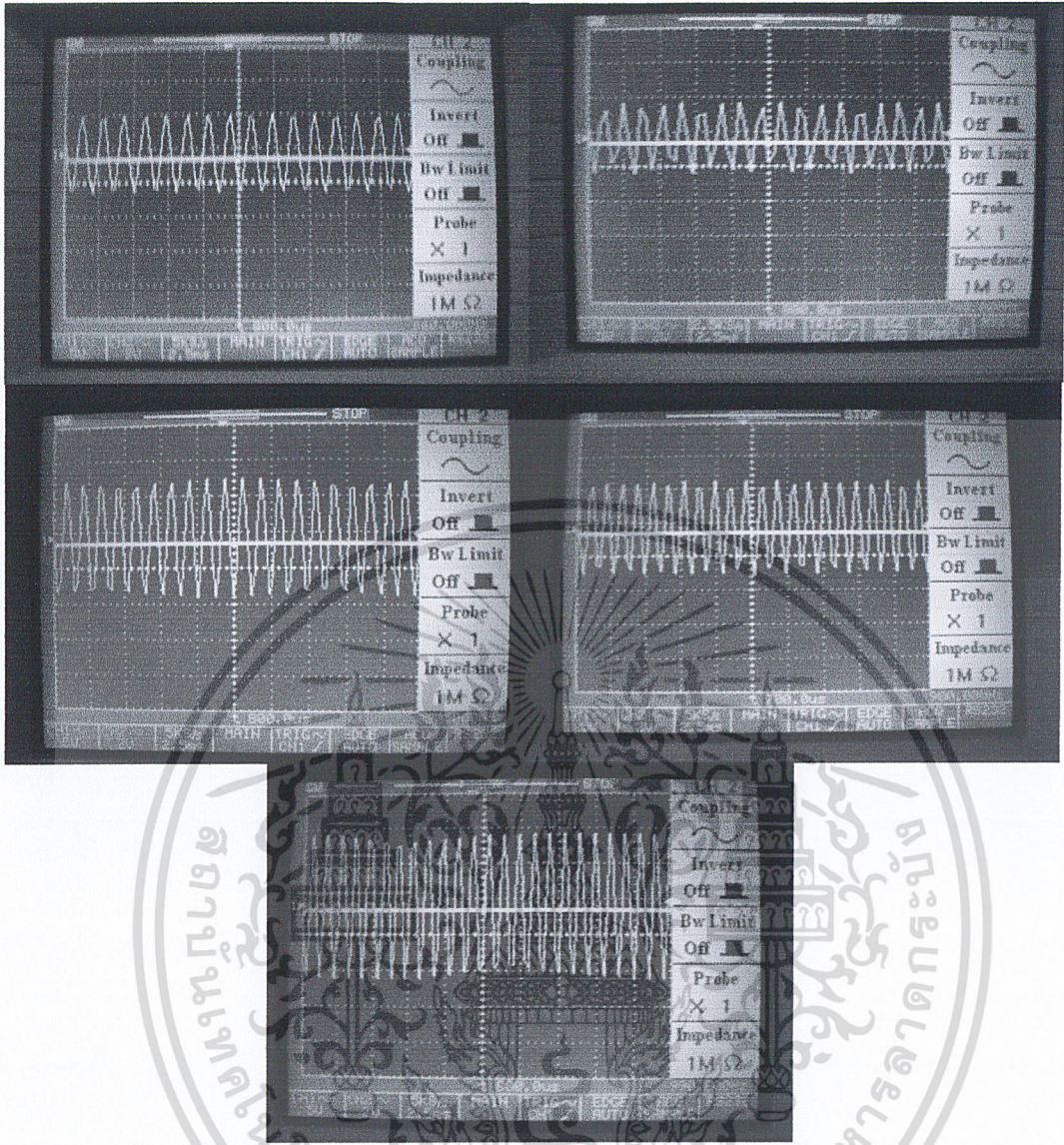
หลังจากที่ทำการต่ออุปกรณ์ต่างๆลงบนแผ่นวงจรจริงที่ออกแบบไว้จะพบว่าค่าต่างๆที่ใช้ในบางส่วนของวงจรจะมีค่าเปลี่ยนไป เนื่องจากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบน Prototype Broad และแผ่นวงจรจริงที่ออกแบบมีค่าที่แตกต่างกัน ดังค่าที่ขีดเส้นใต้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าอุปกรณ์และความถี่เมื่อต่อลงบนแผ่นวงจรจริง

โน้ต	ค่าอุปกรณ์ของวงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน					ตัวเหนี่ยวนำเสมือน(mH)	R11(K Ω)	ความถี่ที่ได้ (Hz)
	R7 (K Ω)	R8 (K Ω)	R9 (K Ω)	R10 (K Ω)	C3 (nF)			
โด	1	1	1	1.80	68	112.40	0.882	460
เร	1	1	1	2.20	47	103.40	1.977	520
มี	1	1	1	2.20	47	103.40	1.981	560
ฟา	1	1	1	1.80	47	84.60	2.026	620
ซอล	1	1	1	1.80	47	84.60	0.562	660
ลา	1	1	1	2.40	33	79.20	2.094	740
ที	1	1	1	2.00	33	66.00	0.827	820
โต	1	1	1	1.80	33	59.40	0.804	910
เร	1	1	1	2.30	22	50.60	1.651	990



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟความถี่ของเสียงที่ได้จากวงจริง เรียงตามลำดับ โด, เร, มี, ฟา, ซอล, ลา, ที, โด และเร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 อุปสรรค

- 1.ในการศึกษาวงจรถอดวน สร้างสัญญาณเสียงในช่วงแรกได้ศึกษาสมการของ Jerkster ซึ่งมีเอกสารอ้างอิงไม่เพียงพอที่จะนำมาอธิบาย เพื่อให้เกิดความเข้าใจและใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้
- 2.ในช่วงการออกแบบวงจรใช้เวลานานเนื่องจากต้องหาทางในการทำให้ได้ความถี่ที่ตรงกับโน้ตเสียงแต่ละระดับ
- 3.ปัญหาการออกแบบลายวงจรและการบัดกรีเกิดความผิดพลาดเนื่องจากไม่มีความชำนาญมากนัก

5.2 การแก้ปัญหา

- 1.หาวงจรถอดวนสร้างสัญญาณเสียงจากสมการอื่นมาศึกษาแทน โดยเปลี่ยนเป็นวงจรสร้างสัญญาณอลวนที่เกิดจากสมการของ Chua
- 2.ศึกษาหาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่และวิเคราะห์สิ่งที่วงจรต้องการแล้วทำการสร้างวงจร และแก้ไขจนได้วงจรที่ต้องการ
- 3.ทำการแก้ไขลายวงจรให้ถูกต้อง

บรรณานุกรม

1. Rabinder N. Madan, **Chua's Circuit, A Paradigm for CHAOS**, World Scientific series on nonlinear science, 1993.
2. Paul W. Tuinenga, **Spice, A Guide to Circuit Simulation & Analysis Using Pspice**, Second Edition, Prentice Hall A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey 07632
3. http://ird.sut.ac.th/VIJAI_Content/finished/Others/Thai%20music%20website/flute.html “ขลุ่ยเพียงออ-ระดับเสียงเพียงออ ”
4. http://edltv.thai.net/index.php?mod=Courses&file=showcontent&cid=531&sid=504&lid=125317&lid_parent=125380 “คลื่นเสียง”
5. http://trsc.ac.th/web_load_st/school/k01.html “เรื่องของขลุ่ย”
6. “รวมวงจร Project 1”, ทีมงานอิเล็กทรอนิกส์แฟนคลับ , 2550 , บริษัท ดวงกลมสมัย , กรุงเทพฯ
7. “ทฤษฎีและการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์” เล่ม 2 , ยืน ภู่วรวรรณ, ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด มหาชน, กรุงเทพฯ, 2538
8. “รวมโครงการอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 2”, หจก เอช-เอ็น การพิมพ์ , กรุงเทพฯ, 2530
9. A gallery of Chua attractors , Series A , Vol.6 , Elecnora Bilotta กับ Pietro Pantano , world Scientific Publishing Co.Pte. Ltd. ,2008
10. “บันทึก 380 วงจร ไอซี”, ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) , กรุงเทพฯ , 2551
11. www.chuacircuit.com
12. [en.wikipedia.org/chua's circuit](http://en.wikipedia.org/chua's_circuit)
13. www.kmitl.ac.th/~kpteeraw/data_com/datacom_52/filter.htm