

หุ่นยนต์เคลื่อนไหวแบบวงจรรอนาน์คา
ANALOG CHAOTIC ROBOT

กฤษณ เชนากุล
KITSANA SENAKUL

กิตติชัย ปอวิจิตกุล
KITTICHAI POWJITKUL

ปานวัฒน์ ชัยคำ
PANUWAT CHAIKAM

ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สาขาวิชาวิศวกรรมสารพัดกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

หุ่นยนต์อลวนแบบวงจรรอนาล็อก
ANALOG CHAOTIC ROBOT

กฤษณ เสนากุล

KITSANA SENAKUL

กิตติชัย ปอวิจิตกุล

KITTICHAJ POWIJITKUL

ภาณุวัฒน์ ชัยคำ

PANUWAT CHAIKAM

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ANALOG CHAOTIC ROBOT

KITSANA SENAKUL
KITTCHAI POWIJKUL
PANUWAT CHAIKAM

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEER
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAY 2013

หัวข้อปริญญาโท	หุ่นยนต์อลวนแบบวงจรรนาล็อก
นักศึกษา	นาย กฤษณ เสน่ากุล รหัสนักศึกษา 53010060 นาย กิตติชัย ปอวิจิตกุล รหัสนักศึกษา 53010105 นาย ภาณุวัฒน์ ชัยคำ รหัสนักศึกษา 53011240
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. กฤดากร กล่อมการ
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาการสร้างหุ่นยนต์โดยนำสัญญาณเคออสติก (Chaotic) ที่ได้จากวงจรรนาล็อก มาประยุกต์ใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพื่อศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวงจรชนิดต่างๆ และนำมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ต่างๆ ได้เช่น หุ่นยนต์สำรวจพื้นที่ หุ่นยนต์เพื่อการศึกษาวงจรรนาล็อก หุ่นยนต์ทำความสะอาด หรือนำไปประยุกต์กับเครื่องใช้ไฟฟ้า ภายในบ้าน เป็นต้น

Thesis Title	Analog Chaotic Robot		
Student	Mr. Kidsana	Senakul	ID. 53010060
	Mr. Kittichai	Powijitkul	ID. 53010105
	Mr. Panuwat	Chaikam	ID. 53011240
Advisor	Asst.Prof.Dr. Kitdakorn Klomkarn		
Graduate Level	Bachelor Degree of Engineering		
Department	Information Engineering		
Academic Year	2013		

Abstract

This paper present how to build the robot with chaotic signal that gain for analog circuit and pulse signal to adapt the movement of the robot with alternate analog circuit which can be use with vary type of robot such as robotic space exploration, robotic for analog education analog circuit, cleaning robot or can adapt with electric appliances.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำได้ทำงานประสบความสำเร็จขึ้นมาได้ เพราะได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านต่างๆ ทั้งคำปรึกษาทางด้านวิชาการ และคำแนะนำในการลงมือปฏิบัติงาน รวมถึงการช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ จาก ผศ.ดร. กฤตากร กล่อมการ ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์มา ณ ที่นี้ด้วย

ทางผู้จัดทำขอขอบคุณเพื่อนๆ วิศวกรรมสารสนเทศที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้ความสนับสนุน คำแนะนำ ตลอดจนการให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำโครงการ

นาย กฤษณ เสนากุล
นาย กิตติชัย ปอวิจิตกุล
นาย ภาณุวัฒน์ ชัยคำ
ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญ(ต่อ)	V
สารบัญ(ต่อ)	VI
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
สารบัญรูป(ต่อ)	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เคออดิก	4
2.1.1 คุณสมบัติของเคออส	5
2.1.2 ประโยชน์ของเคออส	5
2.2 ลอเรนซ์	6
2.3 วงจรขยาย	6
2.3.1 ตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการ	6
2.3.2 หลักการพื้นฐานของออปแอมป์	7
2.3.3 คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ	7
2.3.4 การใช้ออปแอมป์ในการขยายสัญญาณ	7
2.4 มอเตอร์	11
2.4.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ	12
2.4.2 โครงสร้างและการทำงานพื้นฐาน	12
2.4.3 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรง	13
2.5 ไดโอด	14
2.5.1 ชนิดของไดโอด	14
2.5.2 คุณสมบัติของไดโอด	15
2.5.3 ความต้านทานของตัวไดโอด	16
2.5.4 ความต่างศักย์คร่อมตัวไดโอดด้านไบแอสตรง	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.5 ความต่างศักย์คร่อมตัวไดโอดด้านไบแอสกลับ.....	16
2.5.6 คุณลักษณะสมบัติระหว่างความต่างศักย์และกระแสของไดโอด	16
2.6 ฟังก์ชันชันบันไดของเฮฟวีไซด์	17
2.7 ฟังก์ชันเครื่องหมาย	18
2.7.1 นิยามของฟังก์ชันเครื่องหมาย	18
2.7.2 คุณสมบัติต่างๆของฟังก์ชันเครื่องหมาย	18
2.8 สัญญาณคลื่นไซน์	19
2.8.1 เฟสของสัญญาณ	20
2.8.2 โดเมนเวลาและโดเมนความถี่	21
2.9 สัญญาณพัลส์	23
2.9.1 รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	23
2.9.2 รูปคลื่นพัลส์	23
2.9.3 คุณลักษณะของรูปคลื่นพัลส์.....	24
2.9.4 สมการคลื่นพัลส์ในทางทฤษฎี.....	24
2.9.5 ความแตกต่างคลื่นพัลส์ในทางทฤษฎีและปฏิบัติ	25
บทที่ 3 การสร้างวงจรและการออกแบบ	26
3.1 การสร้างเคออสแบบวงจรอนาล็อก	26
3.2 การสร้างวงจรขยายสัญญาณ.....	28
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	29
4.1 วิธีการทดลอง	29
4.1.1 Simulate วงจรที่แปลงมาจากสมการของลอเรนซ์	29
4.1.2 ทดสอบเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์.....	29
4.1.3 ทดสอบวงจรที่ออกแบบ	29
4.1.4 ทดสอบวงจรขยาย.....	30
4.1.5 ทดสอบรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	30
4.2 ผลการทดลอง.....	30
ผลการทดลองตอนที่ 4.1.1.....	30
ผลการทดลองตอนที่ 4.1.2.....	31
ผลการทดลองตอนที่ 4.1.3.....	35
ผลการทดลองตอนที่ 4.1.4.....	37
ผลการทดลองตอนที่ 4.1.5.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	39
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
5.1.1 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.1	39
5.1.2 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.2	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.3 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.3	39
5.1.4 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.4	40
5.1.5 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.5	40
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน	40
5.3 แนวทางในการแก้ไขปัญหา	40
บรรณานุกรม	41
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก. การต่อวงจรเข้าบอร์ด	44
ภาคผนวก ข. รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์.....	48
ภาคผนวก ค. การออกแบบวงจรโดยใช้โปรแกรม PCB	67

สารบัญตาราง

	หน้า
2.5.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไดโอดเมื่อไบแอสตรงและไบแอสกลับ	15
4.1.5 ผลการทดลองที่ 4.1.5	38

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพแสดงรูปแบบของระบบ	1
2.3.1 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์	7
2.3.2 แสดงวงจรป้อนกลับ	8
2.3.3 แสดงวงจรถยายสัญญาณแบบกลับขั้วสัญญาณ	8
2.3.4 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบง่าย	9
2.3.5 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์	9
2.3.6 การป้อนสัญญาณที่ขั้วบวกและป้อนสัญญาณที่ขั้วลบ	9
2.3.7 การป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับออปแอมป์.....	10
2.3.8 แสดงการขยายผลต่างของอินพุตทั้งสองค่าของออปแอมป์	10
2.3.9 การป้อนสัญญาณอินพุตรวมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์.....	10
2.3.10 วงจรที่นำมาขยายสัญญาณอลวน	11
2.4.1 การหมุนของมอเตอร์ในทิศทางเมื่อขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์	14
2.5.1 ไดโอดแบบจุดสัมผัส	14
2.5.2 ไดโอดแบบหัวต่อหัว	15
2.5.3 สัญลักษณ์ไดโอดในการต่อวงจร	15
2.5.4 ลักษณะสมบัติของไดโอดอุดมคติ	15
2.5.5 การไหลของกระแสในไดโอด	16
2.5.6 สัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด	17
2.8.1 คลื่นสัญญาณไซน์	19
2.8.2 ความเร็วเชิงมุม	20
2.8.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณและตำแหน่งเชิงมุม	21
2.8.4 สัญญาณไซน์ซึ่งมีเฟสเลื่อนไป 0 องศา 90 องศาและ 180 องศา ตามลำดับ	21
2.8.5 โดเมนเวลาของสัญญาณทั้งสองที่ความเข้มและความถี่ต่างกันเมื่อเทียบกับเวลา.....	22
2.8.6 โดเมนเวลาเทียบกับโดเมนความถี่ของสัญญาณทั้งสองที่ความถี่แตกต่างกัน	22
2.9.1 รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	23
2.9.2 รูปคลื่นพัลส์	23
2.9.3 รูปคลื่นพัลส์ในทางปฏิบัติ	25
3.1.1 วงจรไฟฟ้าจากโปรแกรม Matlab	27
3.1.2 วงจรไฟฟ้าจากโปรแกรม Pspice	27
3.2.1 รูปวงจรถยายที่ใช้ในการทดลอง	28
4.2.1 ผลการทดลองที่ได้โปรแกรม Pspice.....	30
4.2.2 ผลการทดลองที่ได้โปรแกรม Pspice	31
4.2.3 ผลการทดลองที่ได้โปรแกรม Pspice	31
4.2.4 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	31
4.2.5 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	32
4.2.6 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	32

สารบัญรูป (ต่อ)

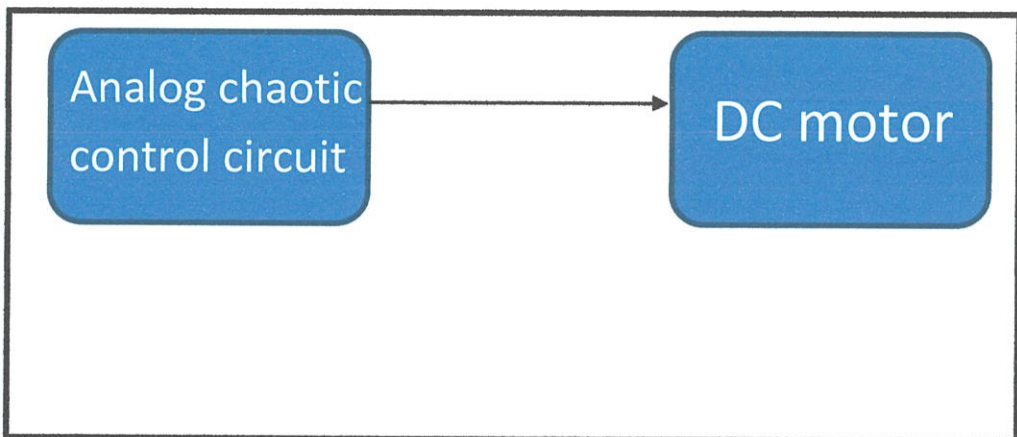
รูปที่	หน้า
4.2.7 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	32
4.2.8 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	33
4.2.9 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	33
4.2.10 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	33
4.2.11 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	34
4.2.12 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	34
4.2.13 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	34
4.2.14 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	35
4.2.15 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1)	35
4.2.16 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) $\text{sgn}(x)$ จากออสซิลโลสโคป	35
4.2.17 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) $100\text{sgn}(x)$ จากออสซิลโลสโคป	36
4.2.18 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) $H(x)$ จากออสซิลโลสโคป	36
4.2.19 กราฟการทดลองเมื่ออัตราขยาย 3 เท่า.....	37
4.2.20 กราฟการทดลองเมื่ออัตราขยาย 5 เท่า.....	37
4.2.21 กราฟการทดลองเมื่ออัตราขยาย 12 เท่า	38
ก.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง	45
ก.2 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวน	46
ก.3 วงจรขยายซึ่งต่อเข้ากับวงจรมกำเนิดสัญญาณอลวนโดยผ่านมอเตอร์กระแสตรง.....	47
ค.1 แผ่น PCB ของวงจรมกำเนิดสัญญาณอลวนในส่วนด้านบน	68
ค.2 แผ่น PCB ของวงจรมกำเนิดสัญญาณอลวนในส่วนด้านล่าง	69
ค.3 แผ่น PCB ของวงจรมขยายสัญญาณ.....	70

บทที่ 1

แนวคิดและที่มาของปัญหา

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากได้ศึกษาทฤษฎีโพลว แล้วจึงมีความต้องการที่จะทดลองนำมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์โดยต้องการหุ่นยนต์ที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่ ซึ่งดูเหมือนจะคาดเดาไม่ได้แต่ภายใต้การเคลื่อนที่เหล่านั้นสามารถทำนายการเคลื่อนที่ได้หากเราเป็นคนกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งสามารถทำได้โดยกำหนดสมการทางคณิตศาสตร์และเปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูปแบบของวงจรไฟฟ้าแบบอนาล็อก โดยหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ครอบคลุมพื้นที่เป้าหมายโดยไม่ต้องมีผู้ควบคุม



รูปที่ 1.1 ภาพแสดงรูปแบบของระบบ

1.2 จุดประสงค์

- เพื่อหารูปแบบการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่โดยที่รูปแบบการเคลื่อนที่แต่ละรูปแบบกำหนดโดยวงจรอนาล็อก
- เพื่อศึกษาสมการของลอเรนซ์ เพื่อสร้างสัญญาณโพลวและนำมาประยุกต์ใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- Analog Chaotic Robot มีรูปแบบการเคลื่อนที่ ที่แน่นอนเป็นไปตามทฤษฎีโพลว
- Analog Chaotic Robot สามารถเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ได้ตามวงจรอนาล็อก

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้เรียนรู้เกี่ยวกับวงจรอนาล็อก และการออกแบบวงจร
- สามารถนำ Analog Chaotic Robot ไปต่อยอดหรือประยุกต์ใช้งานในสถานการณ์ต่างๆได้
- Analog Chaotic Robot สามารถเป็นตัวอย่างในการศึกษาการเคลื่อนที่โดยอ้างอิงการเคลื่อนที่ตามทฤษฎีโวลวน
- เพื่อส่งเสริมให้บุคคลทั่วไปสนใจในการทำหุ่นยนต์ที่มาจากวงจรอนาล็อก

1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้

Software

- โปรแกรม Pspice
- โปรแกรม MatLab
- โปรแกรม PCB Wizard
- โปรแกรม Microsoft Word

Hardware

- ล้อ 3 ชุด
- มอเตอร์ 15 V 2 ตัว
- แบตเตอรี่ 12 V 1.3 amp 2 ก้อน
- แผงวงจร 3 แผง
- ฮีตซิงก์ 8 ตัว
- อุปกรณ์ขยายสัญญาณ LF 351 8 ตัว
- ไดโอด D1N914 5ตัว
- ตัวต้านทาน 1kΩ 10kΩ 120kΩ 1000kΩ
- ตัวเก็บประจุ 22nF 220nF 390nF 470nF 1uF 10uF
- ทรานซิสเตอร์ TIP41 TIP42
- ออสซิลอสโคป
- โวลต์มิเตอร์
- พาวเวอร์ซัพพลี 15 V
- คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

Task No.	Task Name	2012							2013		
		June	July	August	September	October	November	December	January	February	March
1	Problem definition	■									
2	Analysis & Design	■									
3	Software Design		■								
4	Hardware Design		■								
5	Implementation			■							
6	Chaotic Circuit			■							
7	Android			■							
8	Test & Debug							■			
9	Document		■								

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เคออสติก

ทฤษฎีเคออสติกคือการศึกษาในทางคณิตศาสตร์ที่นำมาประยุกต์เข้าวิชาหลากหลายแขนงอาทิ เช่น ฟิสิกส์, วิศวกรรม, เศรษฐศาสตร์, ชีวภาพ เป็นต้น ทฤษฎีเคออสติกศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของระบบที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูงในเงื่อนไขขั้นต้นหรือระบบที่รู้จักกันในชื่อปรากฏการณ์ผีเสื้อ (Butterfly Effect) กล่าวคือถ้าระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของเงื่อนไขเริ่มต้นจะส่งผลกระทบต่อเอาต์พุตอย่างมากส่งผลให้ยากต่อการคาดเดาในระยะยาวปรากฏการณ์นี้อาจเกิดได้แม้แต่กับระบบที่มีการกำหนดค่า (deterministic) หรือไม่มีค่าสุ่มมาเกี่ยวข้องเอาไว้ นั่นหมายความว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในอนาคตในถูกกำหนดโดยค่าอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่เริ่มต้นโดยไม่มีปัจจัยสุ่มมาเกี่ยวข้องหรือกล่าวได้ว่าระบบที่เกิดปรากฏการณ์นี้ไม่อาจสามารถคาดเดาได้ พฤติกรรมเหล่านี้ อาจเรียกได้ว่า simple chaos หรือ deterministic chaos

พฤติกรรมแบบเคออสติก (chaotic behavior) เป็นพฤติกรรมที่ดูไร้ระเบียบที่ดูเหมือนว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแบบเชิงสุ่ม (random) แต่ deterministic ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งที่แท้จริงแล้วแฝงไว้ด้วยระเบียบ

ระบบที่ประพฤติตัวแบบเคออสจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้น (sensitivity dependence on initial condition) ทำให้ไม่สามารถทำนายได้ในระยะยาว (long-term unpredictable) โดยความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นจากการวัดเงื่อนไขเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อเวลาผ่านไป และจากหลักการความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก ทำให้เราไม่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ทุกตัวได้อย่างแม่นยำได้ เพราะการให้ความแม่นยำอย่างหนึ่งมากจะให้ความไม่แน่นอนในอีกอย่างหนึ่ง และถึงแม้ตัวแปรที่อธิบายระบบของเรามีเพียงตัวแปรเดียว ความแม่นยำของค่าที่วัดได้จะจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง ความไม่แน่นอนที่เหลือจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งทำให้เลขนัยสำคัญที่เกิดขึ้นมีมากจนเราไม่สามารถทำนายอะไรได้เลย ดังนั้นเคออสจึงเกิดขึ้นได้ทั้งในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติ

สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้น จะเกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อเวลาผ่านไป เป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อนเริ่มแรก เนื่องจากความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น พฤติกรรมแบบเคออส จึงไม่มีในระบบเชิงเส้น เคออสเกิดขึ้นได้เฉพาะระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) แต่ไม่ใช่ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดความเคออสเสมอไป จะมีช่วงพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบประพฤติตัวแบบเคออส แต่ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นบางระบบก็เป็นเคออสตลอดเวลา

จุดที่เป็นประเด็นสำคัญอีกอย่างหนึ่งในทฤษฎีเคออส คือความอ่อนไหวอย่างสูงของเงื่อนไขเริ่มต้น กับ Principle of weak ที่ถือว่าสาเหตุเบื้องต้นเพียงชนิดเดียว สามารถก่อให้เกิดผลกระทบได้มาก

2.1.1 คุณสมบัติของเคออส

1. มีคุณสมบัติแบบไม่เชิงเส้น โดยที่ฟังก์ชันของเชิงเส้นนั้นคือ $f(x + y) = f(x) + f(y)$ นั่นคือในระบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีผลลัพธ์ของระบบทั้งหมดไม่เท่ากับผลรวมที่เกิดจากส่วนย่อยๆ รวมกันโดยอาจจะมากหรือน้อยกว่าก็ได้ แต่มีข้อสังเกตคือระบบไม่เชิงเส้นทุกระบบนั้นไม่จำเป็นต้องเสมอไปว่าจะจะเป็นระบบเคออสเสมอไป

2. ระบบไม่ได้เกิดแบบสุ่ม คือในระบบเคออส พฤติกรรมทั้งหลายเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอน เหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าแบบการทอยลูกเต๋าหรือการโยนเหรียญ จะไม่เป็นเคออสเพราะเกิดจากการสุ่ม ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าเคออสนั้นเป็น deterministic ไม่ใช่ probabilistic

3. ระบบจะไวต่อสภาวะเริ่มต้น (sensitivity of initial conditions) การเริ่มต้นที่เงื่อนไขต่างกันนิดเดียวอาจทำให้ผลในตอนสุดท้ายแตกต่างกันมาก สาเหตุที่ระบบเคออสไวต่อสภาวะเริ่มต้นก็เพราะว่ามันจะขยายความแตกต่างของเงื่อนไขเริ่มต้นและผลลัพธ์ให้เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะความแตกต่างเมื่อเทียบกับเวลาแล้วมีค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียล

4. ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าในระยะยาวได้ (long-term prediction is impossible) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากข้อที่ 3 เพราะการที่ไวต่อสภาวะเริ่มต้นจะทำให้เราไม่รู้ว่า ระบบที่เราสังเกตการณ์อยู่จะเป็นอย่างไรในระยะยาว บางทีเราไม่สามารถทำนายในระยะสั้น ได้เช่นกัน

5. ระบบที่เป็นเคออสนั้นมักมีเส้นทางการเคลื่อนที่แบบแฟร็กทัล (fractal) เมื่อเราพล็อตเส้นทางการเคลื่อนที่นี้จะพบว่าถ้าเราสังเกตเส้นทางการจากสเกลเล็กหรือใหญ่เพียงใดลักษณะเส้นทางก็จะเหมือนเดิม

2.1.2 ประโยชน์ของเคออส

เคออสนั้นมักเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และทำนายอนาคตโดยประโยชน์แบ่งออกได้เป็นข้อๆอย่างน้อยดังต่อไปนี้

1. ใช้ในการสร้างระบบเคออส

ในการทำงานบางอย่างนั้นการใช้เคออสเข้ามาช่วยจะทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่า อย่างเช่นหุ่นยนต์ที่มีระบบเคออสหาหุ่นระเบิดที่สามารถค้นหาครอบคลุมพื้นที่และยังลดความเสี่ยงของนักกู้ระเบิดได้อีกด้วยและในกรณีของเครื่องล้างจานที่ใช้เคออสสามารถล้างจานได้สะอาดและประหยัดน้ำกว่าเครื่องล้างจานแบบที่ไม่เป็นเคออส

2. ใช้ในการวิเคราะห์ระบบและทำนายอนาคต

ถึงแม้ว่าการทำนายระบบเคออสนั้นจะไม่สามารถทำนายในระยะยาวได้แต่เราสามารถทำนายระบบเคออสในช่วงหนึ่งหรือระยะสั้นได้หากเราหาโมเดลที่มาอธิบายพฤติกรรมของระบบนั้นและทราบสภาวะเริ่มต้นได้อย่างแม่นยำ

3. ใช้ในการควบคุม-สร้างความเสถียรให้กับระบบ

เนื่องจากสภาวะเริ่มต้นของเคออสนั้นมีความสำคัญต่อระบบเคออสอย่างมากการรบกวนเพียงเล็กน้อยอาจก่อให้เกิดผลขยายได้มากในงานควบคุมของวิศวกรนั้นวิศวกรต้องคอยควบคุมระบบโดยที่อาจเติมสัญญาณรบกวนที่เหมาะสมสู่ระบบเคออส ส่งผลให้ควบคุมระบบให้เกิดประสิทธิภาพและเสถียรภาพ

4. ระบบเคออสและการประยุกต์

ระบบเคออสนั้นสามารถประยุกต์เข้ากับหลายสาขาวิชาเช่นการใช้สัญญาณเคออสในการเข้ารหัสข้อมูลหรือว่าการเข้ารหัสรูปภาพได้ เป็นต้น

2.2 ลอเรนซ์

รูปแบบสมการของลอเรนซ์เป็นสมการที่มีความซับซ้อนไม่มาก อีกทั้งฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นสมการบางสมการสร้างได้โดยใช้วงจรทางไฟฟ้า

จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการสร้างสัญญาณเคออสอย่างง่ายของลอเรนซ์มีหลายรูปแบบ เพื่อแสดงให้เห็นตัวอย่างในการสร้างสัญญาณเคออสจะเลือกสมการที่ใช้คือ $\text{sgn}(x)$ และ $H(x)$

$$\begin{aligned}x' &= y \\y' &= -x + ay + z \\z' &= -z + f(x)\end{aligned}$$

2.3 วงจรขยาย

ในวงจรขยายทั่วไปนั้นมักมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า Operational Amplifier หรือเรียกสั้นๆว่า ออปแอมป์ (Op-amp) ออปแอมป์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เนื่องจากออปแอมป์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรแต่งสัญญาณ ซึ่งเป็นตัวกลางในการดำเนินการสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งในทฤษฎีจะกล่าวอุปกรณ์ออปแอมป์บางตัวที่ใช้ในการออกแบบวงจร

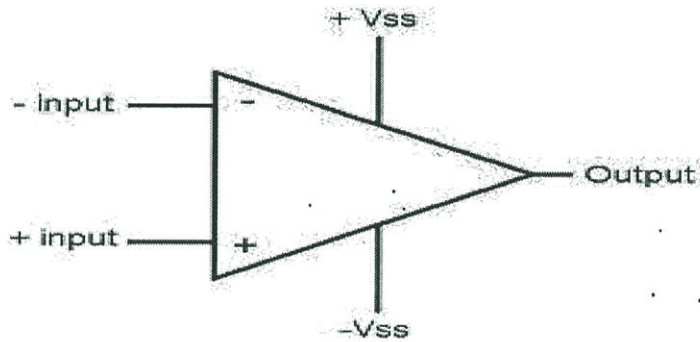
2.3.1 ตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการ

ตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการ (Operational Amplifier) หรือเรียกสั้นๆว่าออปแอมป์ (Op-amp) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีอัตราขยายสูง ออปแอมป์ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแสดงสูตรคณิตศาสตร์ในรูปแบบของวงจรคอมพิวเตอร์อนาล็อก ซึ่ง ณ ปัจจุบันวงจรได้ใช้เทคโนโลยีวงจรอินทิเกรเตอร์ ดังนั้นวงจรจึงประกอบไปด้วยออปแอมป์หลายๆ ตัว ด้วยส่วนประกอบที่ถูกต้องออปแอมป์สามารถแสดงประสิทธิภาพได้หลากหลาย ออปแอมป์สามารถขยายสัญญาณอินพุตโดยให้มีค่าเป็นบวกหรือลบได้ โดยที่วงจรออปแอมป์สามารถแบ่งได้เป็น amplifiers summers integrators และ differentiators ยังสามารถเป็นตัวกรองคลื่นความถี่ ตัวแปลงค่ากระแส - ค่าความต่างศักย์, ตัวแปลงค่าความต่างศักย์ - ค่ากระแส, คอมพาราเตอร์ เป็นต้น

2.3.2 หลักการพื้นฐานของออปแอมป์

ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราการขยายและอิมพีแดนซ์ อินพุต Z_i หรือ R_i สูงมากและมีอิมพีแดนซ์เอาต์พุต Z_o หรือ R_o ต่ำมาก

ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้ขั้วบวกของออปแอมป์จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่อินเฟสกับสัญญาณอินพุต แต่ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับขั้วลบของออปแอมป์จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่ต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศาหรือมุมตรงข้ามกัน



รูปที่ 2.3.1 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์[6]

2.3.3 คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ

1. อัตราขยายของออปแอมป์แบบรูปเปิดมีค่าสูงมากจนเป็นอนันต์ $A_v = \text{infinity}$
2. Z_{in} มีค่าสูงมากจนถือได้ว่าเป็น infinity
3. Z_{out} มีค่าต่ำมากจนถือได้ว่าเป็น 0
4. อัตราขยายของออปแอมป์ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่
5. เมื่อ $V_{in} = 0$ จะได้ V_{out} เป็น 0 ด้วย

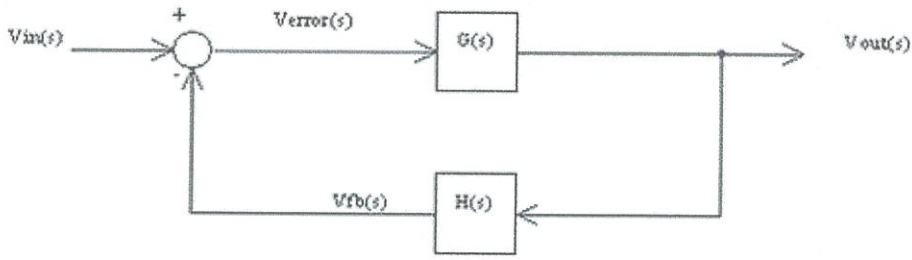
จากคุณสมบัติดังกล่าวแล้ว มีผลสืบเนื่องดังนี้

1. $i_{in} = 0$ เนื่องด้วย Z_{in} สูงมาก
2. ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์เป็น 0 เนื่องจาก $i_{in}, Z_{in} = 0$

2.3.4 การใช้ออปแอมป์ในการขยายสัญญาณ

2.3.4.1 ทฤษฎีการป้อนกลับ

เป็นการป้อนสัญญาณจากเอาต์พุตกลับมาทางอินพุตอีกครั้ง ซึ่งจะมีสองแบบคือ ป้อนกลับแบบกลับมาเสริมกับอินพุต (Positive feedback) หรือ ป้อนกลับแบบมาหักล้างกับอินพุต (Negative Feedback)



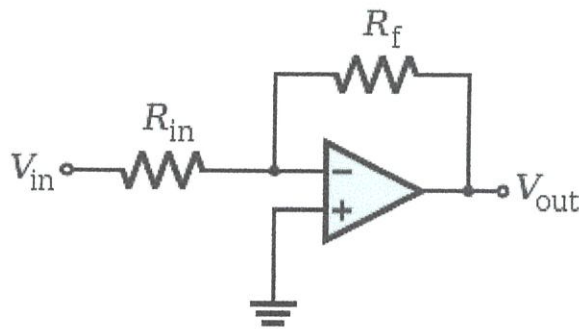
รูปที่ 2.3.2 แสดงวงจรป้อนกลับ[12]

2.3.4.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับขั้วสัญญาณ

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับขั้วสัญญาณ (Inverting Amplifier) ความต่างศักย์ระหว่าง V_{in+} และ $V_{in-} = 0$ ดังนั้นความต่างศักย์เข้า $V_{in-} = 0$ กระแสผ่าน R_i และ R_f มีค่า i

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{iR_f}{iR_i} = -\frac{R_f}{R_i}$$

เพราะฉะนั้น $A_V = -\frac{R_f}{R_i}$



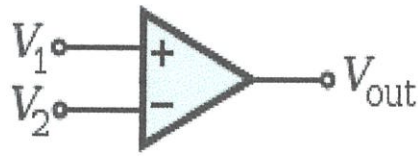
รูปที่ 2.3.3 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับขั้วสัญญาณ[8]

2.3.4.3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณหรือเรียกสั้นๆว่า คอมพาราเตอร์ (Comparator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้โอปแอมป์ทำการเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์โดยทำการอินพุต 2 สัญญาณที่มีค่าความต่างศักย์เป็นบวกและค่าความต่างศักย์เป็นลบ และเอาท์พุตที่ได้มีเพียงสัญญาณเดียวเป็นค่าไบนารีซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อบ่งชี้ว่าสัญญาณใดมีค่าที่มากกว่าตามค่า

$$V_{out} = \begin{cases} 1, & V_+ > V_- \\ 0, & V_+ < V_- \end{cases}$$

ซึ่งส่วนใหญ่อุปกรณ์นี้มักจะใช้ในการวัดสัญญาณหรือว่าแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลเช่น analog-to-digital converters (ADCs) เป็นต้น

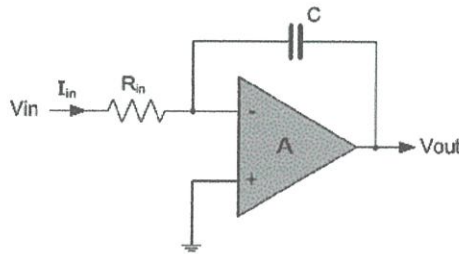


รูปที่ 2.3.4 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบง่าย[8]

2.3.4.4 วงจรอินทิเกรเตอร์

เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีพื้นฐานมาจากออปแอมป์ วงจรอินทิเกรเตอร์สามารถแสดงแทนสูตรทางคณิตศาสตร์ของการอินทิเกรตที่เทียบกับเวลา โดยที่วงจรอินทิเกรเตอร์มีความต่างศักย์อินพุตเข้าผ่านค่า R และมีค่า C เป็นตัวป้อนสัญญาณเอาต์พุตกลับ

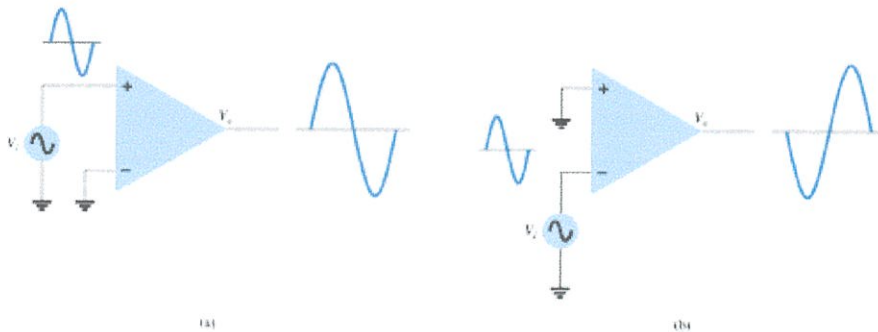
$$V_{out} = \frac{-1}{RC} \int V_{in} dt$$



รูปที่ 2.3.5 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์[9]

2.3.4.5 การทำงานที่อินพุตด้านเดียว

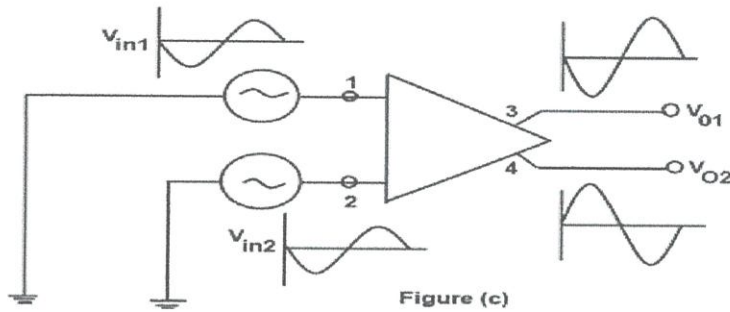
การทำงานที่อินพุตด้านเดียว (Single Ended Input) คือการป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วใดขั้วหนึ่งส่วนขั้วอินพุตที่เหลือต่อลงกราวด์ ถ้าป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วบวกและต่อขั้วลบลงกราวด์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับการขยายกับสัญญาณอินพุตจะมีมุมอินเฟสกัน ดังรูปในทางตรงข้าม ถ้าป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วลบและต่อขั้วบวกลงกราวด์จะได้รับสัญญาณที่มีมุมต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา ดังรูป



รูปที่ 2.3.6 การป้อนสัญญาณที่ขั้วบวกและป้อนสัญญาณที่ขั้วลบ[5]

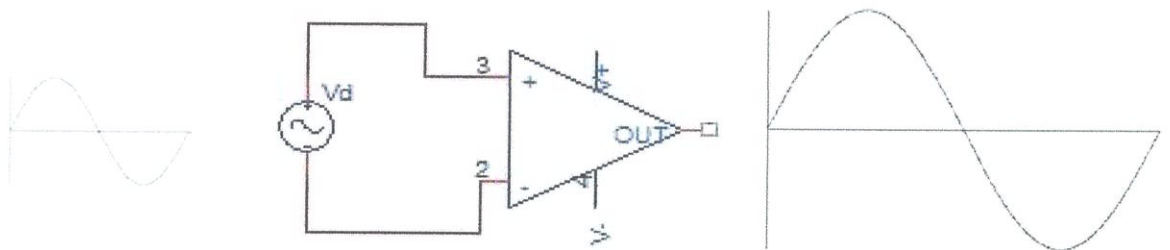
2.3.4.6 การทำงานที่อินพุตสองด้าน

การทำงานที่อินพุตสองด้าน (Double Ended Input) คือการป้อนสัญญาณอินพุตทั้งสองด้าน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 อย่างคือแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) และแบบโหมดร่วม (Common Mode) การทำงานแบบดิฟเฟอเรนเชียล คือการป้อนกันสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับขั้วอินพุตทั้ง 2 ดังที่ได้ตามรูป



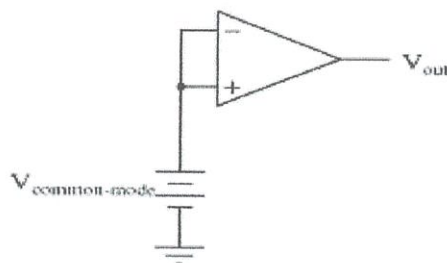
รูปที่ 2.3.7 การป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับออปแอมป์[10]

เนื่องจากขั้วอินพุตของออปแอมป์เป็นบวกและลบสัญญาณอินพุตจึงหักล้างกัน ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตจึงเกิดจากการขยายผลต่างของสัญญาณอินพุตทั้ง นั่นคือ $V_1 - V_2$ ซึ่งจะสามารถเขียนใหม่เพื่อพิจารณาได้รูป จะสังเกตได้ว่าสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตอินเฟสกัน



รูปที่ 2.3.8 แสดงการขยายผลต่างของอินพุตทั้งสองค่าของออปแอมป์[2]

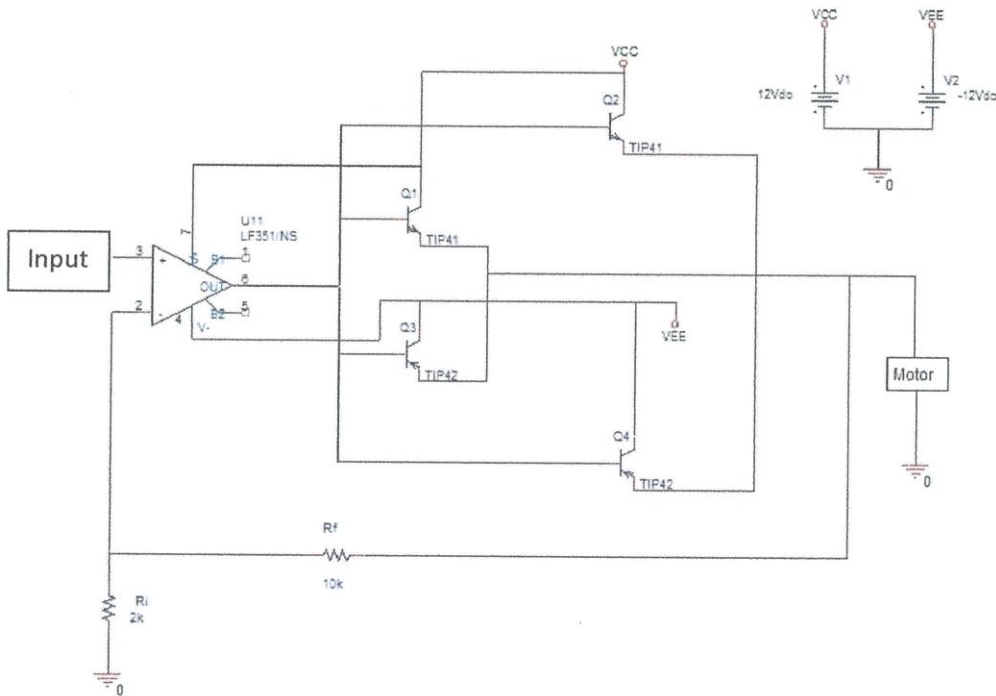
การทำงานแบบโหมดร่วม คือ การป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วทั้งสองของออปแอมป์ดังรูป



รูปที่ 2.3.9 การป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์[9]

ในทางอุดมคติ สัญญาณอินพุตทั้ง 2 ขั้วต้องได้รับการขยายที่เท่ากัน ทำให้เกิดสัญญาณที่มีขั้วตรงข้ามกันที่อินพุต สัญญาณเหล่านี้หักล้างกันแล้วหยุดหายไป สัญญาณเอาต์พุตจึงเป็น 0 โวลต์ แต่ในทางปฏิบัติยังมีสัญญาณเอาต์พุตเหลืออยู่เล็กน้อย โดยเราเรียกว่า สัญญาณโหมดรวม

จากการที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนี้ ออปแอมป์จะมีคุณสมบัติในการขยายความต่างศักย์ ซึ่งถ้าต้องการขยายกระแสจะต้องใช้ทรานซิสเตอร์มาช่วยในการขยาย ในการทดลองได้ใช้วงจรขยายตามรูปซึ่งจะมีอัตราส่วนความต่างศักย์ขยายเป็น $1 + \frac{R_f}{R_i}$



รูปที่ 2.3.10 วงจรที่นำมาขยายสัญญาณอลวน

2.4 มอเตอร์

โดยทั่วไปมอเตอร์ที่ใช้งานปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะระบบไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกระแส หลักการหมุนและโครงสร้างได้แก่

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current motors: AC motors) เป็นมอเตอร์และทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดของมอเตอร์ไหลกลับไปมาตลอดเวลา สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามความสำคัญและสัดส่วนของการใช้งานได้ดังนี้

2.4.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (single-phase induction motors) แบ่งเป็น

- เริ่มเดินเครื่องด้วยการแยกเฟส (split-phase start)
- แบบเริ่มเดินเครื่องด้วยตัวเก็บประจุ เดินเครื่องด้วยการเหนี่ยวนำ (capacitor start induction run)
- แบบเริ่มเดินและเดินเครื่องด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor start and run)
- แบบรีพัลล์ชัน (repulsion start)

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (three-phase induction motors) แบ่งเป็น

- แบบกรงกระรอก (squirrel-cage) แบ่งออกเป็นชนิด single speed, two speed และ three speed

- แบบโรเตอร์พันลวด (wound-rotor) แบ่งออกเป็นชนิด slip ring และ commutator
- มอเตอร์ซิงโครนัส (synchronous motors)
- มอเตอร์สเต็ปปิง (stepping motors)
- มอเตอร์แบบมีคอมมิวเตเตอร์ (commutator motors)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current motors: DC motors)

- มอเตอร์แบบวงจรร่วมแม่เหล็กขนาน (shunt motors)
- มอเตอร์แบบวงจรร่วมแม่เหล็กวงจรรอนุกรม (series motors)
- มอเตอร์แบบวงจรร่วมแม่เหล็กผสม (compound motors)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะมีความแข็งแรงทนทาน, ราคาถูก, ประสิทธิภาพสูง, ความแน่นอนในการใช้งานสูง และบำรุงรักษาความสะอาดได้ง่าย ซึ่งในปัจจุบันอาจกล่าวได้ว่าอุตสาหกรรมเกือบทั้งหมดใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นต้นกำลังกล ขนาดมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะมีขนาดตั้งแต่ต่ำกว่า 1 แรงม้าที่ความต่างศักย์ต่ำ (110-660 โวลต์) กระทั่งถึงหลายพันแรงม้าที่ความต่างศักย์สูง (3.0 กิโลโวลต์ หรือสูงกว่า)

2.4.2 โครงสร้างและการทำงานพื้นฐาน

มอเตอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล การหมุนของมอเตอร์เกิดจากแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetic field) 2 ชุด คือที่สเตเตอร์ (stator) และ โรเตอร์ (rotor) พยายามที่จะจัดเส้นตรงแรงแม่เหล็กให้อยู่ในแนวเดียวกัน การที่สนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุดกระทำลักษณะดังกล่าวทำให้มอเตอร์หมุนได้และยังมุมที่แตกต่างกันของแนวแกนของสนามแม่เหล็ก ทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์รวมทั้งความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเท่าไร ก็ยังทำให้เกิดแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำให้นิวของสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุดเคลื่อนเข้าหากันมากเท่านั้น ผลลัพธ์ของแรงกระทำอันนี้คือแรงบิดของมอเตอร์หรือทอร์ก (torque) โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กในมอเตอร์แบบต่างๆจะมีทั้งแบบหมุนไปรอบๆตัวของมอเตอร์และแบบที่หยุดที่อยู่กับที่ ตัวอย่างแบบสนามแม่เหล็กหมุนได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ชนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ส่วนแบบสนามหยุดนิ่งได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากโครงสร้างที่ง่าย แข็งแรง และไม่ต้องใช้แปรงถ่าน (carbon brush) มีการทำงานเกิดจากสนามแม่เหล็กในแกน (core) ที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) หมุนแล้วเหนี่ยวนำโรเตอร์ที่ขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) ให้หมุนตาม หรือตัวนำในโรเตอร์เกิดจากสนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ แต่เคลื่อนที่หมุนไปรอบๆ สเตเตอร์สนามแม่เหล็กจะถูกส่งผ่านช่องอากาศ

(air gap) มาเหนี่ยวนำตัวนำโรเตอร์ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากโรเตอร์ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เกิดจากความต่างศักย์กระแสสลับที่ป้อนเข้าทางสเตเตอร์ สำหรับในระบบ 50 เฮิร์ต ที่ใช้กันในประเทศไทยจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วที่ 750 รอบต่อนาที 1,000 รอบต่อนาที 1,500 รอบต่อนาที และ 3,000 รอบต่อนาที สำหรับมอเตอร์แบบ 8 ขั้ว 6 ขั้ว 4 ขั้ว และ 2 ขั้วตามลำดับเราเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ (synchronous speed)

2.4.3 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) เป็นทรานส์ดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีคุณลักษณะพิเศษคือแรงบิดของเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ แรงบิดของเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงจะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการนี้แสดงได้ในรูป ในที่นี้ กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างสนามที่ประกอบด้วย เส้นแรงแม่เหล็ก Φ และขดลวดตัวนำเหล่านี้อยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ r ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K\Phi i \quad (2.4.1)$$

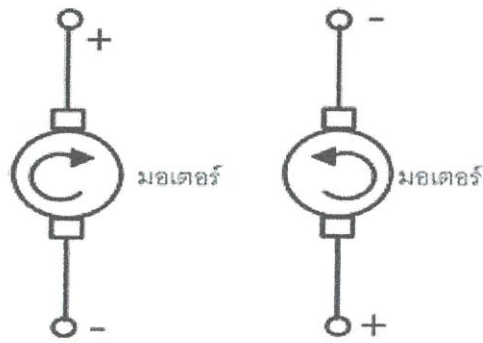
เมื่อ	T	คือ แรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร
	Φ	คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์
	I	คือ กระแส มีหน่วยเป็น แอมแปร์
	K	คือ ค่าคงตัว

ดังนั้นแรงบิดของเพลลาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสเมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวมันเอง ค่าความต่างศักย์นี้จะสัมพันธ์กับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์และด้านการไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ย้อนกลับนี้ และความเร็วของเพลลามอเตอร์คือ

$$E = K\Phi\omega \quad (2.4.2)$$

เมื่อ	E	คือ ความต่างศักย์ย้อนกลับหรือ emf มีหน่วยเป็น โวลต์
	Φ	คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์
	Ω	คือ ความเร็วของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที

การทำให้มอเตอร์กระแสตรงทำงาน ก็เพียงเราป้อนความต่างศักย์แล้วทำให้กระแสไหลผ่านมอเตอร์กระแสตรง โดยการหมุนจะหมุนเป็นหมุนตามเข็มนาฬิกา หรือหมุนทวนเข็มนาฬิกา ก็จะเป็นขึ้นอยู่ว่าป้อนความต่างศักย์ที่เป็นบวกให้กับขั้วไหน



รูป 2.4.1 แสดงการหมุนของมอเตอร์ในทิศทางเมื่อขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์[17]

จากสมการ (2.4.2) จะเห็นได้ว่า ความเร็วของมอเตอร์แปรผันตามความต่างศักย์ที่ตกคร่อมมอเตอร์ ดังนั้นถ้ามีความต่างศักย์ที่ตกคร่อมมอเตอร์กระแสตรงสูง จะทำให้มอเตอร์กระแสตรงจะหมุนด้วยความเร็วรอบสูง ในทางกลับกัน ถ้าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมมอเตอร์กระแสต่ำ จะทำให้มอเตอร์กระแสตรงหมุนด้วยรอบที่ต่ำเช่นกัน

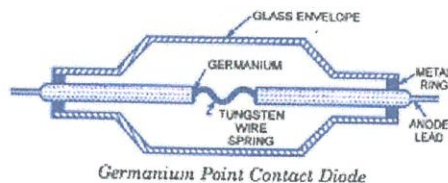
2.5 ไดโอด (Diode)

เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของวงจรรีเลย์ทรานซิสต์ทั่วไปในสมัยก่อนไดโอดมักจะเป็นแบบหลอดสุญญากาศ ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้สิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่ ซึ่งทำด้วยสารกึ่งตัวนำได้เข้ามาแทนที่หลอดสุญญากาศ ไดโอดที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำมีสองขั้ว และมีขนาดเล็กใช้งานได้ง่าย

2.5.1 ชนิดของไดโอด

ไดโอดทำจากสารกึ่งตัวนำแบ่งได้ตามชนิดของเนื้อสารที่ใช้ เช่น เป็นชนิดเยอรมันเนียมหรือเป็นชนิดซิลิกอน นอกจากนี้ไดโอดยังแบ่งตามลักษณะตามกรรมวิธีที่ผลิต คือ

1. ไดโอดชนิดจุดสัมผัส (Point-contact diode) ไดโอดชนิดนี้เกิดจากการนำสารเยอรมันเนียมชนิด N มาแล้วอัดสายเล็ก ๆ ซึ่งเป็นลวดแพลตินัม (Platinum) เส้นหนึ่งเข้าไปเรียกว่า หนวดแมว จากนั้นจึงให้กระแสค่าสูง ๆ ไหลผ่านรอยต่อระหว่างสายและผลึกจะทำให้เกิดสารชนิด P ขึ้นรอบ ๆ รอยสัมผัสในผลึกเยอรมันเนียม ดังรูป



รูปที่ 2.5.1 ไดโอดแบบจุดสัมผัส[16]

2. ไดโอดชนิดหัวต่อ P-N (P-N junction diode) เป็นไดโอดที่สร้างขึ้นจากการนำสารกึ่งตัวนำชนิด N มาแล้วแพร่อนุภาคอะตอมของสารบางชนิดเข้าไปในเนื้อสาร P ชั้นบางส่วน แล้วจึงต่อขั้วออกใช้งานไดโอดชนิดนี้มีบทบาทในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และมีที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2.5.2 ไดโอดแบบหัวต่อหัว[16]

2.5.2 คุณสมบัติของไดโอด

ไดโอดที่ใช้ในวงจรมีสัญลักษณ์ เป็นรูปลูกศรมีขีดขวางไว้ ดังรูปที่ 2.5.3

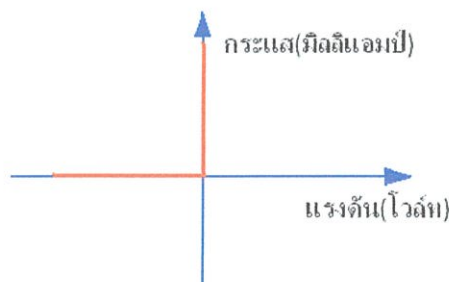


รูปที่ 2.5.3 สัญลักษณ์ไดโอดในการต่อวงจร

ตัวลูกศรเป็นสัญลักษณ์แทนสารกึ่งตัวนำชนิด P ซึ่งเป็นขั้วแอนโนด (ขั้วบวก) ของไดโอด ลูกศรจะชี้ในทิศทางที่โฮลเคลื่อนที่ส่วนขีดคั่นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N ซึ่งเป็นขั้วคาโทด (ขั้วลบ) ดังนั้นเราจะสามารถพิจารณาว่า ไดโอดถูกไบแอสตรงหรือไบแอสกลับได้ง่าย ๆ โดยพิจารณาดูว่า ถ้าขั้วแอนโนดมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าคาโทดแล้ว ไดโอดจะถูกไบแอสตรง ถ้าขั้วแอนโนดมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกน้อยกว่าคาโทดก็แสดงว่าไดโอดถูกไบแอสกลับ

ตารางที่ 2.5.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไดโอดเมื่อไบแอสตรงและไบแอสกลับ

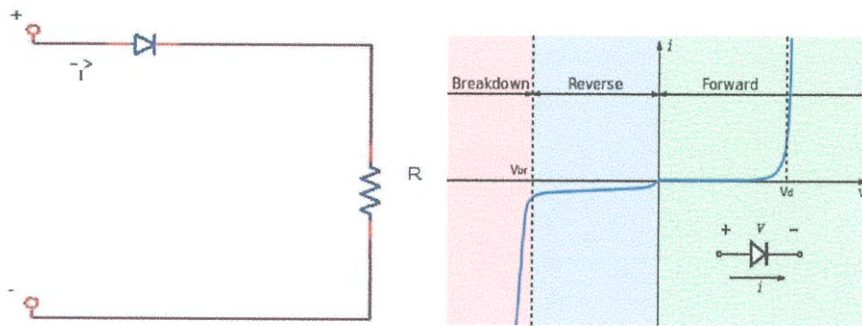
ไบแอสตรง	ไบแอสกลับ
1. มีกระแสไหลผ่านไดโอด	1. มีกระแสไหลผ่านไดโอด
2. ถือว่าไดโอดมีความต้านทานน้อยมาก	2. ถือว่าไดโอดมีความต้านทานสูงมาก
3. โดยทั่วไปถือว่าไดโอดลัดวงจร	3. โดยทั่วไปถือว่าไดโอดเปิดวงจร



รูปที่ 2.5.4 ลักษณะสมบัติของไดโอดอุดมคติ[16]

2.5.3 ความต้านทานของตัวไดโอด

เนื่องจากความต้านทานของตัวไดโอด ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงถือว่า ไดโอดมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ลักษณะสมบัติระหว่างความต่างศักย์และกระแสจะเป็นตัวแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอด (ID) กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวไดโอด (VD) ทั้งในทิศทางไบแอสตรง และไบแอสกลับ ลักษณะสมบัติทางด้านไบแอสตรงจะเริ่มมีกระแสไหลผ่านไดโอดเมื่อใส่ความต่างศักย์แก่ไดโอดด้วยค่า ๆ หนึ่งความต่างศักย์นี้คือค่าความต่างศักย์ที่เราเรียกว่า ความต่างศักย์คัทอิน (cut in voltage) ของไดโอด



รูปที่ 2.5.5 การไหลของกระแสในไดโอด[20]

2.5.4 ความต่างศักย์คร่อมตัวไดโอดด้านไบแอสตรง

ค่ากระแสอิมิต์ย้อนกลับสำหรับซิลิกอนไดโอดกับของเยอรมันเนียมไดโอดยังมีค่าไม่เท่ากัน ด้วยซิลิกอนไดโอดมีค่ากระแสอิมิต์น้อยกว่าของเยอรมันเนียมไดโอดประมาณ 1000 เท่าสำหรับค่าความต่างศักย์คัทอินทั้งของซิลิกอนและเยอรมันเนียมจะมีค่าไม่เท่ากัน ค่าความต่างศักย์คัทอินของซิลิกอนไดโอดมีค่าประมาณ 0.6 โวลต์ ส่วนของเยอรมันเนียมไดโอดมีค่าประมาณ 0.2 โวลต์

2.5.5 ความต่างศักย์คร่อมตัวไดโอดด้านไบแอสกลับ

การต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายความต่างศักย์เข้ากับ n-region และขั้วลบเข้ากับ p-region ของไดโอด การต่อแหล่งจ่ายความต่างศักย์ในลักษณะนี้จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระใน n-region ถูกดึงให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ในขณะที่โฮลก็จะถูกดึงจากขั้วลบเช่นกัน จากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลให้บริเวณ Depletion Region ขยายกว้างมากขึ้น จนทำให้ความต่างศักย์ภายในมีค่าเท่ากับ ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายความต่างศักย์แต่มีขั้วตรงกันข้าม จึงส่งผลให้ไดโอดไม่นำกระแสไฟฟ้า ในที่สุด

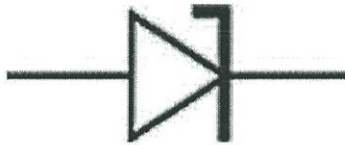
2.5.6 คุณลักษณะสมบัติระหว่างความต่างศักย์และกระแสของไดโอด

ความต้านทานในตัวไดโอดพอที่จะแบ่งออกตามชนิดของความต่างศักย์ที่ให้กับตัวไดโอด ซึ่งแยกออกเป็นความต้านทานทางไฟตรงและความต้านทานไฟสลับ

ความต้านทานทางไฟตรง (static resistance) จากลักษณะสมบัติความต่างศักย์และกระแสของไดโอดจะไม่เป็นลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นความต้านทานในตัวไดโอดจึงไม่คงที่ จากกฎของโอห์มจะได้ความต้านทานทางไฟตรง ที่จะจดทำงานขณะไม่มีสัญญาณอื่นใดเข้ามาความต้านทานทางไฟสลับ (dynamic resistance) เมื่อไดโอดทำงานในขณะที่มีค่าสัญญาณความต่างศักย์

กระแสสลับขนาดเล็ก ๆ บ้อนเข้ามาค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นที่ไดโอดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ค่าความต้านทานนี้จะแตกต่างจากความต้านทานทางไฟตรงเราเรียกค่าความต้านทานนี้ว่า ความต้านทานทางไฟสลับ การหาค่าความต้านทานทางไฟสลับหาค่าได้จากค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์คร่อมตัวไดโอดที่เปลี่ยนไปกับค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในตัวไดโอด เนื่องจากการทำงานของไดโอดเมื่อมีสัญญาณเข้ามา ณ จุดที่ไดโอดทำงานก็จะมีค่าไม่คงที่ไม่แน่นอน เกิดการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะสมบัติ แต่เมื่อคิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไบแอสตรงค่าเล็ก ๆ ของกระแสและความต่างศักย์แล้วจะสามารถหาค่าความต้านทานทางไดนามิกหรือความต้านทานต่อไฟสลับได้

ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) ไดโอดธรรมดาเมื่อทำการไบแอสกลับจนถึงค่าความต่างศักย์พังจะทำให้เกิดการเสียหายได้ ซีเนอร์ไดโอดเป็นซิลิกอนไดโอดชนิดพิเศษที่กระแสย้อนกลับสามารถไหลเฉลี่ยทั่วพื้นที่รอยต่อของไดโอด จึงสามารถทนกระแสย้อนกลับได้สูงมาก ดังนั้นซีเนอร์ไดโอดจึงสามารถใช้ควบคุมความต่างศักย์โดยใช้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวมันเองเป็นตัวควบคุมสัญญาณของตัวซีเนอร์ไดโอดเขียนได้ ดังรูป



รูปที่ 2.5.6 สัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด[16]

ซีเนอร์ไดโอดทางอุดมคติจะควบคุมความต่างศักย์ได้ต่อเมื่อถูกไบแอสกลับกล่าวคือ จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดได้ติดต่อเมื่อไบแอสกลับจนถึงค่าความต่างศักย์ซีเนอร์เท่านั้น สำหรับกรณีไบแอสตรง ซีเนอร์ไดโอดจะทำหน้าที่เหมือนไดโอดธรรมดาคือเสมือนเป็นตัวลัดวงจร

2.6 ฟังก์ชันขั้นบันไดของเฮฟวิไซด์

ฟังก์ชันขั้นบันไดของเฮฟวิไซด์ (Heaviside Step function) หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย คือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แสดงด้วย $H(x)$ หรือค่า $u(x)$ เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องเมื่อค่าเป็น 0 แสดงถึง ค่าตัวแปรที่มีค่าเป็นลบ และเมื่อมีค่าเป็น 1 แสดงถึงค่าตัวแปรที่มีค่าเป็นบวก ส่วนใหญ่ค่า $H[n]$ จะมีค่า n ที่ไม่เท่ากับ 0 เพราะว่าเมื่อค่า n เป็น 0 แล้วจะทำให้ฟังก์ชันขั้นบันไดหาค่าไม่ได้

$$H[n] = \begin{cases} 0, & n < 0 \\ 1, & n \geq 0 \end{cases}$$

ฟังก์ชันนี้มักใช้กับทฤษฎีการควบคุมและการผลิตสัญญาณ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณเปลี่ยนแปลงบนเวลาที่กำหนดและยังสามารถประยุกต์ใช้ในด้านวิศวกรรมโครงสร้างด้วยเช่นกัน

ฟังก์ชันขั้นบันไดของเฮวีไซด์คือการอินทิเกรตของฟังก์ชันไดเรคเดลต้า $H' = \delta$ สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$H(x) = \int_{-\infty}^x \delta(s) ds$$

2.7 ฟังก์ชันเครื่องหมาย

ฟังก์ชันเครื่องหมาย (Signum function or Sign function) เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่งที่ตีงเครื่องหมายออกมาจากจำนวนจริงเขียนแทนด้วย $\text{sgn}(x)$ ฟังก์ชันเครื่องหมายจะมีประโยชน์ในการคำนวณช่วยในการตัดสินใจโดยอ้างอิงจากค่าของตัวแปร การวัด หรือพารามิเตอร์

2.7.1 นิยามของฟังก์ชันเครื่องหมาย

นิยามของฟังก์ชันเครื่องหมายมีดังนี้ เมื่อ x เป็นจำนวนจริง

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$$

2.7.2 คุณสมบัติต่างๆของฟังก์ชันเครื่องหมาย

- สำหรับจำนวนจริง x ใดๆ สามารถแสดงให้อยู่ในรูปผลคูณระหว่างค่าสัมบูรณ์กับฟังก์ชันเครื่องหมาย

$$x = \text{sgn}(x) \cdot |x|$$

- จากสมการดังกล่าว เราจะได้ความหมายของฟังก์ชันเครื่องหมายอีกอย่างหนึ่งเมื่อ x ไม่เท่ากับ 0

$$\text{sgn}(x) = \frac{x}{|x|}$$

- ฟังก์ชันเครื่องหมายคืออนุพันธ์ของฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ ซึ่งประเมินค่าไม่ได้ที่ 0

$$\frac{d|x|}{dx} = \frac{x}{|x|}$$

- ฟังก์ชันเครื่องหมายสามารถหาอนุพันธ์ได้ทุกจุดยกเว้นจุด 0 แต่สำหรับการหาอนุพันธ์ในทฤษฎีการกระจาย อนุพันธ์ของฟังก์ชันเครื่องหมายมีค่าเป็นสองเท่าของฟังก์ชันไดเรคเดลต้า (Dirac delta function)

$$\frac{d}{dx} \text{sgn}(x) = 2\delta(x)$$

- ฟังก์ชันเครื่องหมายมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันขั้นบันไดของเฮวิไซด์ (Heaviside step function) นั่นคือ

$$\text{sgn}(x) = 2H(x) - 1$$

- ฟังก์ชันเครื่องหมายยังสามารถเขียนโดยใช้สัญกรณ์วงเล็บเหลี่ยมของอีเวอร์สัน (Iverson bracket) ดังนี้

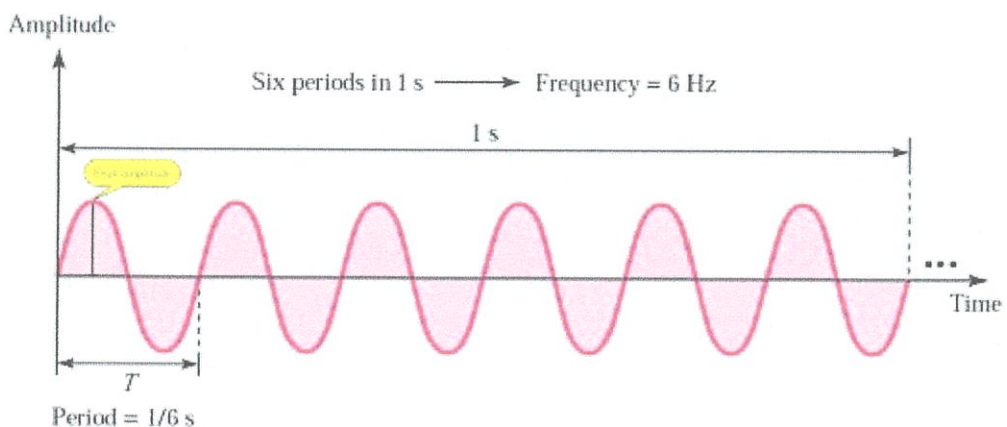
$$\text{sgn}(x) = -[x < 0] + [x > 0]$$

- สำหรับ $k \gg 0$ การประมาณค่าโดยละเอียดของฟังก์ชันขั้นบันไดหาได้จาก

$$\text{sgn}(x) \approx \tanh(kx)$$

2.8 สัญญาณคลื่นไซน์

สัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave Signal or Sinusoidal Wave Signal) มีอีกชื่อหนึ่งเรียกว่าสัญญาณอย่างง่าย (Simple Signal) สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันประเภท Sinusoidal และไม่สามารถแบ่งย่อยออกเป็นฟังก์ชันที่ง่ายกว่านั้นได้ สัญญาณคลื่นไซน์เป็นสัญญาณซ้ำคาบมูลฐาน สำหรับการสื่อสารแบบ Analog มีลักษณะเส้นโค้งต่อเนื่อง ที่มีการแกว่งด้วยคาบเวลาที่ T (วัดจากท้องคลื่น ถึง ยอดคลื่น) ดังรูป



รูปที่ 2.8.1 คลื่นสัญญาณไซน์[5]

สัญญาณดังรูปสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $S(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$ โดยที่

$S(t)$ คือ ความเข้มของสัญญาณ ณ เวลา t ใดๆ ในช่วงพิจารณา

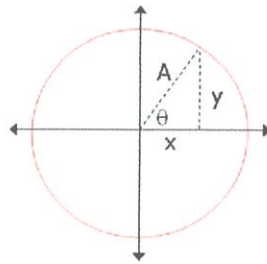
A คือ ความเข้มสูงสุดของสัญญาณ (Peak Amplitude) วัดจากจุดสมดุลถึงยอดคลื่น

f คือ ความถี่ของสัญญาณ ซึ่งสัมพันธ์เป็นส่วนกลับของคาบเวลา T วินาที

ϕ คือ เฟส หรือ ตำแหน่งเชิงมุม ณ จุดเริ่มต้น $t = 0$ ของสัญญาณ

เราสามารถสร้างสัญญาณไซน์ที่มีความสูง A หน่วย ได้จากรูปวงกลมรัศมี A นิยามด้วยสมการ $x^2 + y^2 = A^2$ สอดคล้องกับ ทฤษฎีบท Pythagoras สำหรับความยาวด้านของสามเหลี่ยมมุมฉาก ภายในวงกลม และ ด้วยทฤษฎีบทดังกล่าว เราสามารถเขียน ค่าของ x และ y ในรูปของ A และ ดังต่อไปนี้ $x(\theta) = A \cos(\theta)$ และ $y(\theta) = A \sin(\theta)$

ถ้าสมมติให้ $\text{Sine}(t) = y(\theta(t))$ จะได้ว่า $\theta(t) = \omega t + \phi$, $\omega = 2\pi f$ อีกนัยหนึ่ง ความเข้มของสัญญาณไซน์ ณ เวลา t ใดๆ สามารถคำนวณได้จากความสูง y ของสามเหลี่ยมมุมฉาก ภายในวงกลมรัศมี A ที่มุม $\theta = \omega t + \phi$ เรียก ω ว่า ความเร็วเชิงมุม ดังรูป



รูปที่ 2.8.2 ความเร็วเชิงมุม[5]

2.8.1 เฟสของสัญญาณ

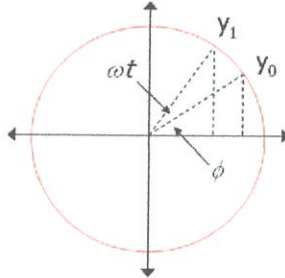
เฟสของสัญญาณ คือ ตำแหน่งเชิงมุม ϕ (radian) ณ จุดเริ่มต้น(เวลา $t = 0$) หรือ คือการเลื่อนของสัญญาณ ในแกนเวลา ณ คาบแรกเนื่องจาก $\theta(t) = \omega t + \phi$ ดังนั้น เราอาจแบ่งมุม $\theta(t)$ ออกเป็น สองส่วน ได้แก่ ωt และ ϕ ซึ่งเป็นตำแหน่งซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา (t) และตำแหน่งคงที่หรือเฟสของสัญญาณ ตามลำดับ

เราสามารถเขียนเป็นแผนผัง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณและตำแหน่งเชิงมุมได้ดังรูปที่ 2.8.3 และอาจกล่าวได้ว่า ณ เวลา $t = 0$ องค์กรประกอบ ωt มีค่าเป็น 0 ดังนั้น $\text{Sine}(t) = A \sin(\phi)$ โดยขนาดของสัญญาณ ณ จุดเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $\text{Sine}(0) = y_0$

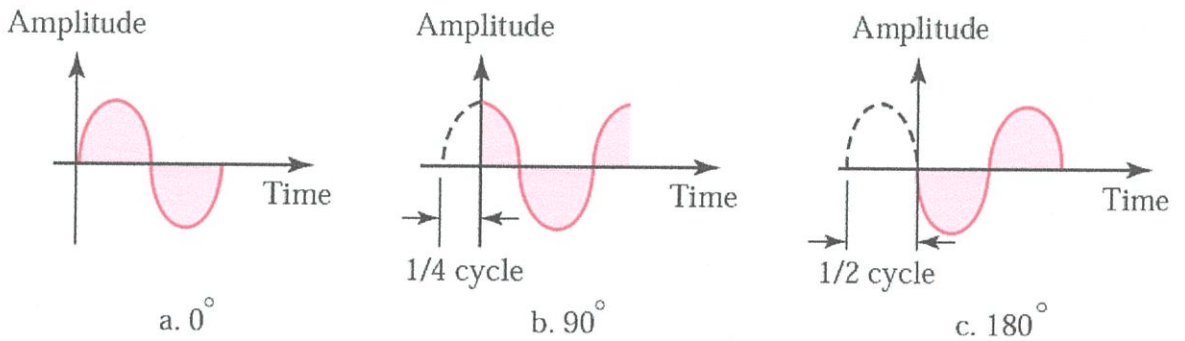
หน่วยการวัดของเฟสได้แก่ rad หรือ องศา โดยที่ $2\pi \text{ rad} = 360$ องศา จากรูปที่ 2.8.4 คือรูปสัญญาณไซน์หนึ่งคาบที่มีเฟสเลื่อน ไป 0 องศา 90 องศา และ 180 องศา ตามลำดับ

เนื่องจากความถี่คืออัตราการเปลี่ยนแปลง (ของสัญญาณ) เทียบกับเวลา ดังนั้นเราอาจพิจารณาจำแนกลักษณะของสัญญาณเชิงความถี่ ได้ดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาสั้น หมายถึง ความถี่สูง (High Frequency)
- การเปลี่ยนแปลงในระยะเวลายาว หมายถึง ความถี่ต่ำ (Low Frequency)
- ถ้าสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความถี่มีค่าเป็น 0 (DC – Direct Current)
- ถ้าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ความถี่มีค่าเป็นอนันต์ (Infinity)



รูปที่ 2.8.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณและตำแหน่งเชิงมุม [5]

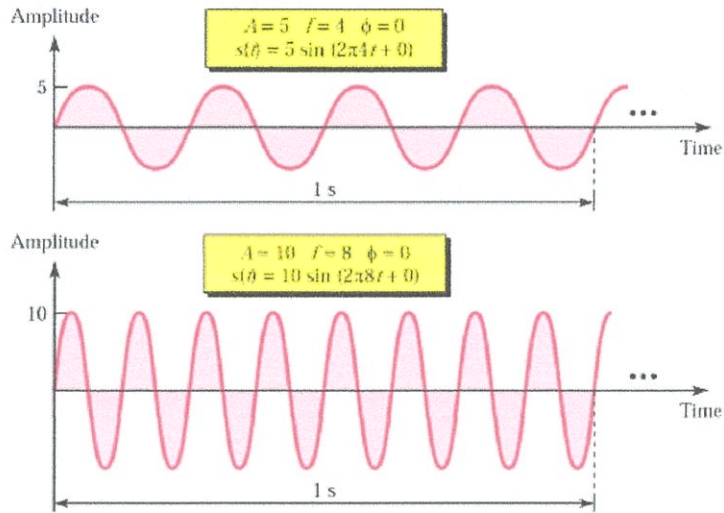


รูปที่ 2.8.4 สัญญาณไซน์ซึ่งมีเฟสเลื่อนไป 0 องศา 90 องศาและ 180 องศา ตามลำดับ[5]

2.8.2 โดเมนเวลาและโดเมนความถี่

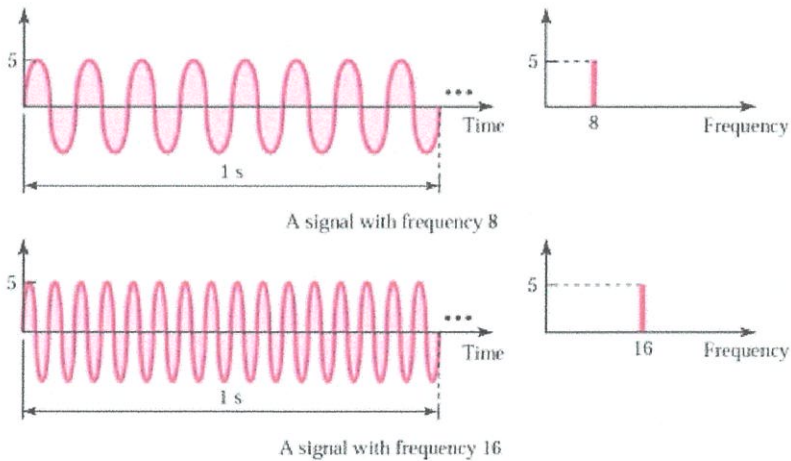
สัญญาณไซน์สัญญาณหนึ่งประกอบด้วยสมบัติ 3 ประการ ได้แก่ ความเข้ม ความถี่และเฟส การนำเสนอสัญญาณดังกล่าวด้วยแผนภาพ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การแสดงผลในโดเมนเวลา (Time-domain Plots) และในโดเมนความถี่ (Frequency-domain Plots)

การแสดงผลในโดเมนเวลา เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้ม (A) เทียบกับเวลา (t) โดยที่สำหรับความถี่ (f) และ เฟส (φ) นั้นถึงแม้จะไม่มี การแสดงอย่างชัดเจน แต่สามารถวัดได้ ดังตัวอย่าง



รูปที่ 2.8.5 โดเมนเวลาของสัญญาณทั้งสองที่ความเข้มและความถี่ต่างกันเมื่อเทียบกับเวลา[5]

การแสดงผลในโดเมนความถี่ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและความถี่ของสัญญาณ ดังตัวอย่างเปรียบเทียบการแสดงผลในโดเมนเวลาและการแสดงผลในโดเมนความถี่ของสัญญาณที่สมมูลกันต่อไปนี้



รูปที่ 2.8.6 โดเมนเวลาเทียบกับโดเมนความถี่ของสัญญาณทั้งสองที่ความถี่แตกต่างกัน[5]

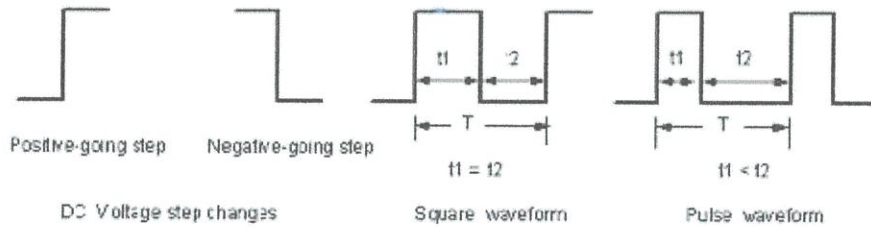
เมื่อพิจารณาจากแผนภาพในรูปที่ 2.8.6 จะเห็นว่าเราสามารถอธิบายคุณสมบัติด้านความเข้มและความถี่ของสัญญาณในการแสดงผลในโดเมนความถี่ด้วยแท่งตรง (Spike) เพียง 1 แท่ง ซึ่งกระชับกว่าการแสดงด้วยการแสดงผลในโดเมนเวลาของสัญญาณที่สมมูลกัน

ดังนั้น สัญญาณการแสดงผลในโดเมนความถี่จึงเหมาะสำหรับใช้อธิบายสัญญาณอนาล็อกชนิดซ้ำคาบ

2.9 สัญญาณพัลส์

2.9.1 รูปคลื่นสี่เหลี่ยม

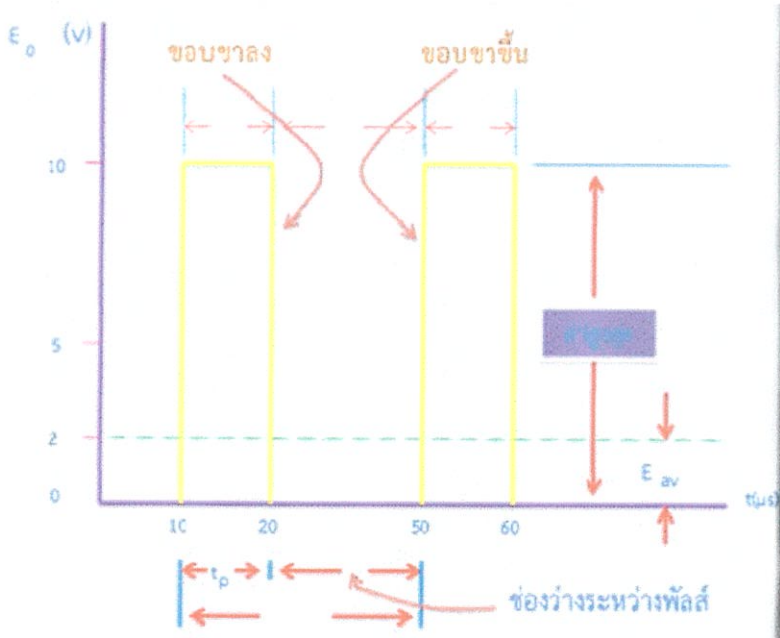
รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Rectangular) เกิดจากระดับความต่างศักย์กระแสตรงที่เปลี่ยนแปลงเป็นขั้น (Step changes) หรือรูปคลื่นขั้นบันไดสองลักษณะคือ Positive-going step และ Negative-going step ดังรูป



รูปที่ 2.9.1 รูปคลื่นสี่เหลี่ยม [4]

2.9.2 รูปคลื่นพัลส์

เป็นคลื่นลักษณะเช่นเดียวกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจัดรูสนั่นเองที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอย่างรวดเร็วจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่ง และเปลี่ยนกลับลงมาอย่างรวดเร็วเข้าสู่ระดับปกติแต่มีความแตกต่างจากรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจัดรูตรงที่ช่วงเวลาของรูปคลื่นที่ปรากฏจะสั้นกว่าช่วงเวลาของรูปคลื่นที่ปรากฏจะสั้นกว่าช่วงเวลาของรูปคลื่นที่ไม่ปรากฏ



รูปที่ 2.9.2 รูปคลื่นพัลส์[19]

2.9.3 คุณลักษณะของรูปคลื่นพัลส์

รูปคลื่นพัลส์ในอุดมคติ (Ideal pulse waveform) คือรูปคลื่นที่พิจารณาโดยไม่คิดค่าช่วงเวลาศูนย์เสี้ยวที่เกิดขึ้นในขณะที่พัลส์มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูงและจากสูงไปต่ำดังแสดงในรูป 2.9.2

เมื่อพิจารณารูปคลื่นพัลส์ที่ได้ในรูปจะมีส่วนประกอบต่างๆของรูปพัลส์ดังนี้ ระดับแรงดันจาก 0 V ถึง 10 V เรียกว่าค่าสูงสุด (peak value) ในช่วงเวลาที่แรงดันเปลี่ยนแปลง 0 V เป็น 10 V พิจารณาที่เวลา $t = 0$ เรียกว่าขอบขาขึ้น (leading edge) ในช่วงเวลาที่แรงดัน 10 V เป็น 0 V พิจารณาที่เวลา $t = 0$ เรียกว่าขอบขาลง (trailing edge) ระยะตั้งแต่ขอบขาขึ้นถึงขอบขาลงเรียกว่าความกว้างของพัลส์ (pulse width) ใช้ตัวย่อ จุดเริ่มต้นของพัลส์ลูกแรกไปจนถึงจุดเริ่มต้นของพัลส์ลูกต่อไปเรียกว่าช่วงเวลาพัลส์เกิดซ้ำ (pulse repetition time) ใช้ตัวย่อ พัลส์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันหลายๆ พัลส์เรียกว่าชุดของพัลส์ (pulse train) ในชุดของพัลส์หนึ่งชุดที่เกิดขึ้นในเวลาและเมื่อพิจารณาจากรูปอีกจะพบว่า

- ขนาดของพัลส์ (Pulse amplitude) คือค่าที่วัดจากระดับแรงดันศูนย์โวลต์ไปถึงค่าสูงสุด (Peak value)
- คาบเวลาของพัลส์ (Time period) ใช้ตัวย่อ T คือระยะเวลาที่วัดจากขอบหน้าของพัลส์ที่เวลา $t = 0$ จนถึงขอบหน้าของพัลส์รูปคลื่นต่อไป
- ความถี่ของพัลส์ (Pulse Repetition Frequency or PRF) คือค่าส่วนกลับของเวลา หรือ $PRF = PPS$ (pulse Per Sec)
- ความกว้างของพัลส์ (Pulse Width or PW) คือช่วงเวลาที่วัดจากขอบหน้าของพัลส์จนถึงขอบหลังของพัลส์
- ช่องว่างระหว่างพัลส์ (Space width or SW) คือช่วงเวลาที่วัดจากขอบหลังของพัลส์รูปคลื่นแรกจนถึงขอบหน้าพัลส์รูปคลื่นถัดไป
- อัตราส่วนของพัลส์ (M / S ratio) คืออัตราส่วนระหว่างความกว้างของพัลส์ (PW) กับช่องว่างระหว่างพัลส์ (SW) $M / S \text{ ratio} = PW / SW$
- วัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle) คือร้อยละของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของพัลส์ (PW) กับคาบเวลาของพัลส์ (T)

2.9.4 สมการคลื่นพัลส์ในทางทฤษฎี

อัตราการเกิดพัลส์ซ้ำ (prr) จะมีค่าเท่ากับส่วนกลับช่วงเวลาพัลส์เกิดซ้ำ (prt) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$prrr = \frac{1}{prt} \quad (\text{Hz})$$

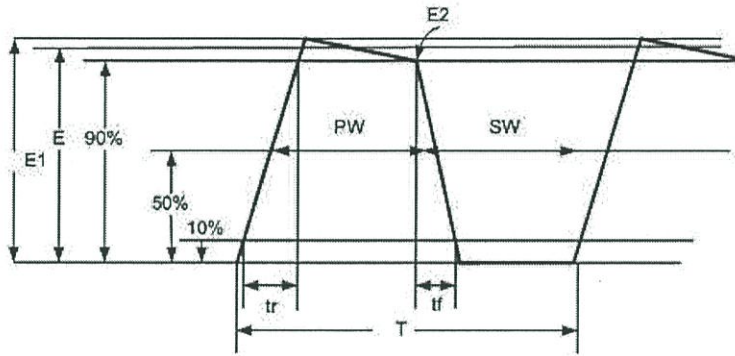
ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นใดๆ อาจเป็นแรงดันหรือกระแสก็ตาม ก็คือส่วนประกอบของไฟตรงของคลื่นนั้นๆ การหาค่าแรงเฉลี่ย (average voltage value) หรือในทฤษฎีจากรูปทำได้โดยการหารพื้นที่ของพัลส์ด้วยช่วงเวลาพัลส์เกิดซ้ำค่าแรงเฉลี่ยนี้ก็คือค่าอ่านได้จริง จากโวลต์มิเตอร์กระแส

$$E_{av} = \frac{A_p}{prt} \quad (\text{Volt})$$

$$A_p = T_p \cdot E_{peak} \quad (\text{Sec-Volt})$$

เมื่อ	E_{av}	คือ ค่าแรงดันเฉลี่ย มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt)
	A_p	คือ พื้นที่ของพัลส์มีหน่วยเป็นวินาที - โวลต์ (Sec - Volt)
	prr	คือ ช่วงเวลาที่พัลส์เกิดซ้ำมีหน่วยเป็นวินาที (Sec)
	T_p	คือ ความกว้างของพัลส์มีหน่วยเป็นวินาที (Sec)
	E_{peak}	คือ แรงดันสูงสุด มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt)

2.9.5 ความแตกต่างคลื่นพัลส์ในทางทฤษฎีและปฏิบัติ



รูปที่ 2.9.3 รูปคลื่นพัลส์ในทางปฏิบัติ[4]

จากรูปคลื่นพัลส์ในทางปฏิบัติจะแตกต่างกับทฤษฎี ดังนี้

- เวลาไต่ขึ้น (Rise time) คือ ระยะเวลาของสัญญาณพัลส์ขอบหน้าเปลี่ยนแปลงจากขนาดของสัญญาณที่ 10 % ไปจนถึง 90 % ของขนาดสูงสุด
- เวลาตก (Fall time) คือ ระยะเวลาของสัญญาณพัลส์ขอบหลังตกจากระดับสัญญาณที่ 90 % ลงไปถึง 10 % ของขนาดสูงสุด
- ความกว้างของพัลส์ (PW) ต้องวัดมาจากค่าเฉลี่ยของความกว้างทั้งหมด คือวัดที่ 50 % ของขนาดสูงสุดของแรงดันเฉลี่ย และค่าช่องว่างของพัลส์ (SW) ก็เช่นเดียวกัน ดังนั้น (T) จะเท่ากับ PW + SW
- ค่าขนาดแรงดันเฉลี่ยของพัลส์ (Average pulse amplitude) คือ ค่าเฉลี่ยจากค่าสูงสุดของขอบหน้าและขอบหลัง
- ความลาดเอียง (Tilt) คือ ความลาดเอียงบริเวณระดับสัญญาณสูงสุดขอบหน้าถึงขอบหลังของพัลส์
- ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นพัลส์ (V_{av}) คือ การนำเอาพื้นที่ที่เกิดพัลส์ ในช่วงความกว้างของพัลส์ (PW) ทั้งด้านบวกและด้านลบของพัลส์มารวมกัน และหาร ด้วยคาบเวลาของพัลส์

บทที่ 3

การสร้างวงจรและการออกแบบ

เนื่องจากเราสามารถนำออปแอมป์ มาสร้างวงจรถ้าเนตสัญญาณอลวนและเพิ่มฟังก์ชันที่ทำให้สัญญาณอลวนมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปโดยมีเทคนิค ดังต่อไปนี้

3.1 การสร้างเคออสแบบวงจรถอนาล็อก

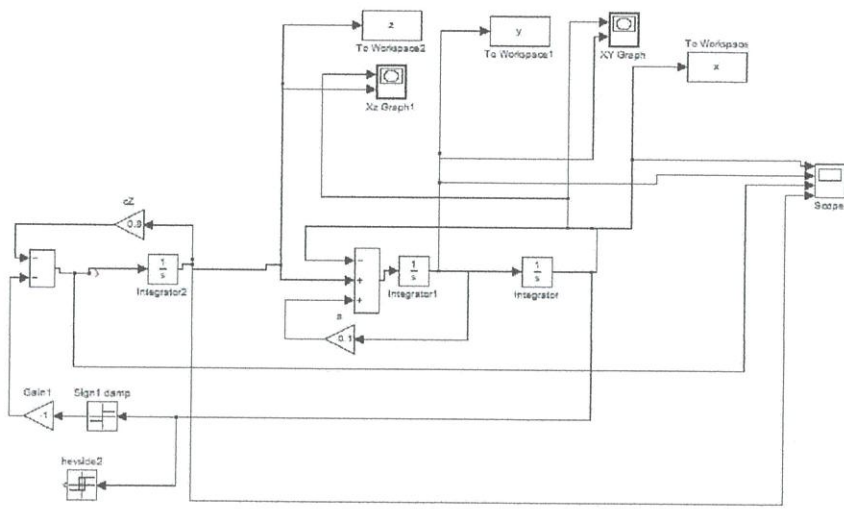
ในการออกแบบวงจรสำหรับสร้างสัญญาณเคออสแบบอนาล็อกสามารถสร้างได้ง่ายโดยอาศัยรูปแบบสมการของลอเรนซ์ ซึ่งสมการมีความซับซ้อนไม่มากอีกทั้งฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้นในสมการบางสมการสามารถสร้างได้โดยใช้วงจรไฟฟ้า

จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการสร้างสัญญาณเคออส (Chaotic signal) อย่างง่ายมีหลายรูปแบบ เพื่อแสดงให้เห็นแสดงให้เห็นตัวอย่างในการสร้างสัญญาณเคออสจะเลือกสมการที่ใช้ $\text{sgn}(x)$ และ $H(x)$ เนื่องจากง่ายในการสร้าง ดังสมการ

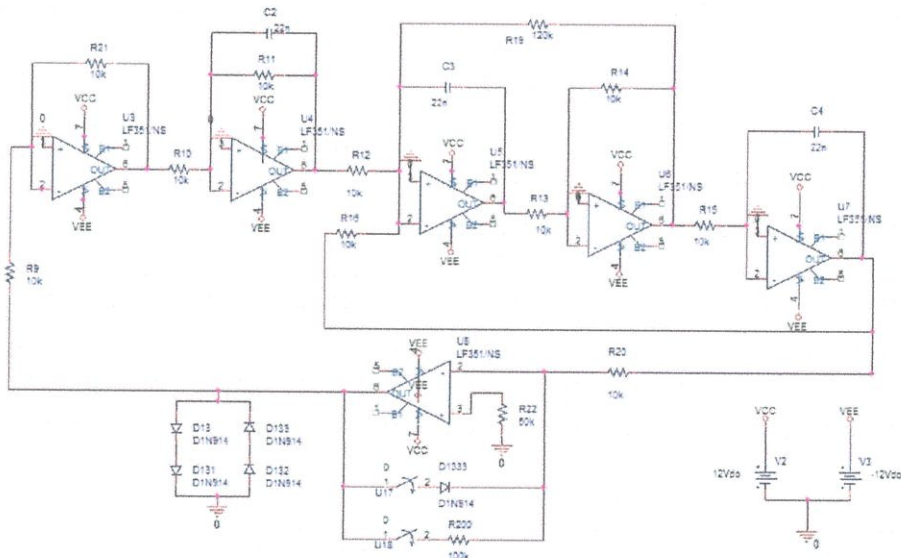
$$\left. \begin{aligned} x' &= y \\ y' &= -x + ay + z \\ z' &= -z + f(x) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

นำสมการทั้ง 3 สมการมาออกแบบวงจรในโปรแกรม Matlab และ โปรแกรม Pspice ตามลำดับซึ่งใช้หลักการของออปแอมป์ , ทฤษฎีการป้อนกลับ มาออกแบบ โดยจะปรับค่ากำลังขยายให้มีความเหมาะสมให้เกิดสัญญาณเคออสและต้องนำมาต่อกับวงจรถยายเพื่อให้มีกำลังมากพอที่จะขับเคลื่อนมอเตอร์จึงทำให้เกิดสมการขึ้นมาใหม่ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} x' &= y \\ y' &= -x + ay + z \\ z' &= -z + f(x), z' = -z + H(x), z' = -z + \text{sgn}(x) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.1.1 บล็อกของวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม Matlab

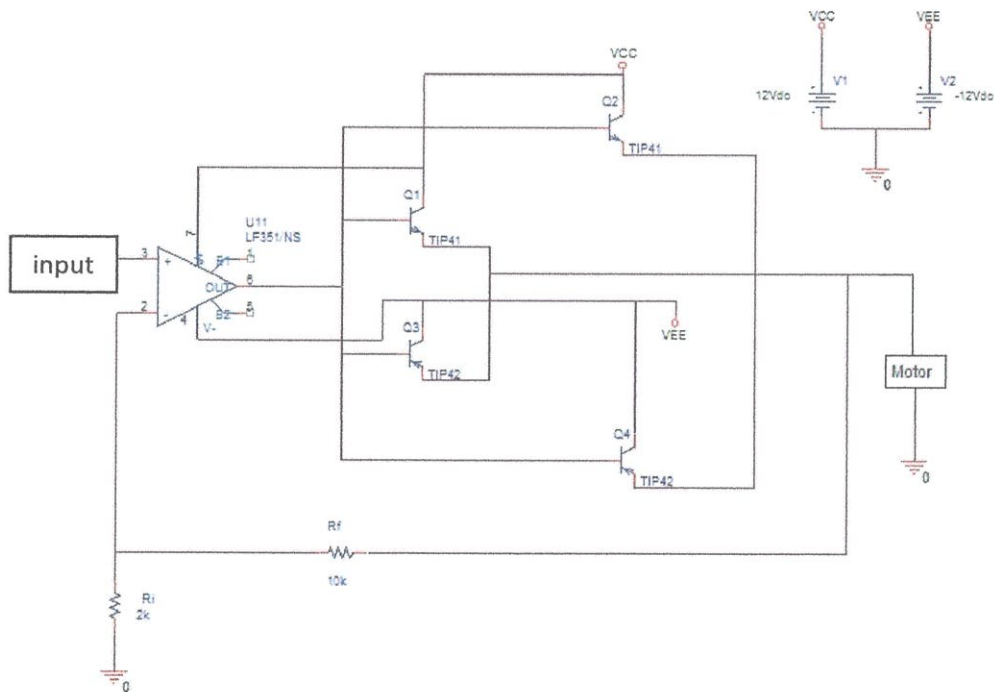


รูปที่ 3.1.2 วงจรที่ออกแบบในโปรแกรม Pspice

3.2 การสร้างวงจรขยายสัญญาณ

เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนมีความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ ดังนั้นการขยายความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าต้องพึ่งวงจรขยายสัญญาณซึ่งอัตราขยายความต่างศักย์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความต้านทานในวงจรและอัตราขยายกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดและการต่อทรานซิสเตอร์ในวงจร

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเราสามารถสร้างได้โดยใช้ออปแอมป์ LF351 1 ตัว ทรานซิสเตอร์ TIP41A TIP42 อย่างละ 2 ตัว และความต้านทาน 2 ตัว มาใช้ในการสร้างวงจรขยายสัญญาณโดยออปแอมป์รับเอาต์พุตจากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน แล้วนำทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวในส่วนขาเบส (Base) มาต่อเข้ากับขาที่ 6 ของออปแอมป์ ขาที่ 7 ของออปแอมป์นำมาต่อเข้ากับขาคอลเลคเตอร์ (Collector) ของทรานซิสเตอร์ TIP41A ทั้ง 2 ตัว ขาที่ 4 ของออปแอมป์นำมาต่อเข้ากับขาคอลเลคเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ TIP42 ทั้ง 2 ตัว ขาอิมิตเตอร์ (Emitter) ของทรานซิสเตอร์ TIP41A และ TIP42 ทั้ง 2 ตัวมาต่อเข้าด้วยกัน จากนั้นนำขาคอลเลคเตอร์ทั้งสองตัวของทรานซิสเตอร์ TIP41A มาต่อเข้าด้วยกัน และทำเช่นเดียวกันกับทรานซิสเตอร์ของ TIP42 จากนั้นนำมอเตอร์ต่อเข้ากับขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัว และต่อเข้ากับความต้านทานป้อนกลับ



รูปที่ 3.2.1 รูปวงจขยายที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 วิธีการทดลอง

4.1.1 Simulate วงจรที่แปลงมาจากสมการของลอเรนซ์

จุดประสงค์

เพื่อทดสอบว่าสมการที่นำมาใช้จะทำให้เกิดสัญญาณเคออสหรือไม่

วิธีการทดลอง

- 1) นำวงจรที่ได้จากสมการ (3.1) มา simulate ในโปรแกรม Pspice
- 2) บันทึกผลการทดลองโดยกราฟที่ได้นั้นเป็นการเทียบระหว่างความต่างศักย์กับเวลา
- 3) ทำการทดลองซ้ำโดยที่เปลี่ยนวงจรที่ได้สมการ $z' = -z + \text{sgn}(x)$

เป็นสมการ $z' = -z + H(x)$ และ $z' = -z + 100\text{sgn}(x)$ ตามลำดับ

- 4) บันทึกผลการทดลอง

4.1.2 ทดสอบเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์

จุดประสงค์

เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมากที่สุดในการนำไปใช้กับวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิล

วิธีการทดลอง

- 1) นำวงจรที่ได้จากสมการ (3.1) มาทดลองเปลี่ยนค่าเก็บประจุในโปรแกรม Pspice
- 2) เปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าแล้วทำการ simulate จากนั้นบันทึกผล
- 3) ทำการทดลองตามข้อที่ 2. อีกครั้ง โดยเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุเป็น
- 4) ทำการทดลองวงจรที่ใช้ $\text{sgn}(x)$ และ $H(x)$ โดยเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุเหมือนกับ

ข้อที่ 3.

- 5) บันทึกผลการทดลอง

4.1.3 ทดสอบวงจรที่ออกแบบ

จุดประสงค์

เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมากที่สุดในการนำไปใช้กับวงจรเคออส

วิธีการทดลอง

- 1) ต่อวงจรตามสมการที่ (3.1) ที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม Pspice ในบอร์ด

ต่อขาที่เป็นอินพุตเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 12V 1.3amp นำเอาที่พุทของวงจร ต่อเข้ากับออสซิลอสโคป

- 2) ป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปในวงจรบันทึกผลการทดลองที่ได้
- 3) ทำการทดลองซ้ำโดยที่เปลี่ยนวงจรที่ได้สมการ $z' = -z + \text{sgn}(x)$ เป็นสมการ

$z' = -z + H(x)$ และ $z' = -z + 100\text{sgn}(x)$ ตามลำดับ

- 4) บันทึกผลการทดลอง

4.1.4 ทดสอบวงจรขยาย

จุดประสงค์

เพื่อศึกษาหลักการควบคุม และวงจรถ่ายเพื่อนำไปขับมอเตอร์กระแสตรงขนาดเล็ก
วิธีทดลอง

- 1) ต่อวงจรถ่ายเข้ากับวงจรเคออสโดยผ่านมอเตอร์กระแสตรง
- 2) เปิดสวิตช์จ่ายไฟให้กับวงจร ปรับให้ $V_{in} = 0$ volt วัดค่า V_{out}
- 3) ปรับ V_{in} ให้เป็น + และ - สลับกันหลายๆ ค่าวัด V_{out}
- 4) เปิดสวิตช์จ่ายไฟให้กับวงจรปรับให้ $V_{in} = 0$ volt วัดค่า V_{out} , I_{in} และ I_{out}
- 5) ปรับ V_{in} ให้เป็น + และ - สลับกันหลายๆ ค่าวัด V_{out} , I_{in} และ I_{out}
- 6) บันทึกผลการทดลอง

4.1.5 ทดสอบรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

จุดประสงค์

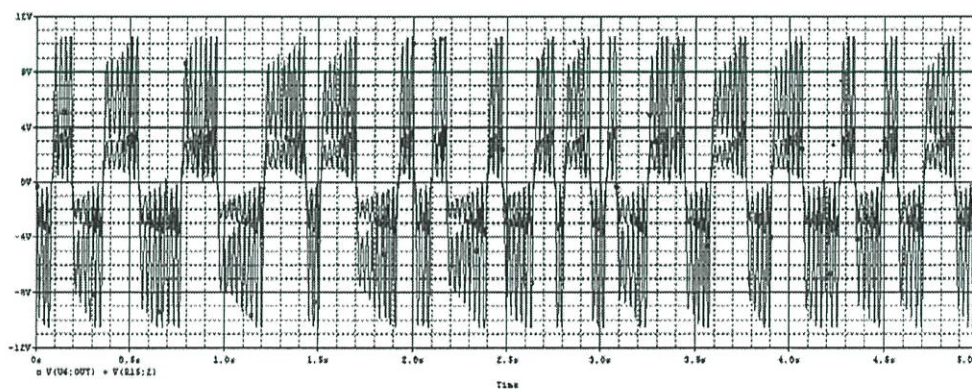
เพื่อหาการเคลื่อนที่ของแต่ละวงจร

วิธีทดลอง

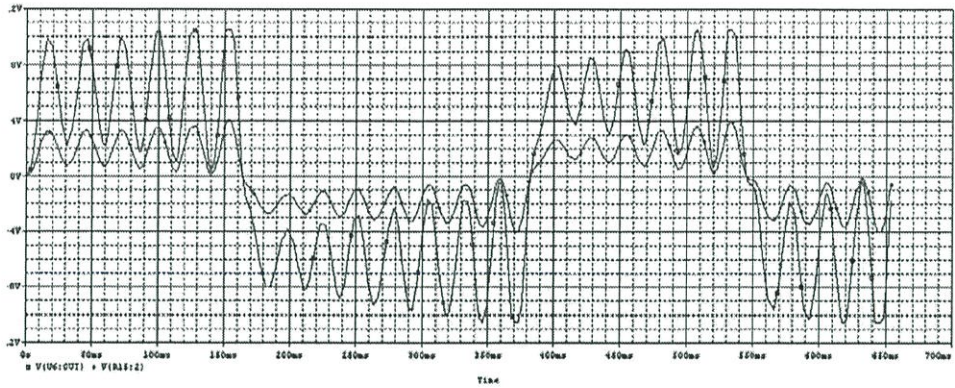
- 1) นำวงจรถ่ายสัญญาณมาต่อเข้ากับวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณคลื่นตามรูป 2.3 ต่อเข้ากับรูปที่ 4.1.1
- 2) ทำการเปิดสวิตช์เพื่อทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นที่ขนาด 4 ตารางเมตร มีขอบกันทั้ง 4 ด้าน
- 3) เก็บผลการทดลองโดยจะใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้ทดลองที่ 10 μ F
- 4) บันทึกผลการทดลอง

4.2 ผลการทดลอง

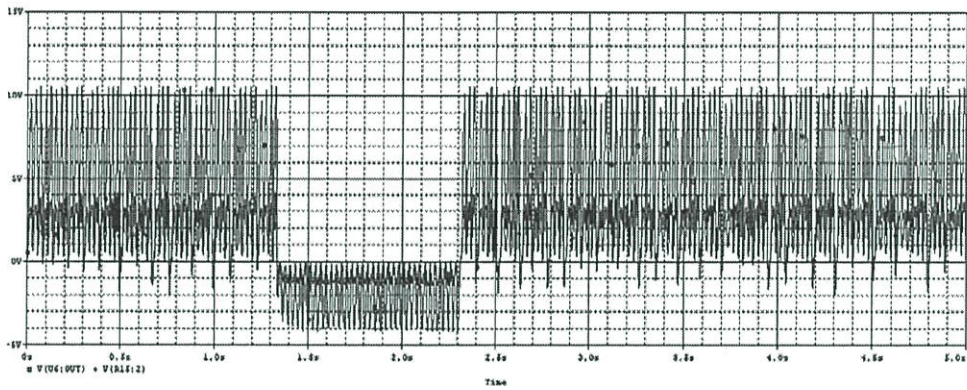
ผลการทดลองตอนที่ 4.1.1



รูปที่ 4.2.1 การทดลองที่ได้ จากโปรแกรม Pspice

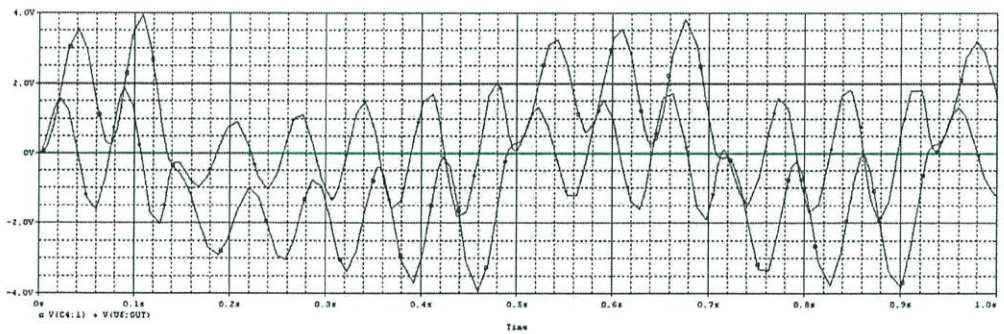


รูปที่ 4.2.2 ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม Pspice

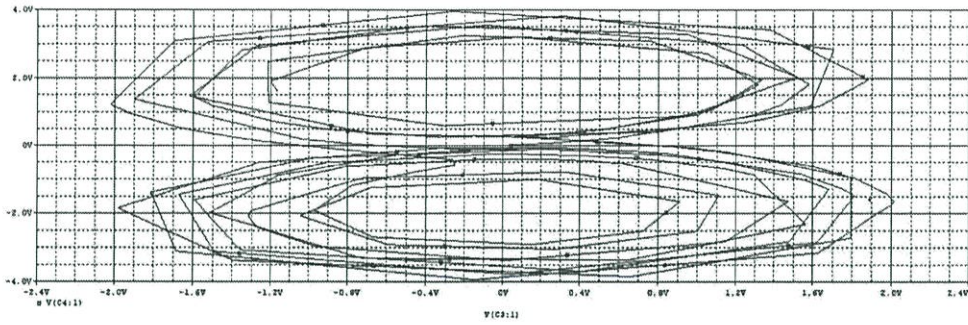


รูปที่ 4.2.3 ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม Pspice

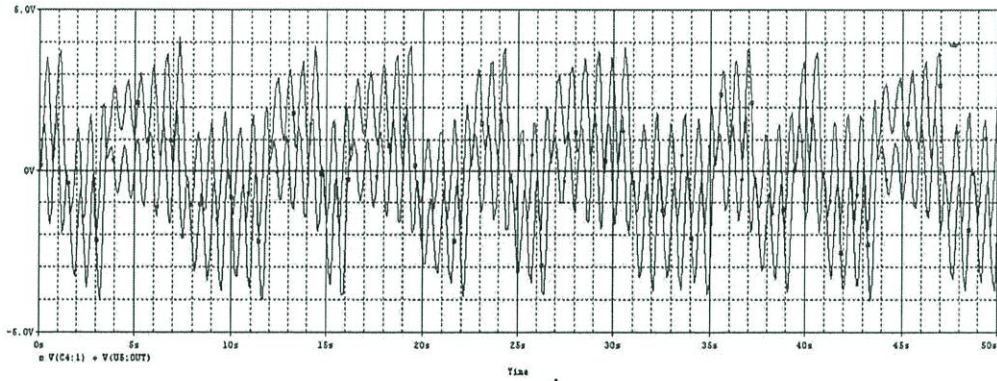
ผลการทดลองตอนที่ 4.1.2



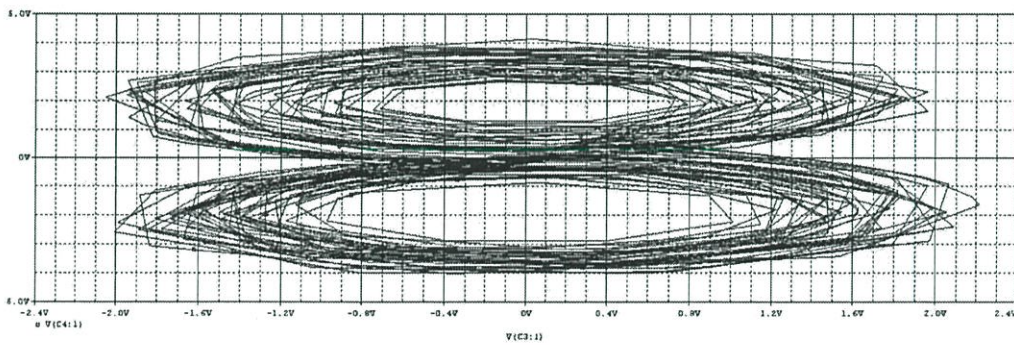
รูปที่ 4.2.4 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 1uF เมื่อเทียบกับเวลา



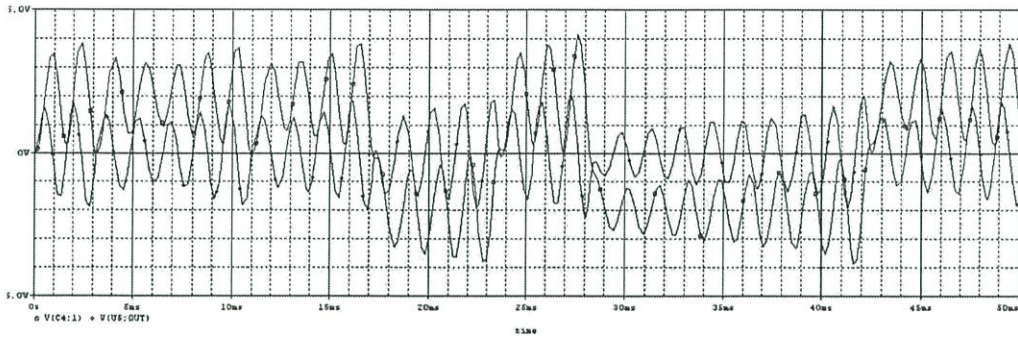
รูปที่ 4.2.5 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 1uF เมื่อเทียบกับจุดกำเนิดสัญญาณอลวน



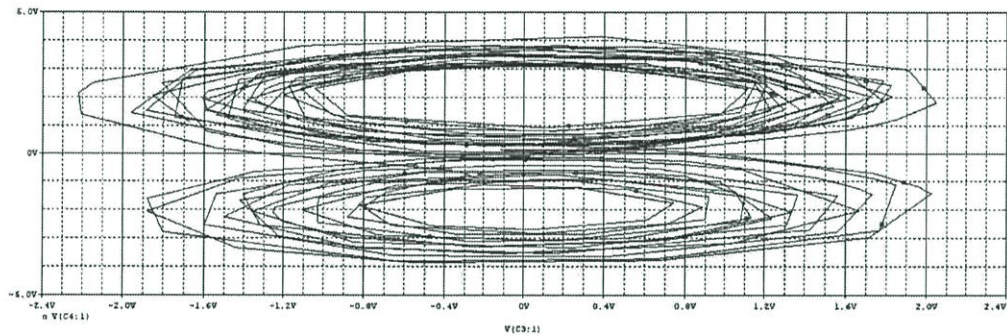
รูปที่ 4.2.6 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 10uF เมื่อเทียบกับเวลา



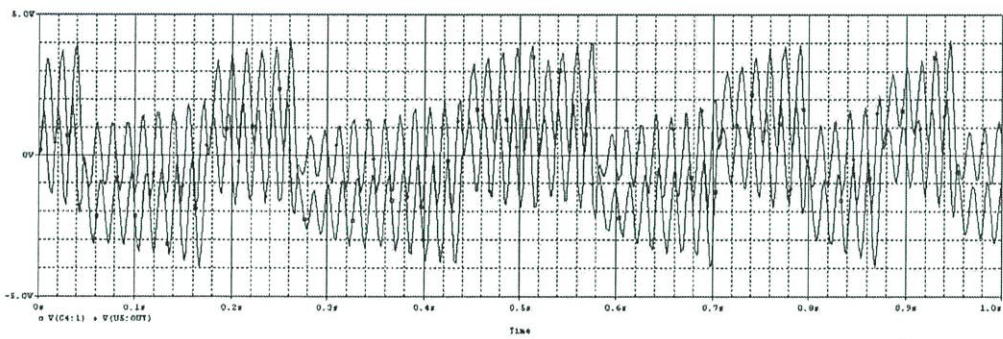
รูปที่ 4.2.7 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 10uF เมื่อเทียบกับจุดกำเนิดสัญญาณอลวน



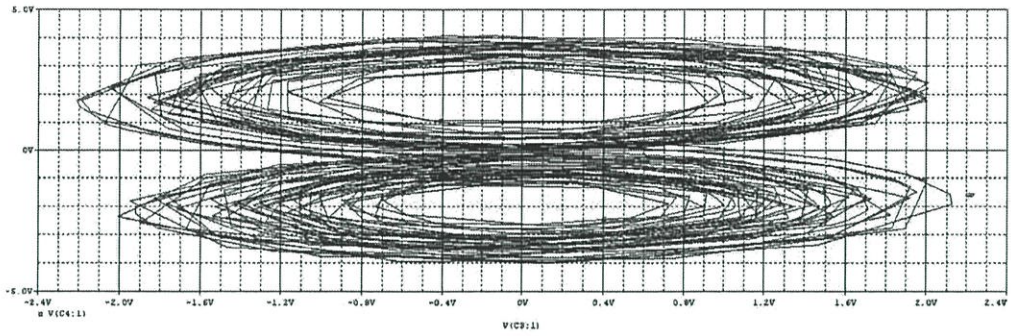
รูปที่ 4.2.8 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 22nF เมื่อเทียบกับเวลา



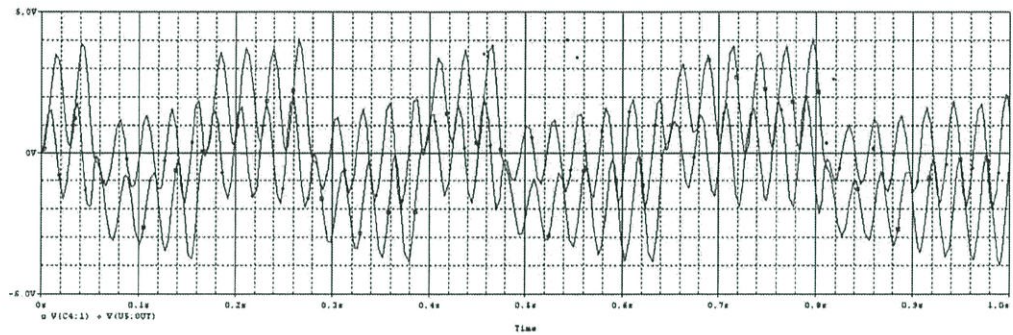
รูปที่ 4.2.9 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 22nF เมื่อเทียบกับจุดกำเนิดสัญญาณออสซิลโลสโคป



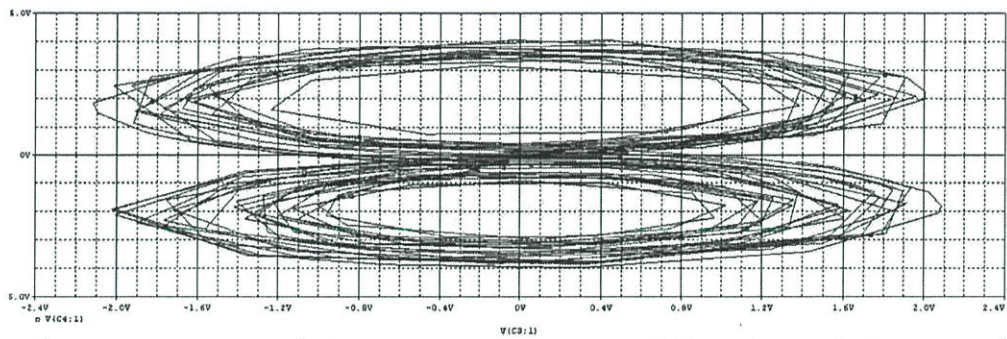
รูปที่ 4.2.10 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 220nF เมื่อเทียบกับเวลา



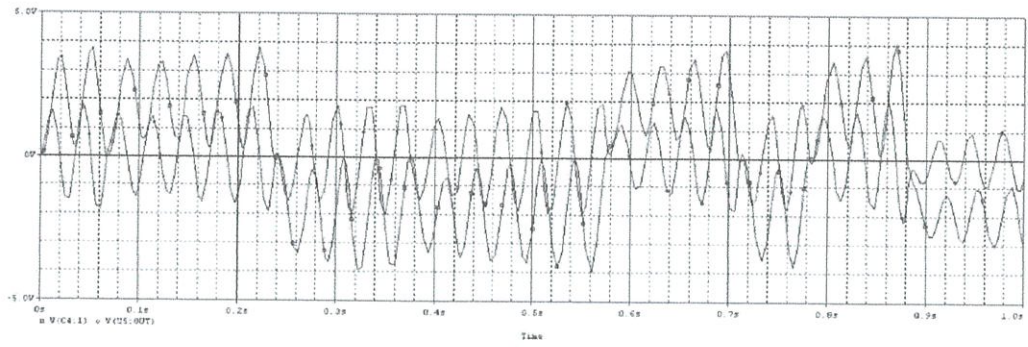
รูปที่ 4.2.11 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 220nF เมื่อเทียบกับจุดกำเนิดสัญญาณ



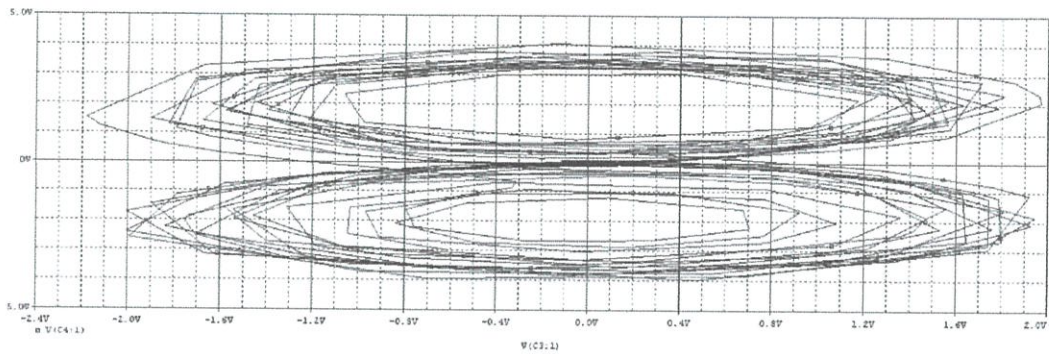
รูปที่ 4.2.12 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 390nF เมื่อเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.2.13 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 390nF เมื่อเทียบกับจุดกำเนิดสัญญาณ

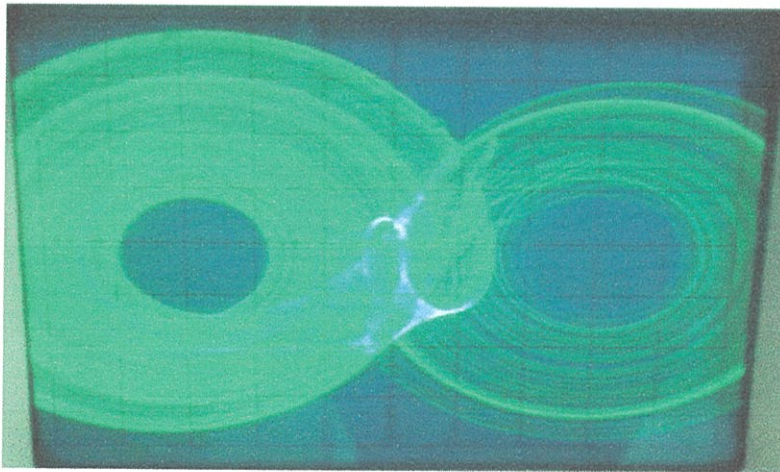


รูปที่ 4.2.14 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 470nF เมื่อเทียบกับเวลา

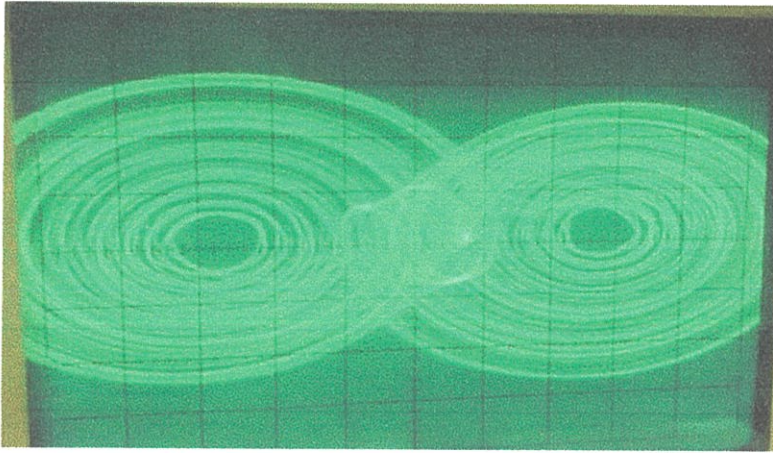


รูปที่ 4.2.15 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) จาก Pspice ใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า 470nF เมื่อเทียบกับจุดกำเนิดสัญญาณลวน

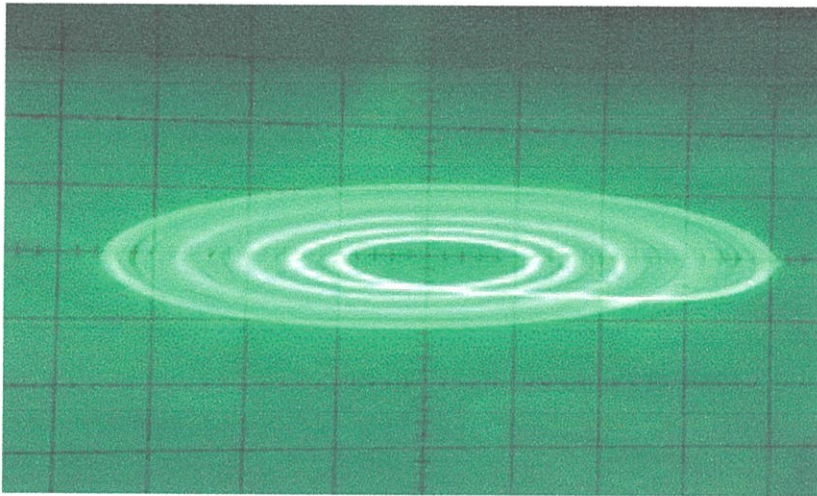
ผลการทดลองตอนที่ 4.1.3



รูปที่ 4.2.16 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) $\text{sgn}(x)$ จากออสซิลอโคป

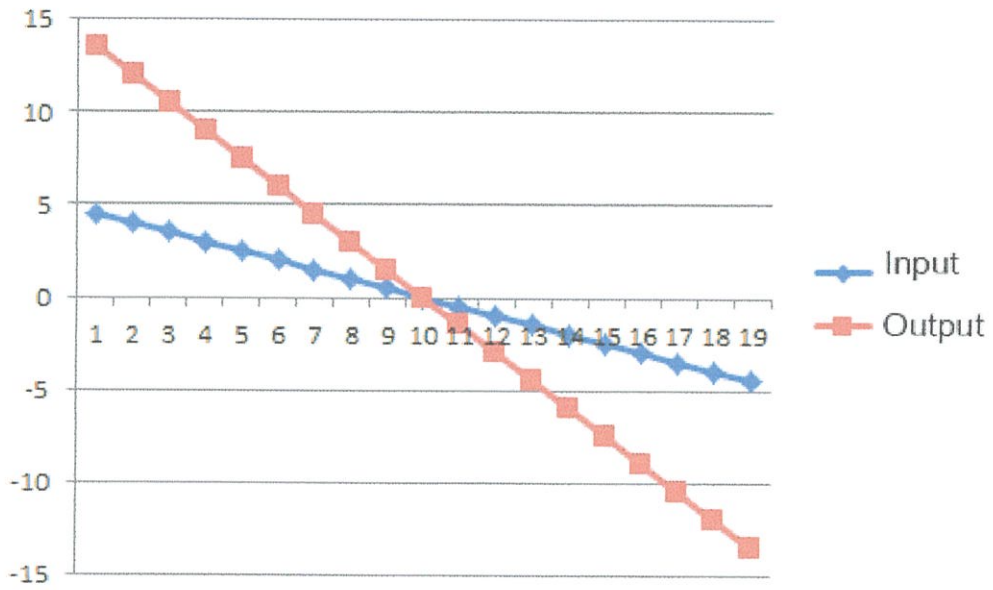


รูปที่ 4.2.17 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) $100\text{sgn}(x)$ จากออสซิลอสโคป

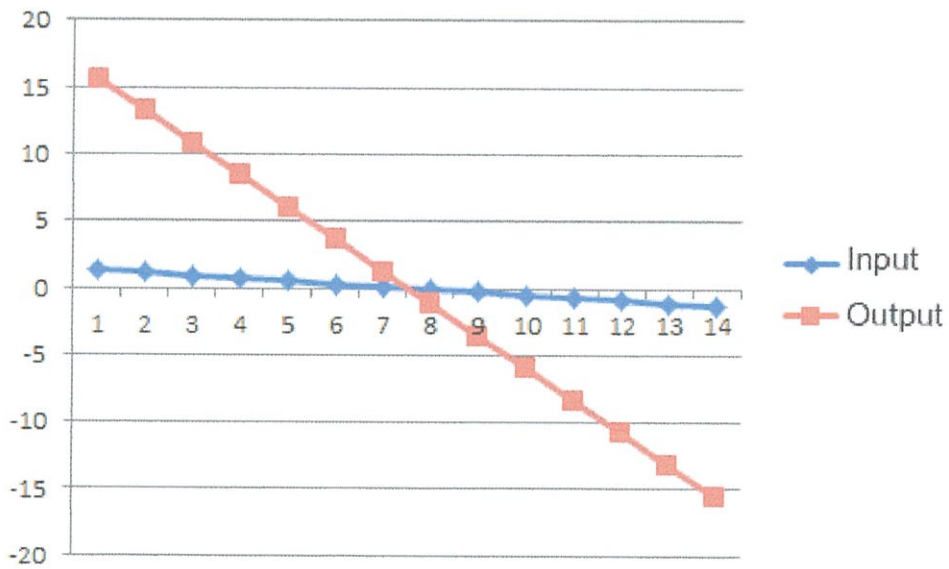


รูปที่ 4.2.18 ผลการทดลองที่ได้จากสมการ (3.1) $H(x)$ จากออสซิลอสโคป

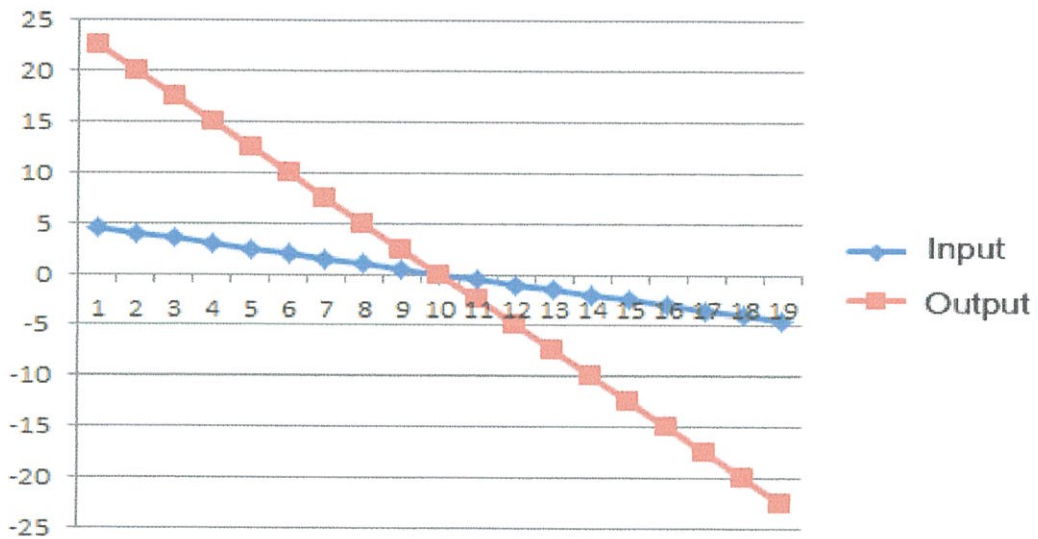
ผลการทดลองตอนที่ 4.1.4



รูปที่ 4.2.19 กราฟการทดลองเมื่ออัตราขยาย 3 เท่า



รูปที่ 4.2.20 กราฟการทดลองเมื่ออัตราขยาย 5 เท่า



รูปที่ 4.2.21 กราฟการทดลองเมื่ออัตราขยาย 12 เท่า

ผลการทดลองตอนที่ 4.1.5

ตารางที่ 4.1.5 ผลการทดลองที่ 4.1.5

วงจร	ผลลัพธ์
Comparator	เมื่อทำการทดสอบการวิ่งของหุ่นยนต์ในพื้นที่ 4 ตารางเมตร หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ครอบคลุมพื้นที่ 82.28 เปอร์เซ็นต์
Saturation	เมื่อทำการทดสอบการวิ่งของหุ่นยนต์ในพื้นที่ 4 ตารางเมตร หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ครอบคลุมพื้นที่ 91.42 เปอร์เซ็นต์
Heavyside	เมื่อทำการทดสอบการวิ่งของหุ่นยนต์ในพื้นที่ 4 ตารางเมตร หุ่นยนต์วิ่งเป็นวงกลมครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.1

จากการทดลองที่ 4.1.1 กราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice จากสมการที่ $z' = -z + \text{sgn}(x)$ เนื่องจากเราใช้ comparator ให้กำเนิดสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณ pulse มีแอมพลิจูดคงที่เมื่อเข้าสู่วงจรจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไปเอาต์พุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.1.1 และเมื่อเราทำการเปลี่ยนค่าอินพุตตามสมการที่ $z' = -z + 100\text{sgn}(x)$ ซึ่งเป็นสัญญาณ pulse ที่ได้รับการขยายจากอัตราขยาย 100 เท่า เมื่อเข้าสู่วงจรจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและได้เอาต์พุตที่มีช่วงสัญญาณที่กว้างมากขึ้นตามลักษณะดังรูปที่ 4.1.2 และเมื่อเราทำการเปลี่ยนสัญญาณอินพุตอีกครั้งหนึ่งตามสมการที่ $z' = -z + H(x)$ โดยครั้งนี้ได้ใช้หลักการของเฮฟวี่ไซด์มาเปลี่ยนอินพุตจะทำให้กราฟสัญญาณที่ได้มีความถี่เพิ่มมากขึ้นและแอมพลิจูดของกราฟมีความคงที่มากขึ้น

5.1.2 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.2

จากการทดลองสรุปได้ว่าค่าเก็บประจุไฟฟ้ายังมีค่าน้อยจะทำให้กราฟเคออสนั้นมีความถี่ที่มากส่งผลให้เมื่อนำไปใช้ในวงจรของหุ่นยนต์แล้วจะเกิดการวิ่งที่ครอบคลุมพื้นที่ได้ดีกว่าจะทำให้เสียเวลาได้เนื่องจากการจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งใช้เวลามากเนื่องจากความถี่ในการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณเคออสนั้นถี่มาก เพราะฉะนั้นตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการทำหุ่นยนต์คือค่า $1\mu\text{F} - 10\mu\text{F}$

5.1.3 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.3

จากการที่ได้ทดลองวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงขนาดเล็กที่ได้ผ่านวงจรแอมพลิฟายเออร์เพื่อขยายสัญญาณ เมื่อเราได้ทำการปรับค่า V_{in} ให้เป็น + และ - สลับกันหลายค่าๆ วัด V_{out} จากนั้นบันทึกผลที่ได้โดยวัดเทียบค่าความต่างศักย์ของมอเตอร์กระแสตรงเทียบกับกราวด์ของวงจรปรากฏว่า วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงนั้นเอาต์พุตจะมีอัตราขยายที่ดีในช่วงความต่างศักย์ต่างๆเท่านั้น แต่ในช่วงที่ใช้ความต่างศักย์สูงนั้นจะมีอัตราการขยายความต่างศักย์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากนั้นเราทำการต่อความต้านทานเข้ากับ feedback แล้วทำให้เป็น non-inverting Amplifier จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเราสามารถปรับค่าอัตราขยายได้ตามต้องการตามสมการของ non-inverting amplifier และเมื่อมีทรานซิสเตอร์อีก 2 ต่อขนานกันเข้าไปจะช่วยให้วงจรขยายกระแสได้ดีขึ้นและมากยิ่งขึ้นเนื่องจากจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 4 ตัวช่วยกันขยายกระแส

5.1.4 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.4

จากตารางผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอัตราขยายของวงจรถายายเป็นไปตามทฤษฎี และเมื่อทดลองนำไปต่อเข้ากับวงจรถายาเนตสัญญาณคอสจจะต้องใช้อัตราขยายที่เหมาะสมซึ่งใช้ที่วงจรถายาเนตทดลองใช้อัตราขยายที่ประมาณ 3 เท่า

5.1.5 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.5

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงแล้วจึงเปลี่ยนแปลงทิศทาง จะพบว่าถ้าใส่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีความจุน้อยทำให้การหุ่นยนต์มีช่วงเวลาในการเปลี่ยนเส้นทางที่ถี่มากขึ้น จะทำให้เคลื่อนที่ได้ครอบคลุมพื้นที่โดยละเอียดแต่จะใช้เวลานาน ซึ่งถ้าใช้น้อยมากๆอาจทำให้หุ่นหยุดนิ่งได้ ทำนองเดียวกันถ้าใส่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีความจุมาก จะทำให้การช่วงเวลาในการเปลี่ยนเส้นทางถี่น้อย ทำให้วิ่งได้ระยะทางที่มากขึ้นแต่จะครอบคลุมพื้นที่ได้ไม่ละเอียดเท่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีความจุน้อย เมื่อทำการทดสอบโดยให้โหมด Non-linear ทั้งสามแบบ จะพบว่าแบบ Saturation จะวิ่งครอบคลุมพื้นที่ได้มากที่สุด และแบบ Heaviside จะวิ่งครอบคลุมพื้นที่ได้น้อยที่สุดโดยจะวิ่งเป็นวงกลมวนอยู่ตรงนั้นจุดใกล้ๆจุด Start

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

1. ปัญหาที่เกี่ยวกับวงจร

การออกแบบวงจรมันต้องแปลงสมการของลอเรนซ์ ต้องใช้เวลาอย่างมากในการหาอัตราขยายที่เหมาะสมอีกทั้งการออกแบบในโปรแกรม Pspice พบว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดโปรแกรมไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าเกิดความผิดพลาดที่จุดใด การต่อวงจรจริงอุปกรณ์ชำรุดเสียหาย ทำให้บางครั้งไม่การทดลองได้ผลที่คลาดเคลื่อน

2. ปัญหาเกี่ยวกับโปรแกรม

จากการที่ต้องแปลงสมการคณิตศาสตร์มาเป็น block diagram ในโปรแกรม Matlab นั้นมีความซับซ้อนเพราะในโปรแกรมมีอุปกรณ์ให้เลือกมาก ต้องใช้เวลาในการปรับตัวค่อนข้างมากจึงทำให้เกิดความล่าช้าในการทำงาน

5.3 แนวทางในการแก้ไขปัญหา

จากปัญหาข้างต้นส่วนใหญ่เกิดจากความไม่คุ้นเคย และมีความชำนาญในการใช้อุปกรณ์ไม่เพียงพอ สามารถแก้ไขปัญหเหล่านี้ได้โดยการปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาและใช้เวลาในการปรับตัวเพื่อให้คุ้นเคยกับอุปกรณ์

บรรณานุกรม

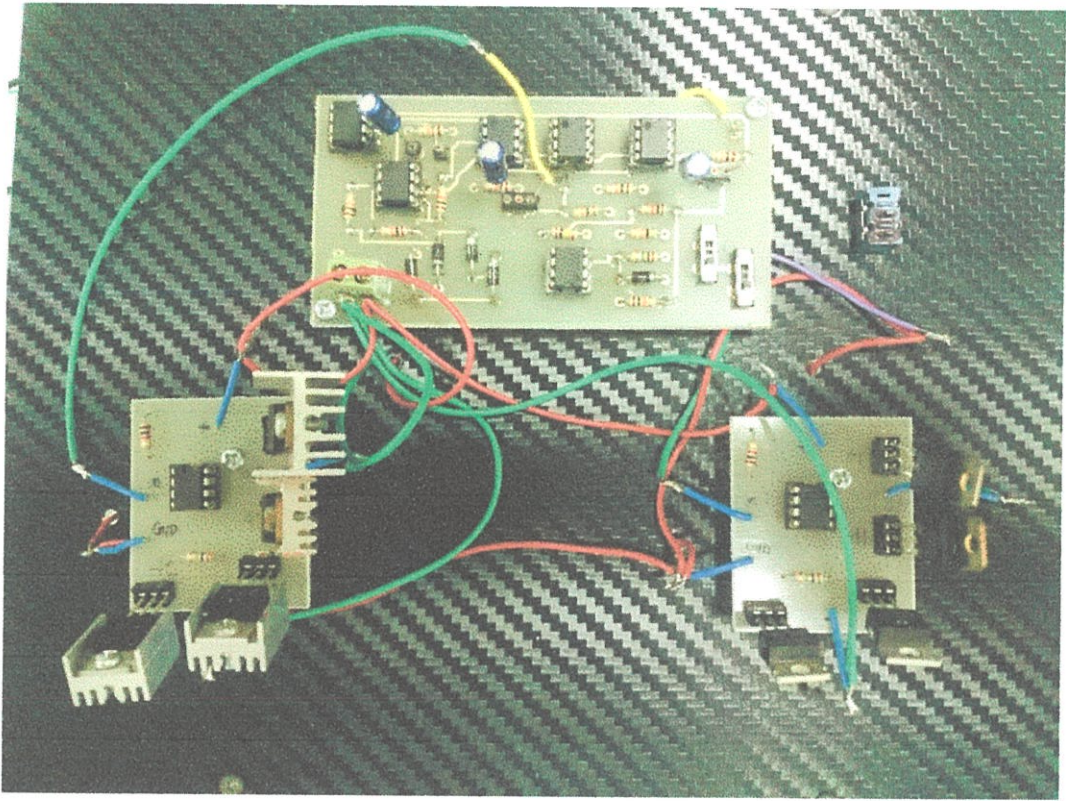
- [1] ภคินี ศิริธรรมจักร และ ศิริพร กานต์กรกช และ สุขญา เชื้อขำ, การสร้างสัญญาณชีวภาพโดยใช้ทฤษฎีโวลวน (A construction of bio-signal using chaos theory), ปรินูญานินพนธ์ (วศ.บ.(วิศวกรรมสารสนเทศ)) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553
- [2] วีรเดช พานิชย์วิสัย และ อัคร ใจยงค์, หุ่นยนต์โวลวนสำหรับงานภาคสนาม (Chaotic Robot for Field Tasks), ปรินูญานินพนธ์ (วศ.บ.(วิศวกรรมสารสนเทศ)) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [3] Simple Chaos. On-line. Available from internet,<http://sprott.physics.wisc.edu/pubs/paper245.htm>
- [4] สัญญาณไฟฟ้า. On-line. Available from internet, http://wiki.stjohn.ac.th/groups/poly_electronics/wiki/3d08c/1__.html
- [5] Signal. On-line. Available from internet, <http://personal.sut.ac.th/paramate/files/compcom/compcomm03.pdf>
- [6] Operational Amplifier. On-line. Available from internet, http://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier
- [7] Operational Amplifier. On-line. Available from internet, <http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/elessonsHTML/OpAmps/OpAmp2.html>
- [8] Operational Amplifier. On-line. Available from internet, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electronic/opampvar2.html>
- [9] Operational Amplifier. On-line. Available from internet, <http://www.kmitl.ac.th/~s2011041/Opamp.pdf>
- [10] Operational Amplifier. On-line. Available from internet, <http://www.daenotes.com/electronics/devices-circuits/operational-amplifier-modes-operation>
- [11] Amplifier. On-line. Available from internet, http://www.tatc.ac.th/files/08122511112836_11043011113844.pdf
- [12] Feedback. On-line. Available from internet, http://en.wikipedia.org/wiki/Control_theory
- [13] Comparator. On-line. Available from internet, <http://en.wikipedia.org/wiki/Comparator>
- [14] Heaviside Step Function. On-line. Available from internet, http://en.wikipedia.org/wiki/Heaviside_step_function
- [15] Sign Function. On-line. Available from internet, http://en.wikipedia.org/wiki/Sign_function
- [16] Diode. On-line. Available from internet, <http://203.172.182.172/~kriengsak/project/data/diode.htm>

บรรณานุกรม (ต่อ)

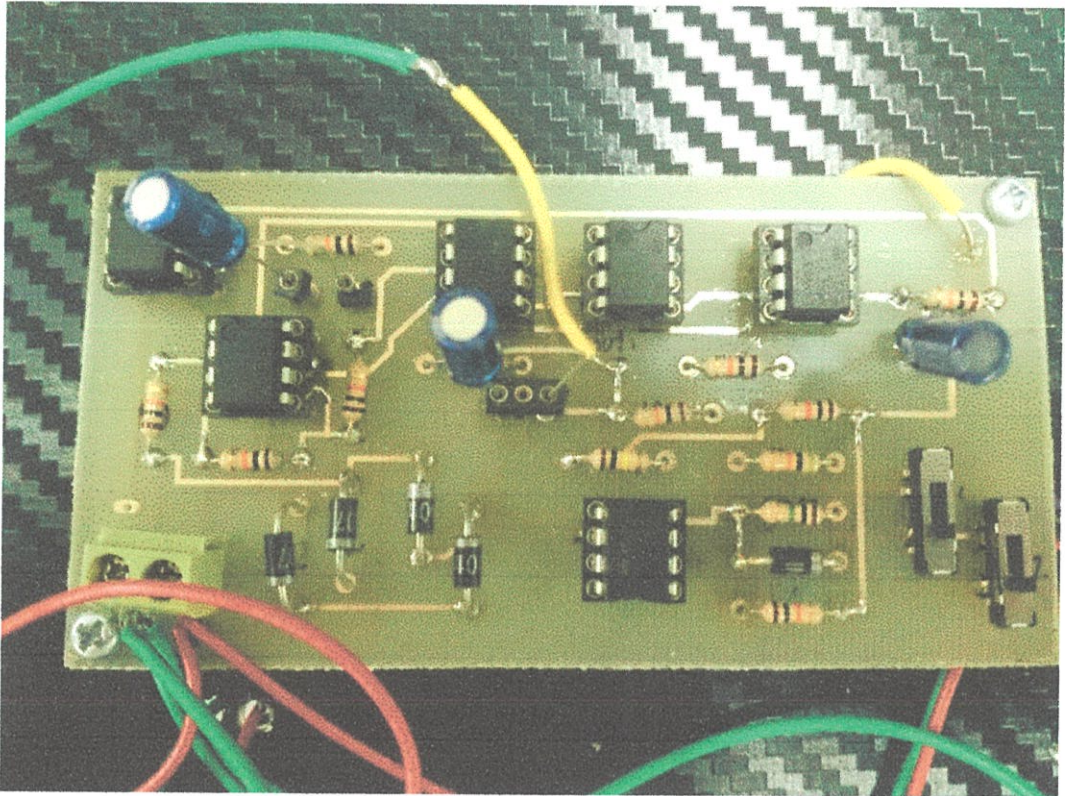
- [17] Motor. On-line. Available from internet,
http://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/Semi/SEMI_3.html
- [18] Matlab. On-line. Available from internet,
<http://www.mathworks.com/products/simulink/index.html>
- [19] Pulse. On-line. Available from internet, <http://www.chapoo.hostei.com/page4.php>
- [20] Diode. On-line. Available from internet, <http://en.wikipedia.org/wiki/Diode>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
การต่อวงจรเข้ากับรถ



รูปที่ ก.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.2 วงจรกำเนิดสัญญาณอลาน

ภาคผนวก ข.
รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์

1. LF351
2. TIP41A
3. TIP42

LF351

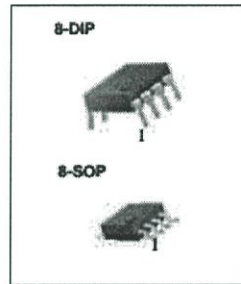
Single Operational Amplifier (JFET)

Features

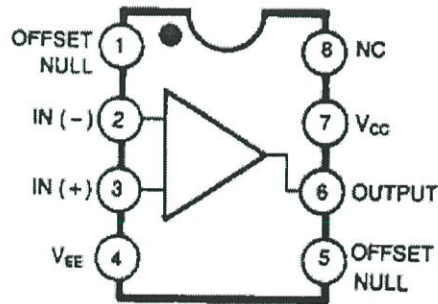
- Internally trimmed offset voltage: 10mV
- Low input bias current : 50pA
- Wide gain bandwidth : 4MHz
- High slew rate : 13V/ μ s
- High input impedance : $10^{12}\Omega$

Description

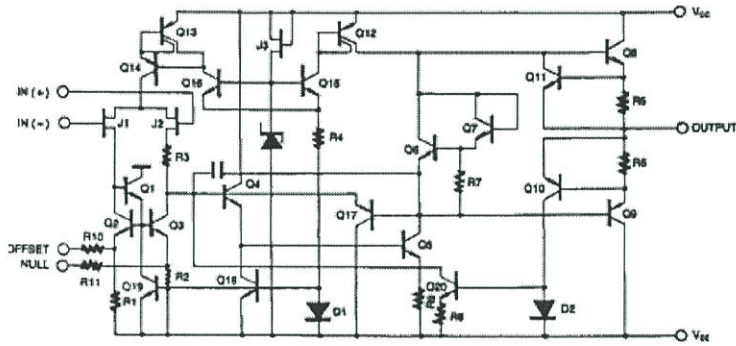
The LF351 is JFET input operational amplifier with an internally compensated input offset voltage. The JFET input device provides wide bandwidth, low input bias currents and offset currents.



Internal Block Diagram



Schematic Diagram



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	VCC	±18	V
Differential Input Voltage	V _{I(DIFF)}	30	V
Input Voltage Range	V _I	±15	V
Output Short Circuit Duration	-	Continuous	-
Power Dissipation	P _D	500	mW
Operating Temperature	T _{OPR}	0 ~ +70	°C
Storage Temperature Range	T _{STG}	-65 ~ +150	°C

Electrical Characteristics

($V_{CC} = +15V$, $V_{EE} = -15V$, $T_A = 25^\circ C$. unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input Offset Voltage	V_{IO}	$R_S = 10k\Omega$	-	5.0	10	mV
		$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$	-	-	13	
Input Offset Voltage Drift (Note1)	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	$R_S = 10k\Omega$	-	10	-	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	I_{IO}		-	25	100	pA
		$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$	-	-	4	nA
Input Bias Current	I_{BAIS}		-	50	200	pA
		$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$	-	-	8	nA
Input Resistance (Note1)	R_I	-	-	10^{12}	-	Ω
Large Signal Voltage Gain	G_V	$V_{O(P-P)} = \pm 10V$	25	100	-	V/mV
		$R_L = 2k\Omega$	$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$	15	-	
Output Voltage Swing	$V_{O(P-P)}$	$R_L = 10k\Omega$	± 12	± 13.5	-	V
Input Voltage Range	$V_{I(R)}$	-	± 11	+15 -12	-	V
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	$R_S \leq 10k\Omega$	70	100	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$R_S \leq 10k\Omega$	70	100	-	dB
Power Supply Current	I_{CC}	-	-	2.3	3.4	mA
Slew Rate (Note1)	SR	$G_V = 1$	-	13	-	V/ μs
Gain-Bandwidth Product (Note1)	GBW	-	-	4	-	MHz

Note :

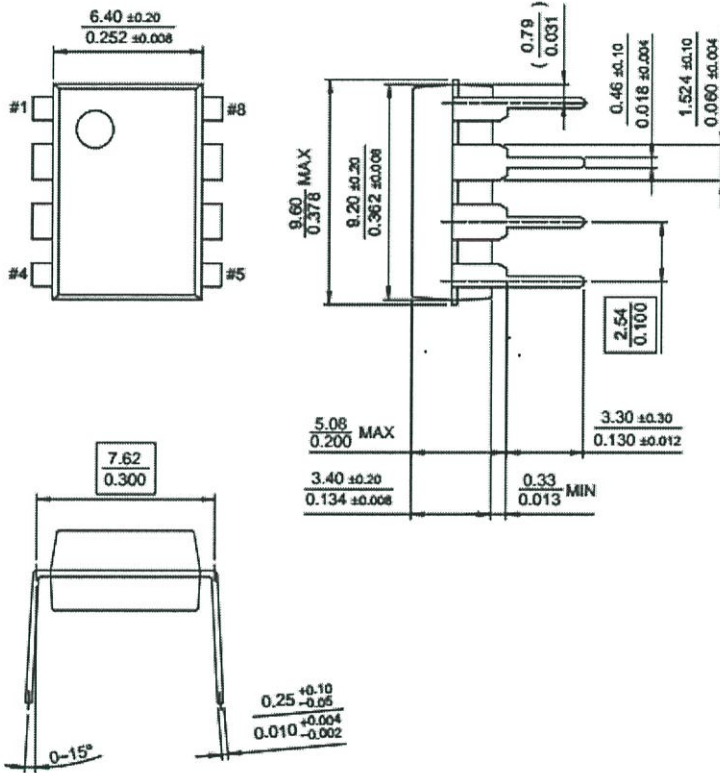
1. Guaranteed by design.

Mechanical Dimensions

Package

Dimensions in millimeters

8-DIP



Ordering Information

Product Number	Package	Operating Temperature
LF351N	8-DIP	0 ~ +70°C
LF351M	8-SOP	

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

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

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

www.fairchildsemi.com

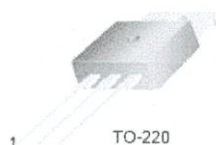
6/1/01 0.0m 001
Stock#DSxxxxxxx
© 2001 Fairchild Semiconductor Corporation

TIP41/TIP41A/TIP41B/TIP41C

NPN Epitaxial Silicon Transistor

Features

- Complementary to TIP42/TIP42A/TIP42B/TIP42C



1. Base 2. Collector 3. Emitter

Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Emitter Voltage: TIP41	40	V
	: TIP41A	60	V
	: TIP41B	80	V
	: TIP41C	100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage: TIP41	40	V
	: TIP41A	60	V
	: TIP41B	80	V
	: TIP41C	100	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I_C	Collector Current (DC)	6	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	10	A
I_B	Base Current	2	A
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	65	W
	Collector Dissipation ($T_a=25^\circ\text{C}$)	2	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 65 ~ 150	$^\circ\text{C}$

Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	* Collector-Emitter Sustaining Voltage : TIP41 : TIP41A : TIP41B : TIP41C	$I_C = 30\text{mA}, I_B = 0$	40 60 80 100		V V V V
I_{CEO}	Collector Cut-off Current : TIP41/41A : TIP41B/41C	$V_{CE} = 30\text{V}, I_B = 0$ $V_{CE} = 60\text{V}, I_B = 0$		0.7 0.7	mA mA
I_{CES}	Collector Cut-off Current : TIP41 : TIP41A : TIP41B : TIP41C	$V_{CE} = 40\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = 60\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = 80\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = 100\text{V}, V_{EB} = 0$		400 400 400 400	μA μA μA μA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = 5\text{V}, I_C = 0$		1	mA
h_{FE}	* DC Current Gain	$V_{CE} = 4\text{V}, I_C = 0.3\text{A}$ $V_{CE} = 4\text{V}, I_C = 3\text{A}$	30 15	75	
$V_{CE(sat)}$	* Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 6\text{A}, I_B = 600\text{mA}$		1.5	V
$V_{BE(sat)}$	* Base-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE} = 4\text{V}, I_C = 6\text{A}$		2.0	V
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 500\text{mA}, f = 1\text{MHz}$	3.0		MHz

* Pulse Test: $PW \leq 300\text{ms}$, Duty Cycle $\leq 2\%$

Typical Characteristics

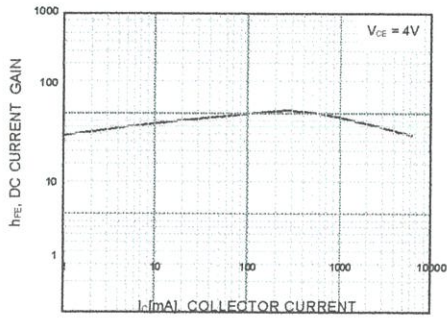


Figure 1. DC current Gain

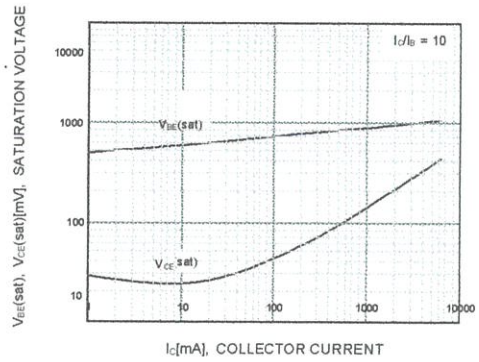


Figure 2. Base-Emitter Saturation Voltage
Collector-Emitter Saturation Voltage

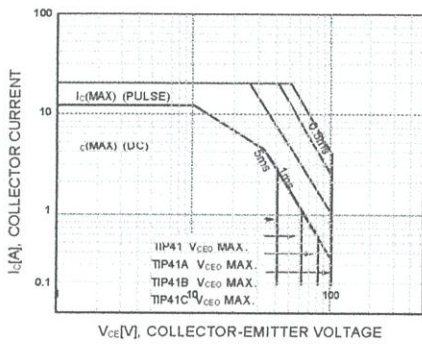


Figure 3. Safe Operating Area

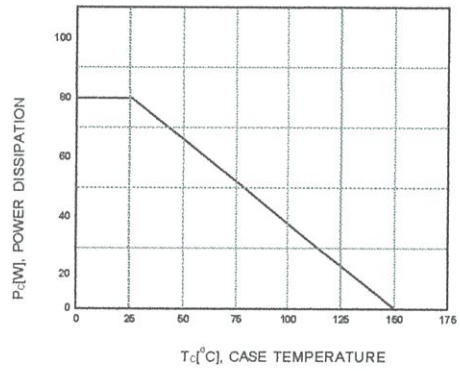
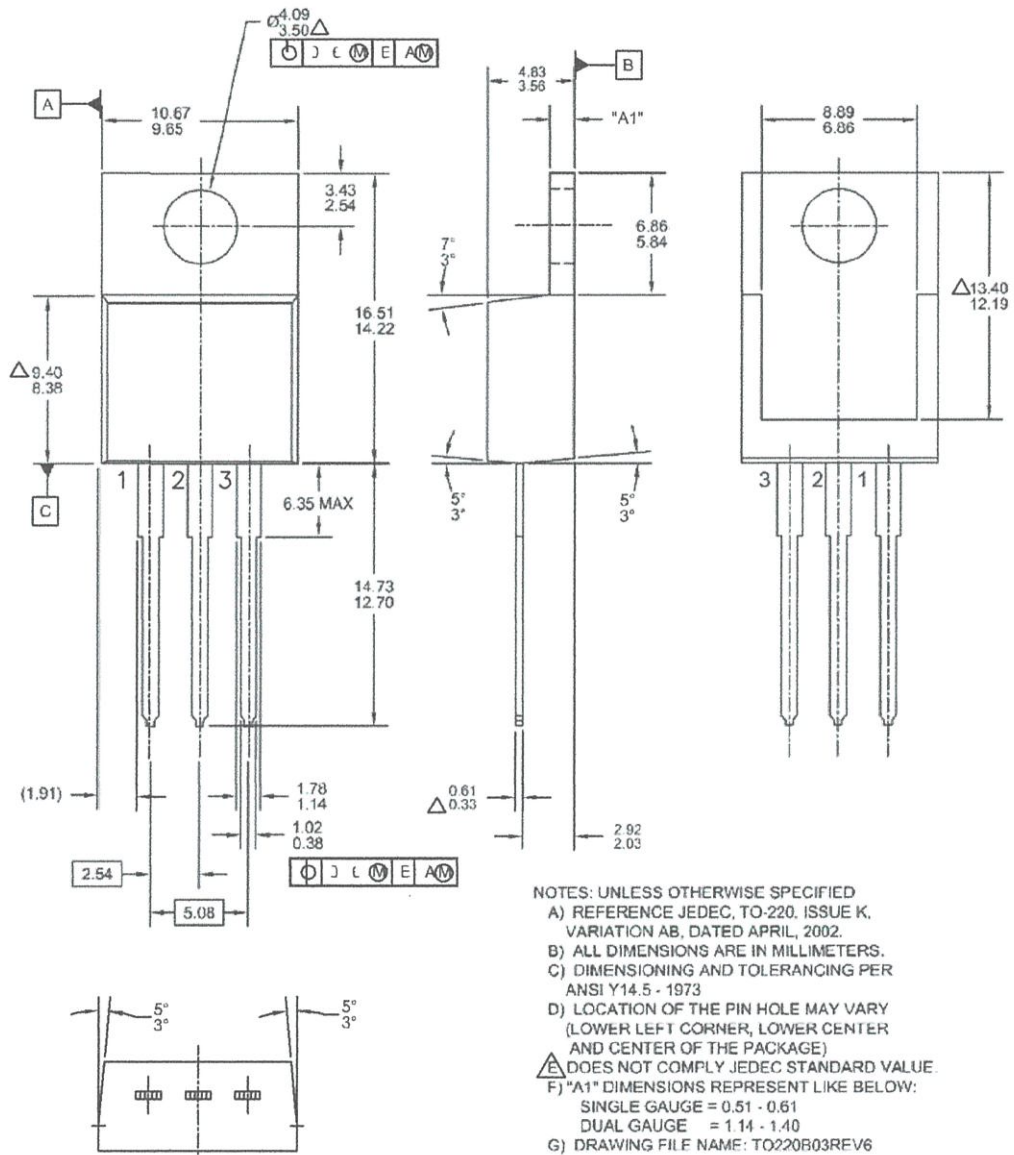


Figure 4. Power Derating

Mechanical Dimensions

TO220





TRADEMARKS

The following includes registered and unregistered trademarks and service marks, owned by Fairchild Semiconductor and/or its global subsidiaries, and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

- | | | | |
|---|-------------------------------------|---|---|
| Build it Now™ | FPS™ | PDP SPM™ | The Power Franchise® |
| CorePLUS™ | F-PFS™ | Power-SPM™ | The Power Franchise® |
| CorePOWER™ | FRFET® | PowerTrench® | TinyBoost™ |
| CROSSVOLT™ | Global Power Resource SM | Programmable Active Droop™ | TinyBuck™ |
| CTL™ | Green FPS™ | QFET® | TinyLogic® |
| Current Transfer Logic™ | Green FPS™ e-Series™ | QST™ | TINYOPTO™ |
| EcoSPARK® | GTO™ | Quiet Series™ | TinyPower™ |
| EfficientMax™ | IntelliMAX™ | RapidConfigure™ | TinyPWM™ |
| EZSWITCH™ * | ISOPLANAR™ | Saving our world, 1mW at a time™ | TinyWire™ |
|  | MegaBuck™ | SmartMax™ | μSerDes™ |
|  | MICROCOUPLER™ | SMART START™ |  |
| Fairchild® | MicroFET™ | SPM® | UHC® |
| Fairchild Semiconductor® | MicroPak™ | STEALTH™ | Ultra FRFET™ |
| FACT Quiet Series™ | MillerDrive™ | SuperFET™ | UniFET™ |
| FACT® | MotionMax™ | SuperSOT™3 | VCX™ |
| FAST® | Motion-SPM™ | SuperSOT™6 | VisualMax™ |
| FastvCore™ | OPTOLOGIC® | SuperSOT™8 | |
| FlashWriter® * | OPTOPLANAR® | SupreMOS™ | |
| | | SyncFET™ | |
| | |  | |

* EZSWITCH™ and FlashWriter® are trademarks of System General Corporation, used under license by Fairchild Semiconductor.

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION, OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS. THESE SPECIFICATIONS DO NOT EXPAND THE TERMS OF FAIRCHILD'S WORLDWIDE TERMS AND CONDITIONS, SPECIFICALLY THE WARRANTY THEREIN, WHICH COVERS THESE PRODUCTS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

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

ANTI-COUNTERFEITING POLICY

Fairchild Semiconductor Corporation's Anti-Counterfeiting Policy. Fairchild's Anti-Counterfeiting Policy is also stated on our external website, www.fairchildsemi.com, under Sales Support.

Counterfeiting of semiconductor parts is a growing problem in the industry. All manufacturers of semiconductor products are experiencing counterfeiting of their parts. Customers who inadvertently purchase counterfeit parts experience many problems such as loss of brand reputation, substandard performance, failed applications, and increased cost of production and manufacturing delays. Fairchild is taking strong measures to protect ourselves and our customers from the proliferation of counterfeit parts. Fairchild strongly encourages customers to purchase Fairchild parts either directly from Fairchild or from Authorized Fairchild Distributors who are listed by country on our web page cited above. Products customers buy either from Fairchild directly or from Authorized Fairchild Distributors are genuine parts, have full traceability, meet Fairchild's quality standards for handling and storage and provide access to Fairchild's full range of up-to-date technical and product information. Fairchild and our Authorized Distributors will stand behind all warranties and will appropriately address any warranty issues that may arise. Fairchild will not provide any warranty coverage or other assistance for parts bought from Unauthorized Sources. Fairchild is committed to combat this global problem and encourage our customers to do their part in stopping this practice by buying direct or from authorized distributors.

PRODUCT STATUS DEFINITIONS

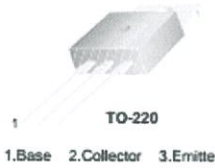
Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative / In Design	Datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	Datasheet contains preliminary data, supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve design.
No Identification Needed	Full Production	Datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve the design.
Obsolete	Not In Production	Datasheet contains specifications on a product that is discontinued by Fairchild Semiconductor. The datasheet is for reference information only.

TIP42/TIP42A/TIP42B/TIP42C PNP Epitaxial Silicon Transistor

Features

- Medium Power Linear Switching Applications
- Complement to TIP41/TIP41A/TIP41B/TIP41C



Absolute Maximum Ratings $T_A=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CB0}	Collector-Base Voltage : TIP42	-40	V
	: TIP42A	-60	V
	: TIP42B	-80	V
	: TIP42C	-100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : TIP42	-40	V
	: TIP42A	-60	V
	: TIP42B	-80	V
	: TIP42C	-100	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	-5	V
I_C	Collector Current (DC)	-6	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	-10	A
I_B	Base Current	-2	A
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	65	W
	Collector Dissipation ($T_A=25^\circ\text{C}$)	2	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	-65 to 150	$^\circ\text{C}$

Electrical Characteristics $T_A=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	* Collector-Emitter Sustaining Voltage : TIP42 : TIP42A : TIP42B : TIP42C	$I_C = -30\text{mA}, I_B = 0$	-40 -60 -80 -100		V V V V
I_{CEO}	Collector Cut-off Current : TIP42/42A : TIP42B/42C	$V_{CE} = -30\text{V}, I_B = 0$ $V_{CE} = -60\text{V}, I_B = 0$		-0.7 -0.7	mA mA
I_{CES}	Collector Cut-off Current : TIP42 : TIP42A : TIP42B : TIP42C	$V_{CE} = -40\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = -60\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = -80\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = -100\text{V}, V_{EB} = 0$		-400 -400 -400 -400	μA μA μA μA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = -5\text{V}, I_C = 0$		-1	mA
h_{FE}	* DC Current Gain	$V_{CE} = -4\text{V}, I_C = -0.3\text{A}$ $V_{CE} = -4\text{V}, I_C = -3\text{A}$	30 15	75	
$V_{CE(sat)}$	* Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = -6\text{A}, I_B = -600\text{mA}$		-1.5	V
$V_{BE(sat)}$	* Base-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE} = -4\text{V}, I_C = -6\text{A}$		-2.0	V
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE} = -10\text{V}, I_C = -500\text{mA}$, $f = 1\text{MHz}$	3.0		MHz

* Pulse Test: $PW \leq 300\mu\text{s}$, Duty Cycles $\leq 2\%$

Typical Performance Characteristics

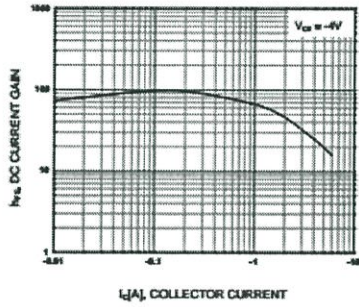


Figure 1. DC current Gain

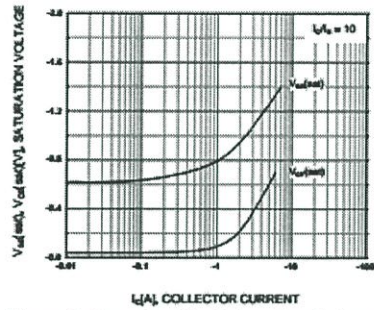


Figure 2. Base-Emitter Saturation Voltage
Collector-Emitter Saturation Voltage

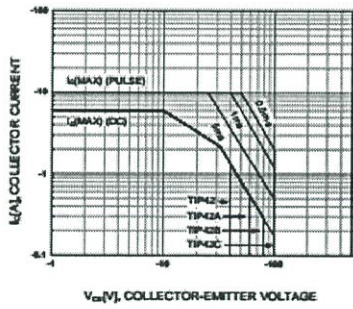


Figure 3. Safe Operating Area

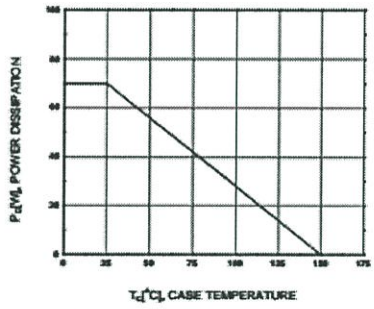
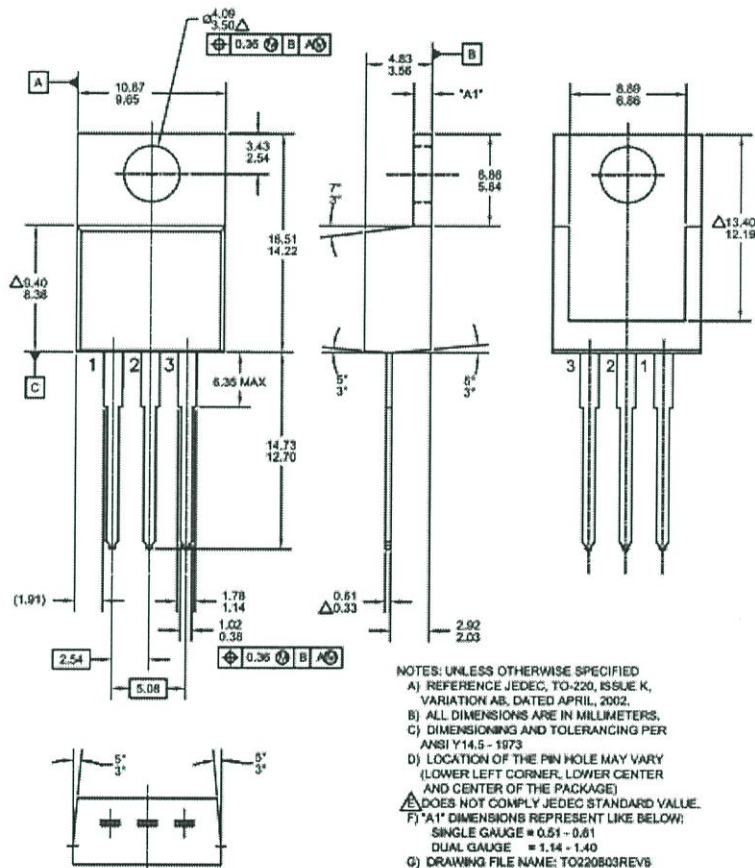


Figure 4. Power derating

Mechanical Dimensions

TO-220



- NOTES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
A) REFERENCE JEDEC, TO-220, ISSUE K, VARIATION AB, DATED APRIL, 2002.
B) ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
C) DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5 - 1973
D) LOCATION OF THE PIN HOLE MAY VARY (LOWER LEFT CORNER, LOWER CENTER AND CENTER OF THE PACKAGE)
E) DOES NOT COMPLY JEDEC STANDARD VALUE.
F) *A1* DIMENSIONS REPRESENT LIKE BELOW:
SINGLE GAUGE = 0.51 - 0.81
DUAL GAUGE = 1.14 - 1.40
G) DRAWING FILE NAME: TO220B03REV5

Dimensions in Millimeters



TRADEMARKS

The following includes registered and unregistered trademarks and service marks, owned by Fairchild Semiconductor and/or its global subsidiaries, and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

AccuPower™	FPS™	PowerTrench®	The Power Franchise®
Auto-SPM™	F-PFS™	PowerXS™	the Power Franchise
Build it Now™	FRFET®	Programmable Active Droop™	TryBoost™
CorePLUS™	Global Power Resource SM	QFET™	TryBuck™
CorePOWER™	Green FPS™	QS™	TryCalc™
CROSSVOL™	Green FPS™ e-Series™	Quiet Series™	TryLogic™
CTL™	GTO™	RapidConfigure™	TNYOPTO™
Current Transfer Logic™	IntelliMAX™	 ™	TryPower™
EcoSPARK®	ISOPLANAR™	Saving our world, 1mW/W at a time™	TryPWM™
EfficientMax™	MegaBuck™	SmartMax™	TryWire™
EZSWITCH™	MICROCOUPLER™	SMART START™	TriFault Detect™
 ™	MicroFET™	SPM®	TRUECURRENT™
 ™	MicroPak™	STEALTH™	uSerDes™
Fairchild®	MillerDrive™	SuperFET™	 ™
Fairchild Semiconductor®	MotionMax™	SuperSOT™3	uSerDes
FACT Quiet Series™	Motion-SPM™	SuperSOT™5	uHC
FACT®	OPTOLOGIC®	SuperSOT™6	Ultra FRFET™
FAST®	OPTOPLANAR®	SupreMOS™	UnifET™
FastCore™		SyncFET™	VCC™
FETBench™	PDP SPM™	SynLock™	VisualMax™
FlashWriter®	Power-SPM™	SYSTEM GENERAL	XS™

* Trademarks of System General Corporation, used under license by Fairchild Semiconductor.

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION, OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS. THESE SPECIFICATIONS DO NOT EXPAND THE TERMS OF FAIRCHILD'S WORLDWIDE TERMS AND CONDITIONS, SPECIFICALLY THE WARRANTY THEREIN, WHICH COVERS THESE PRODUCTS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

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

ANTI-COUNTERFEITING POLICY

Fairchild Semiconductor Corporation's Anti-Counterfeiting Policy. Fairchild's Anti-Counterfeiting Policy is also stated on our external website, www.fairchildsemi.com, under Sales Support.

Counterfeiting of semiconductor parts is a growing problem in the industry. All manufacturers of semiconductor products are experiencing counterfeiting of their parts. Customers who inadvertently purchase counterfeit parts experience many problems such as loss of brand reputation, substandard performance, failed applications, and increased cost of production and manufacturing delays. Fairchild is taking strong measures to protect ourselves and our customers from the proliferation of counterfeit parts. Fairchild strongly encourages customers to purchase Fairchild parts either directly from Fairchild or from Authorized Fairchild Distributors who are listed by country on our web page cited above. Products customers buy either from Fairchild directly or from Authorized Fairchild Distributors are genuine parts, have full traceability, meet Fairchild's quality standards for handling and storage and provide access to Fairchild's full range of up-to-date technical and product information. Fairchild and our Authorized Distributors will stand behind all warranties and will appropriately address any warranty issues that may arise. Fairchild will not provide any warranty coverage or other assistance for parts bought from Unauthorized Sources. Fairchild is committed to combat this global problem and encourage our customers to do their part in stopping this practice by buying direct or from authorized distributors.

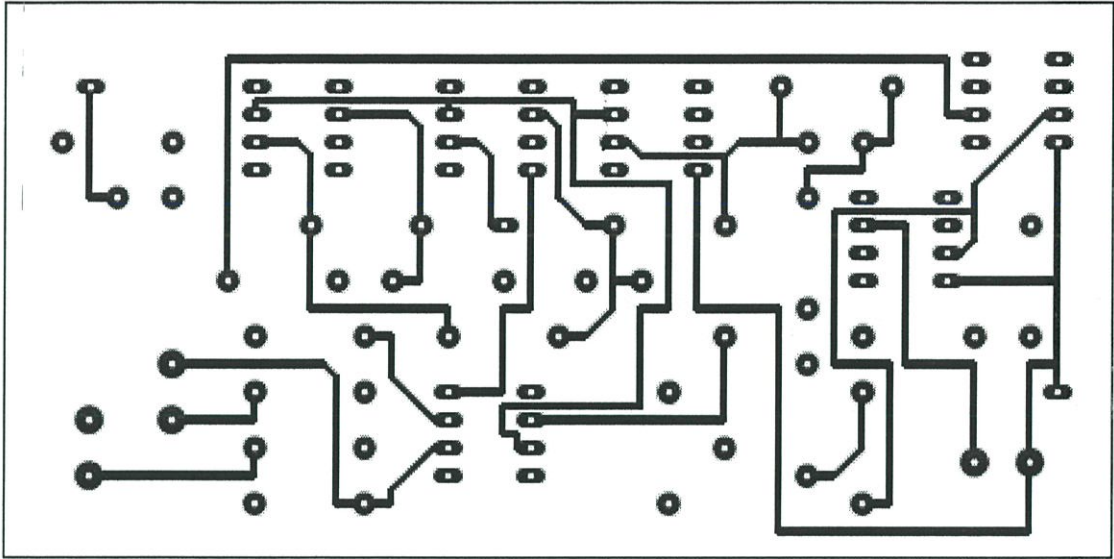
PRODUCT STATUS DEFINITIONS

Definition of Terms

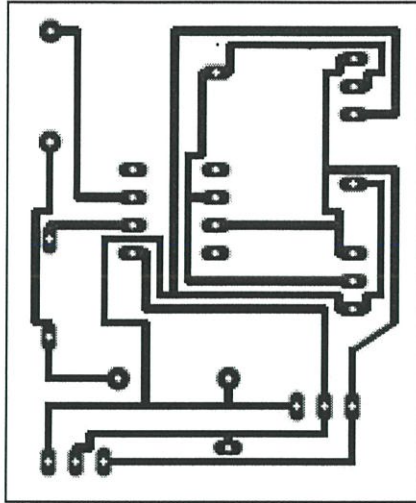
Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative / In Design	Datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	Datasheet contains preliminary data; supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve design.
No Identification Needed	Full Production	Datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve the design.
Obsolete	Not In Production	Datasheet contains specifications on a product that is discontinued by Fairchild Semiconductor. The datasheet is for reference information only.

Rev. 141

ภาคผนวก ค.
การออกแบบวงจรโดยใช้โปรแกรม PCB



รูปที่ ค.2 แผ่น PCB ของวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนในส่วนด้านล่าง



รูปที่ ค.3 แผ่น PCB ของวงจรขยายสัญญาณ