

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม  
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

ปริญญาโท ชดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี

PID CONTROLLER DEMONSTRATORS

ชื่อนักศึกษา	1. นายรัชภูมิ	กัญญา	รหัสประจำตัว	40031517
	2. นายสันติ	ศรีตระกูล	รหัสประจำตัว	40031527
	3. นายสุชาติ	หัตถ์สุวรรณ	รหัสประจำตัว	40031528
	4. นายอภิชัย	เรืองพริ้ม	รหัสประจำตัว	40031531

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

1. อาจารย์กิติพงศ์ มะโน
2. อาจารย์อำพล ทองระอา
3. อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี



คณะกรรมการสอบปริญญาโท	ลายมือชื่อ
1. อาจารย์กิติพงศ์ มะโน	
2. อาจารย์วรวิทย์ สมหา	
3. อาจารย์พงษ์เกียรติ เชนฐพิทักษ์สกุล	
4. อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี	

วัน/เดือน/ปีที่สอบ 28 พฤศจิกายน พ.ศ. 2541

สถานที่สอบ ห้อง ค.310 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

เลขที่.....  
เลขทะเบียน 32861  
วัน, เดือน, ปี 14 ส.ย. 2542



ภาควิชารับรองแล้ว  
.....  
(ผศ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา)  
หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม  
..... เดือน..... พ.ศ. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญานิพนธ์

ชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี.

PID CONTROLLER DEMONSTRATORS



นายรัชภูมิ กิบุญ  
นายสันติ ศรีตระกูล  
นายสุชาติ หัตถ์สุวรรณ  
นายอภิชัย เรืองพริ้ม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญานิพนธ์

เรื่อง ชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี

PID CONTROLLER DEMONSTRATORS

## ผู้จัดทำ

- |              |             |
|--------------|-------------|
| 1.นายรัชภูมิ | กิญญ        |
| 2.นายสันติ   | ศรีตระกูล   |
| 3.นายสุชาติ  | หัตถ์สุวรรณ |
| 4.นายอภิชัย  | เรืองพริ้ม  |

## อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงนาม .....  
(อาจารย์กิติพงศ์ มะโน)

ลงนาม .....  
(อาจารย์อำพล ทองระอา)

ลงนาม .....  
(อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี)

## หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรม

ลงนาม .....  
(ผศ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปริญญานิพนธ์

เรื่อง ชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี.

PID CONTROLLER DEMONSTRATORS

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของตัวควบคุม พี.ไอ.ดี.
2. เพื่อออกแบบวงจรจำลองการทำงานของตัวควบคุม พี.ไอ.ดี.
3. เพื่อออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี
4. เพื่อนำชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี. ไปใช้ประกอบการเรียนการสอนในวิชาวิเคราะห์และการควบคุมในระดับ ปวส.

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติและการทำงานของตัวควบคุม พี.ไอ.ดี.
2. มีความรู้ความชำนาญในการออกแบบและจัดสร้างส่วนต่างๆ ของชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี.
3. ได้ชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี. 1 ชุด
4. สามารถนำชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี. ไปใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี.

นายรัชภูมิ	กัญญา
นายสันติ	ศรีตระกูล
นายสุชาติ	หัตถ์สุวรรณ
นายอภิชัย	เรืองพริ้ม

### อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์กิติพงศ์ มะโน

อาจารย์อำพล ทองระอา

อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี

ปีการศึกษา 2541

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอ ชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี. ซึ่งใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในการจำลองคุณสมบัติของตัวควบคุม พี.ไอ.ดี. เพื่อใช้ในการศึกษาการทำงานและกรียาของตัวควบคุม แต่ละตัว ได้แก่ พี, ไอ, ดี, พีไอ, พีดี และพีไอดี โดยสามารถผลตอบสนองต่ออินพุตสเต็ปได้ทั้ง ระบบอันดับหนึ่งและระบบอันดับสอง นอกจากนี้ยังสามารถนำชุดทดลองไปประยุกต์ใช้ในการ ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ จากผลการทดลองสามารถนำชุดทดลองนี้ไปใช้ ประกอบการสอนได้อย่างเหมาะสม

## PID CONTROLLER DEMONSTRATORS

MR.RACHAPOOM	KINOON
MR.SANTI	SRITAKOON
MR.SUCHART	HUTSUWAN
MR.APICHAJ	RERNGTRIM

### ADVISORS

MR.KITIPONG	MANO
MR.AMPHON	THONGRA-AR
MR.SURAPONG	SIRIPONGDEE

1998

### ABSTRACT

This Thesis presents PID CONTROLLER DEMONSTRATORS . It using electronics devices for simulated of PID ( Proportional Integral Derivative ) . That cans leaning characteristic of each PID controller such as P, I , D , PI , PD and PID types . This system can show unitstep response of each and it can application to speed control of dc motor. That the result of PID Controller Demonstrators suitable for practical teaching in the topic of PID controller.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุกกำลังใจที่มีให้ยามหมดกำลังใจที่จะทำงาน ขอขอบคุณผู้ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาทุกคำทุก ๆ ประโยค ที่ช่วยให้ปริญญานิพนธ์ชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรมที่ช่วยเหลือในด้านงบประมาณและเครื่องมือในการทดลอง ขอขอบคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน และที่ลืมไม่ได้ขอขอบคุณบิดามารดาผู้ให้กำเนิดให้ชีวิต และให้ทุกสิ่งทุกอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จิตความสามารถของโรงงาน	2
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 ชนิดของการควบคุม (Control Action)	4
2.2.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control : P-Controller)	4
2.2.2 การควบคุมแบบรวม (Integral Control : I – Control)	8
2.2.3 การควบคุมแบบอัตรา (Derivative Control : D - Control)	12
2.2.4 การควบคุมแบบผสม (Mixed – Mode of Control Action)	13
2.3 ระบบอันดับหนึ่ง (First Order Systems)	22
2.3.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็น(Unit Step)	23
2.3.2 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็น(Unit Ramp)	25
2.3.3 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็น(Unit Impulse)	26
2.3.4 คุณสมบัติที่สำคัญของระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลา	26
2.4 ระบบอันดับสอง (Second Order Systems)	27
2.4.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น(Unit Step)	27

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.4.2 นิยามของลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผลตอบสนองชั่วคราว	31
2.4.3 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบอันดับสอง	32
2.4.4 ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น(Unit Ramp)	33
2.5 คุณสมบัติของออปแอมป์	35
2.5.1 คุณสมบัติและพารามิเตอร์บางชนิดของออปแอมป์	36
2.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงของออปแอมป์ ไบอัส ออฟเซต และคริฟต์	39
2.5.3 ผลของกระแสไบอัสที่มีต่อแรงดันเอาต์พุต	42
2.5.4 แรงดันอินพุตออฟเซต	45
2.5.5 แรงดันอินพุตออฟเซตของวงจรรวมลัญญาณ	48
2.5.6 คริฟต์	50
2.6 ระบบการบังคับมอเตอร์	51
2.6.1 พื้นฐานของระบบคอนโทรลดีซีมอเตอร์	51
2.6.2 ทาโคมิเตอร์	52
2.6.3 ทีเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟ	53
2.6.4 การบังคับแบบวงจรถัด	55
2.6.5 ระบบการบังคับความเร็ว	56
2.6.6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์	58
<b>บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง</b>	<b>60</b>
3.1 วงจรตัวควบคุมแบบพี	60
3.1.1 การออกแบบวงจรตัวควบคุมแบบพี	60
3.1.2 การสร้างวงจรตัวควบคุมแบบพี	61
3.2 วงจรตัวควบคุมแบบไอ	61
3.2.1 การออกแบบวงจรตัวควบคุมแบบไอ	62
3.2.2 การสร้างวงจรตัวควบคุมแบบไอ	62
3.3 วงจรตัวควบคุมแบบดี	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.2.1 การออกแบบวงจรตัวควบคุมแบบดี	63
3.2.2 การสร้างตัวควบคุมแบบดี	63
3.4 วงจร ตัวควบคุมแบบพีไอ	64
3.4.1 การออกแบบวงจรตัวควบคุมแบบพีไอ	64
3.4.2 การสร้างวงจรตัวควบคุมแบบพีไอ	65
3.5 วงจรระบบอันดับหนึ่ง	65
3.5.1 การออกแบบวงจรระบบอันดับหนึ่ง	65
3.5.2 การสร้างวงจรระบบอันดับหนึ่ง	66
3.6 วงจรระบบอันดับสอง	67
3.6.1 การออกแบบวงจรระบบอันดับสอง	67
3.6.2 การสร้างระบบอันดับสอง	68
3.7 วงจรรวมสัญญาณ	69
3.7.1 การออกแบบวงจรรวมสัญญาณ	69
3.7.2 การสร้างวงจรรวมสัญญาณ	70
3.8 วงจรขยายแบบกลับเฟส	70
3.8.1 การออกแบบวงจรขยายแบบกลับเฟส	70
3.8.2 การสร้างวงจรขยายแบบกลับเฟส	71
3.9 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยม	71
3.9.1 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยม	71
3.9.2 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยม	72
3.10 วงจรไคร้เวอร์	72
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>74</b>
4.1 การทดลองและผลการทดลองของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ	74
4.1.1 ลำดับขั้นการทดลอง	74
4.1.2 ผลการทดลอง	74

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป ปัญหาและแนวทางการแก้ไขและพัฒนา	79
5.1 บทสรุป	79
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการจัดทำโครงการ	79
5.3 แนวทางและการแก้ไขและพัฒนา	80
ภาคผนวก ก ใบงาน	81
ภาคผนวก ข ส่วนประกอบของชุดทดลอง	125
ภาคผนวก ค รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ	128
ภาคผนวก ง ลายวงจรที่ใช้ในโครงการ	152
บรรณานุกรม	159
ประวัติผู้แต่ง	160

## VIII

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมอัตโนมัติชนิดที่มีการป้อนกลับ	3
รูปที่ 2.2 การควบคุมเบื้องต้นหรือตัวควบคุมของระบบควบคุมอัตโนมัติ	4
รูปที่ 2.3 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพี	4
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตของตัวควบคุมแบบพี	5
รูปที่ 2.5 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมนิวเมติกส์แบบพี	7
รูปที่ 2.6 แผนผังการทำงานที่จัดให้กระชั้นขึ้นจากรูปที่ 2.5	7
รูปที่ 2.7 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบไอ	8
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตของตัวควบคุมแบบ ไอ	9
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงค่าของอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบไอ	10
(ก) เวลาระหว่างดีฟิไนต์ในรูปแบบการพินิจพิเคราะห์	10
(ข) เวลาระหว่างอินฟินิติมอลในรูปแบบต่อเนื่อง	10
รูปที่ 2.10 แผนผังการทำงานของไฮดรอลิกส์แบบรวม	11
รูปที่ 2.11 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบดี	12
รูปที่ 2.12 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีและไอ	15
รูปที่ 2.13 การตอบสนองของตัวควบคุมพีและไอต่อค่าความผิดพลาดยูนิตสเต็ป	15
รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองของตัวควบคุมพีและไอต่อค่าผิดพลาดยูนิตแรมปี	16
รูปที่ 2.15 แผนผังการทำงานตัวควบคุมพีและดี	17
รูปที่ 2.16 การตอบสนองของตัวควบคุมพีและดีที่มีต่อค่าความผิดพลาดยูนิตสเต็ป	17
รูปที่ 2.17 การตอบสนองของตัวควบคุมพีและดีที่มีต่อค่าความผิดพลาดยูนิตแรมปี	18
รูปที่ 2.18 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี	19
รูปที่ 2.19 การตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดี	19
รูปที่ 2.20 ตัวควบคุมนิวเมติกส์แบบพีและไอ	20
รูปที่ 2.21 ตัวควบคุมนิวเมติกส์แบบพีและดี	21
(ก) ตัวควบคุมนิวเมติกส์แบบพี(ย่านแคบ)ตัวควบคุมป้อนกลับ W/O	21
(ข) ตัวควบคุมนิวเมติกส์แบบพีป้อนกลับด้วยเบลโล	21
รูปที่ 2.22 ตัวควบคุมนิวเมติกส์แบบพีไอดี	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
(ข) $V_{i0}$ จะถูกขยายด้วยเกน +4 ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันที่ผิดพลาดถึง 10 มิลลิโวลต์ มาหักล้างกับสัญญาณที่ควรจะเกิดขึ้นจริงที่ $V_0$	49
รูปที่ 2.33 ระบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบพื้นฐาน	51
รูปที่ 2.34 แสดงถึงส่วนประกอบของระบบการบังคับความเร็วของวงจรถัด	55
รูปที่ 2.35 ระบบการบังคับความเร็ว	57
รูปที่ 3.1 วงจรตัวควบคุมแบบพี	61
รูปที่ 3.2 วงจรตัวควบคุมแบบไอ	62
รูปที่ 3.3 วงจรตัวควบคุมแบบดี	64
รูปที่ 3.4 วงจรตัวควบคุมแบบพีไอ	65
รูปที่ 3.5 วงจรระบบอันดับหนึ่ง	66
รูปที่ 3.6 วงจรระบบอันดับสองกรณีโอเวอร์แดมป์ , กรณีออสซิลเลท และกรณีครีทีคัลแดมป์	68
รูปที่ 3.7 วงจรระบบอันดับสองกรณีอันเดอร์แดมป์	69
รูปที่ 3.8 วงจรรวมสัญญาณ	70
รูปที่ 3.9 วงจรขยายแบบกลับเฟส	71
รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยม	72
รูปที่ 3.11 วงจรไคร้เวอร์	73
รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี	74
รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ	75
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดี	75
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีและไอ	76
รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีและดี	76
รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดี	77
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง	77
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของระบบอันดับสอง	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น และนับวันยิ่งจะทวีความรุนแรงมากขึ้น ทุกขณะการดำเนินการผลิตจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพและประสิทธิผลของโรงงานซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยต้นทุนของการผลิต คุณภาพและมาตรฐาน ความปลอดภัยในโรงงาน มลภาวะ ความสามารถในการปรับอัตราการผลิตให้เหมาะสมกับสภาวะทางการตลาด ฯลฯ ทางด้านเทคนิคแล้วเป้าหมายดังกล่าวจะสามารถบรรลุได้ ต้องอาศัยการตรวจวัดและควบคุมอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ ประสิทธิภาพในการผลิตจะดีได้ก็ต้องเริ่มจากการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ในระบบควบคุมต่าง ๆ ในโรงงานอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ

โดยทั่วไปเป้าหมายของระบบควบคุมต่าง ๆ ในโรงงานคือ การรักษาปริมาณทางฟิสิกส์ อันได้แก่ อุณหภูมิ แรงดัน ระดับการไหล ฯลฯ ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมมากที่สุดแม้ว่าสภาวะการทำงาน และสภาพแวดล้อมจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

การควบคุมที่ดีย่อมเริ่มจากการเลือกแบบการควบคุมที่เหมาะสมบางโรงงานอาจจะเลือกควบคุมง่าย ๆ แบบ Manual Control ซึ่งอาศัยพนักงานคอยทำหน้าที่เกี่ยวกับการตรวจวัดการคำนวณ(ตามประสบการณ์ของพนักงาน)และการปรับแต่งการควบคุมแบบนี้ให้ผลการควบคุมไม่ดีนักมักจะถูกจำกัดที่ขีดความสามารถของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวกับความเร็ว ความเชื่อถือได้ และความแม่นยำในการคำนวณเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม โรงงานสมัยใหม่ได้นำเอาเครื่องควบคุมอัตโนมัติมาใช้งาน เพื่อทำหน้าที่หลักในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสม โดยเป็นไปตามเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ ซึ่งตัวควบคุมอัตโนมัติเหล่านี้ไม่ว่าจะถูกพัฒนาจนมีประสิทธิภาพสูงและมีการควบคุมที่ซับซ้อนขนาดไหนย่อมมีวิธีการควบคุมมาจากวิธีการควบคุมพื้นฐานเหล่านี้คือ Proportional (P) Integral (I) และ Derivative (D) จึงคิดจัดสร้างชุดทดลองตัวควบคุม PID ขึ้นมาเพื่อจะจำลองคุณสมบัติและพฤติกรรมของตัวควบคุม PID เพื่อการศึกษาวิธีการควบคุมของตัวควบคุมดังกล่าวแต่ละตัวว่ามีข้อดี ข้อด้อย ต่างกันอย่างไร ซึ่งย่อมจะเป็นพื้นฐานสำหรับการทำความเข้าใจในตัวควบคุมที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นในอนาคต และการควบคุมอย่างกว้างขวางในอนาคตและยังมุ่งจะใช้ชุดทดลองนี้เพื่อประกอบการเรียนการสอนของนักศึกษาในระดับ ปวส. สาขาเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม ให้มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวมากยิ่งขึ้น

## 1.2 ขีดความสามารถของโครงการ

1. สามารถใช้เป็นชุดทดลองเพื่อศึกษาการควบคุมแบบ Proportional Integral และ Derivative ได้
2. สามารถใช้เป็นชุดทดลองเพื่อศึกษาถึงข้อดี ข้อด้อย ของตัวควบคุม PID โดยดูจากผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ต่อสัญญาณอินพุตทดสอบ
3. สามารถใช้เป็นชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรม ของระบบอันดับหนึ่ง และระบบอันดับสองได้
4. สามารถใช้เป็นชุดทดลองเพื่อศึกษาการควบคุมระบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ได้ ได้แก่ ตัวควบคุมแบบ P, PI, PD และ PID ควบคุมระบบอันดับหนึ่งและระบบอันดับสอง
5. สามารถใช้เป็นชุดทดลองเพื่อศึกษาการควบคุมแบบ Open Loop และการควบคุมระบบ Close Loop โดยใช้ตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ได้

## 1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ กล่าวถึงชนิดของการควบคุมพฤติกรรมและกิริยาการควบคุมระบบอันดับหนึ่ง ระบบอันดับสอง การใช้งานออปแอมป์ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบใช้งาน การเพิ่มประสิทธิภาพในการนำออปแอมป์ไปใช้งาน การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างวงจรที่ใช้ในชุดทดลองได้แก่ วงจรตัวควบคุมแบบพี วงจรตัวควบคุมแบบไอ วงจรตัวควบคุมแบบดี วงจรระบบอันดับหนึ่ง วงจรระบบอันดับสอง วงจรตัวควบคุมแบบพีไอ วงจรจำกัดสัญญาณ วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และแรมป์ วงจรแหล่งจ่ายไฟ  $\pm 10V, \pm 12V, \pm 15V, \pm 35V$  วงจรขยายกลับเฟสสัญญาณ วงจรขยายกำลัง 50 W

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง มีเนื้อเกี่ยวกับลักษณะสัญญาณของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ และลักษณะสัญญาณของระบบและวงจรต่าง ๆ ที่กล่าวในบทที่ 3

บทที่ 5 ปัญหาแนวทางการแก้ไขและพัฒนา กล่าวถึงข้อสรุปข้อบกพร่องต่างๆ ของชุดทดลอง ปัญหาที่เกิดขึ้นในการจัดสร้างและกล่าวถึงแนวทางการปรับปรุง การแก้ไขและการพัฒนาชุดทดลองนี้ต่อไป

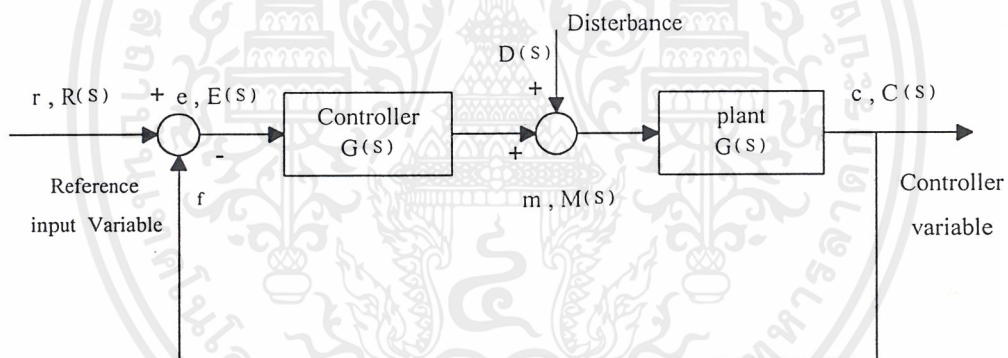
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 กล่าวนำ

ข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากแก่การวิเคราะห์ วิจัยระบบควบคุมอัตโนมัติ ได้แก่ ชนิดของการควบคุมและแบบของระบบควบคุมเพราะเป็นข้อมูลที่ทำให้ทราบถึงลักษณะการทำงานจากระบบโดยทั่วไปทำให้สามารถทำนายคุณสมบัติและการตอบสนองของระบบอย่างประมาณได้

ในระบบควบคุมอัตโนมัติชนิดที่มีการป้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.1 ค่าความผิดพลาดหรือตัวแปร  $e$

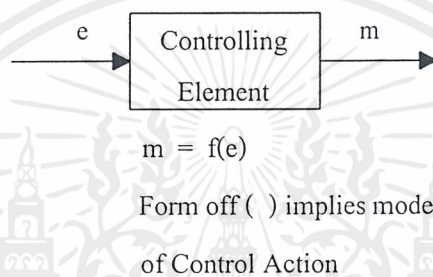


รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมอัตโนมัติชนิดที่มีการป้อนกลับ

ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้มาจากการนำเอาสัญญาณป้อนกลับ  $f$  ไปเปรียบเทียบกับอินพุตตัวแปร  $r$  เป็นสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าสู่ส่วนที่เป็นการควบคุมเบื้องต้น  $G_1(s)$  เพื่อให้การควบคุมเบื้องต้นตอบสนองให้โยกย้ายตัวแปร  $m$  แก่ส่วนที่เป็นต้นกำลังเพื่อแก้ไขให้เอาต์พุต หรือควบคุมตัวแปร  $c$  มีลักษณะเป็นไปในทางที่สอดคล้องกับการเปรียบเทียบอินพุตตัวแปร  $r$  มากยิ่งขึ้น จะเห็นว่าหัวใจของระบบควบคุม คือส่วนที่เป็นการควบคุมเบื้องต้น  $G_1(s)$  เพราะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แก้ไขความคลาดเคลื่อนระหว่างเอาต์พุต  $c$  กับอินพุต  $r$  ของทั้งระบบกล่าวคือรับเอาความคลาดเคลื่อนคือค่าผิดพลาด  $e$  เข้ามาสู่ตัวมัน แล้วสั่งให้ส่วนที่เป็นต้นกำลังทำงาน (โดยการโยกย้ายตัวแปร  $m$ )

## 2.2 ชนิดของการควบคุม (Control Action)

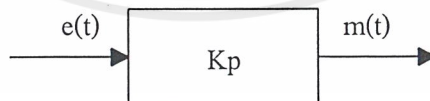
ชนิดของการควบคุมหรือกิริยาการควบคุม หมายถึงชนิดหรือวิธีการทำงานของส่วนที่เป็นตัวควบคุม โดยการควบคุมชนิดของการควบคุมหรือตัวควบคุมเพื่อแก้ไขความคลาดเคลื่อนระหว่าง เอาต์พุต ตัวแปร  $c$  กับอินพุตตัวแปร  $r$  ของทั้งระบบซึ่งได้แก่ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ออกจากการควบคุมเบื้องต้นคือ การโยกย้ายตัวแปร  $m$  กับสัญญาณที่เข้าสู่การควบคุมเบื้องต้นคือ ค่าความผิดพลาดตัวแปร  $e$  ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การควบคุมเบื้องต้นหรือตัวควบคุมของระบบควบคุมอัตโนมัติ

### 2.2.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control : P – Control)

ในกรณีที่ชนิดของการควบคุมเป็นแบบสัดส่วนการทำงานของการควบคุมเบื้องต้นหรือตัวควบคุมจะเป็นไปในลักษณะของสัดส่วนคือ การโยกย้ายตัวแปรจะมีค่าน้อยตามความมากน้อยของค่าความผิดพลาด  $e$  กล่าวคือ



รูปที่ 2.3 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพี

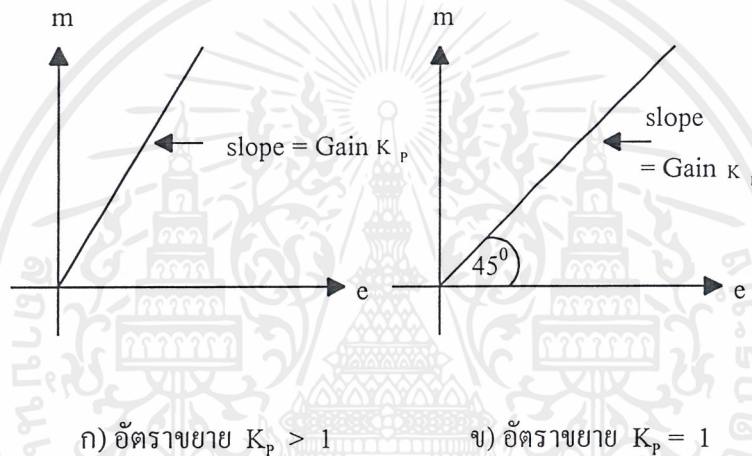
$$m = K_p \cdot e \quad (2.1)$$

โดยที่  $m$  = การเปลี่ยนแปลงของ การโยกย้ายตัวแปร (จาก Ref. Op. Condition)

$K_p$  = อัตราขยายหรือกำลังขยายของตัวควบคุมแบบพี

$e$  = การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (จาก Ref. Op. Condition)

อาจแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นเส้นตรง ในบางครั้งจึงเรียกตัวควบคุมชนิดนี้ว่าการขยาย



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง เอาต์พุตกับอินพุตของตัวควบคุมแบบพี

ตัวอึดอากาศก็จะโยกที่จุดหมุน  $O$  ทำให้ระยะ  $X$  มีค่าสูงขึ้น ทำให้การอันของการไหลมีค่าลดลง อากาศก็ไหลผ่านปลายท่อออกสู่ภายนอกได้สะดวกขึ้น ทำให้ความดัน  $P_b$  มีค่าลดลง และเบลโล  $B$  หดตัว (ระยะ  $z$ ) การที่เบลโล  $B$  หดตัว ก็จะมีผลคือทำให้วาล์วบอลเปิดมากขึ้นทำให้ความดัน  $P_c$  ซึ่งเป็นการโยกย้ายตัวแปรให้มีค่าสูงขึ้น

กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้ อาจนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่อุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตของทั้งตัวควบคุมซึ่งได้แก่ความดัน  $P_c$  กับค่าผิดพลาด  $E$  และเมื่อใช้ค่าต่าง ๆ เป็นค่าที่วัดจากการเปรียบเทียบจะได้ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

ที่ตัวอึดอากาศ

อินพุต คือ  $e$  , เอาต์พุต คือ  $x$

ความสัมพันธ์  $x = \frac{b}{a+b} \cdot e$  (2.2)

ที่ด้านหลังของ เบลโล B และ ปลายท่อ

อินพุต คือระยะ  $x$  , เอาต์พุต คือความดันหลังปลายท่อ ( $P_b$ )

ความสัมพันธ์  $P_b \propto \pi \cdot d \cdot x$   
 $= -K_1 \cdot x$  (2.3)

โดยที่  $K_1$  คือตัวคงค่าและเครื่องหมายลบ เพราะ  $P_b$  จะเพิ่มเมื่อ  $x$  ลดค่าดังกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงค่าของ  $P_b$  กับ  $x$  กลับทางกัน ที่เบลโล B

อินพุต คือ ความดัน  $P_b$  , เอาต์พุตคือการยืดตัวหรือหดตัวของเบลโลความสัมพันธ์หาได้จาก แรงสมมูล : ( $K_2$  มีเครื่องหมายลบ เพราะการเพิ่มค่าของ  $P_b$  ทำให้  $z$  ลดค่า)

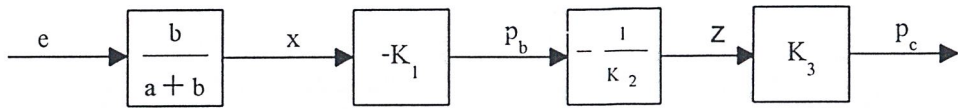
หรือ  $P_b \cdot A_B = K_B \cdot z$   
 $P_b = \frac{K_B}{A_B} \cdot z = -K_2 \cdot z$  (2.4)

ที่วาล์วบอลหรือรีเลย์ตัวควบคุมนิวเมติกส์

อินพุต คือระยะ  $z$  , เอาต์พุต คือ ช่องการไหลซึ่งมีผลต่อความดัน  $P_c$

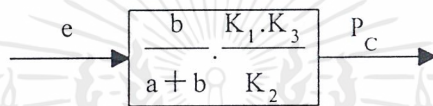
ความสัมพันธ์  $P_c \propto z$   
 หรือ  $P_c = K_3 \cdot z$  (2.5)

สมการ (2.2) ถึง (2.5) อาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงานดังรูปที่ 2.6 เป็น



รูปที่ 2.5 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมนิวมเมติกส์แบบพี

ซึ่งสามารถทำให้อยู่ในรูปที่กระชับขึ้นโดยใช้แผนผังการทำงานพีชคณิต ได้ดังรูปที่ 2.5 และ ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง การโยกย้ายตัวแปร (m) ซึ่งในระบบนี้ได้แก่ความดัน



รูปที่ 2.6 แผนผังการทำงานที่จัดให้กระชับขึ้นจากรูปที่ 2.5

$P_c$  กับอินพุตของระบบคือค่าความผิดพลาด  $e$  เป็น

$$P_c = \left[ \frac{b}{a+b} \cdot \frac{K_1 \cdot K_3}{K_2} \right] \cdot e \quad (2.6)$$

ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของ  $P_c$  เป็นสัดส่วนกับการเปลี่ยนแปลงของ  $e$  กล่าวคือเป็นตัวควบคุมแบบพี และเมื่อเทียบกับสมการ (2.1) จะเห็นว่าค่าในวงเล็บของสมการ (2.6) คือตัวควบคุมแบบพี อัตราขยาย  $K_p$  ซึ่งก็คือ  $G_p(D)$  ในรูปที่ 2.1

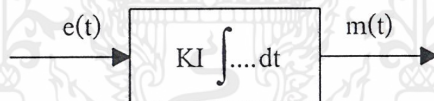
ถึงแม้ว่าตัวควบคุมแบบพีจะทำให้เกิดการสมดุลระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตในกระบวนการ แต่ตัวควบคุมแบบพีก็มีขีดจำกัดที่สำคัญกล่าวคือ ถ้าสมมติว่าการควบคุมระดับนั้นต้องการที่จะควบคุมระดับให้อยู่ตรงจุดกึ่งกลาง ดังนั้นถ้าลูกลอยอยู่ตรงกึ่งกลางวาล์วทางด้านไหลเข้าจะต้องเปิด 50% และปริมาณการไหลเข้าจะเท่ากับปริมาณไหลออกซึ่งเป็นไหลของระบบ ถ้าวาล์วทางด้านไหลออกเปิดมากขึ้นจะทำให้ไหลของระบบเพิ่มมากขึ้น นั่นคือลูกลอยจะลดต่ำลงและทำให้วาล์วทางด้านไหลเข้าเปิดมากขึ้น ในที่สุดตำแหน่งของวาล์วทางด้านเข้าก็จะไปอยู่ที่ตำแหน่งใหม่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามลูกลอยหรือระดับอาจ

จะไปอยู่ที่ตำแหน่งใหม่ซึ่งต่างจากตำแหน่งเดิมที่ต้องการควบคุมในตอนแรก ค่าความแตกต่างของระดับใหม่กับระดับเดิมนี้อาจเรียกว่า “ออฟเซต”

การเกิดออฟเซตนี้เป็นคุณลักษณะของระบบตัวควบคุมแบบพี ทั้งหมดทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของระบบตัวควบคุมแบบพีนั้นไม่สามารถควบคุมระบบที่มีโพลที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ดีเท่าที่ควร และในกรณีที่โพลมีค่าคงที่แต่เปลี่ยนค่าของระดับของเหลวที่ถูกควบคุมไปก็เช่นเดียวกันก็อาจจะเกิดมีออฟเซตขึ้น และเมื่อระบบควบคุมที่มีการควบคุมตัวควบคุมแบบพีเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่นั้น ออฟเซตจะต้องมีขนาดไม่เกินครึ่งหนึ่งของย่านตัวควบคุมแบบพี แต่ถ้าออฟเซตมีค่าเกินครึ่งหนึ่งของค่าของย่านตัวควบคุมแบบพีแล้ว วาล์วควบคุมก็จะเปิดเต็มที่หรือปิดสนิทและตัวควบคุมก็จะไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้อีก ดังนั้นกิริยาควบคุมของตัวควบคุมแบบพี โดยทั่ว ๆ ไปจึงเหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการตัวควบคุมแบบพีในย่านแคบ ๆ

## 2.2.2 การควบคุมแบบรวม ( Integral Control : I – Control )

ตัวควบคุมมีลักษณะการทำงานกิริยาการควบคุมเป็นแบบรวมหรือตัวควบคุมแบบไอ คือตัวควบคุมที่ให้การแก้ไขความคลาดเคลื่อน  $m$  ในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกับช่วงเวลาใต้ขึ้นของค่าความผิดพลาด  $e$



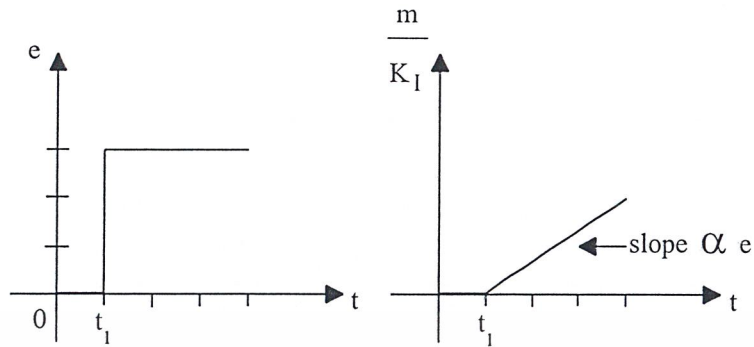
รูปที่ 2.7 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบไอ

$$m \propto \int e dt$$

หรือ

$$m = K_I \int e dt \quad (2.7)$$

โดยที่  $K_I$  คือตัวคงค่าเรียกว่า อัตราขยาย หรือ กำลังขยายของตัวควบคุมแบบไอ และอาจแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตของตัวควบคุมแบบโอ

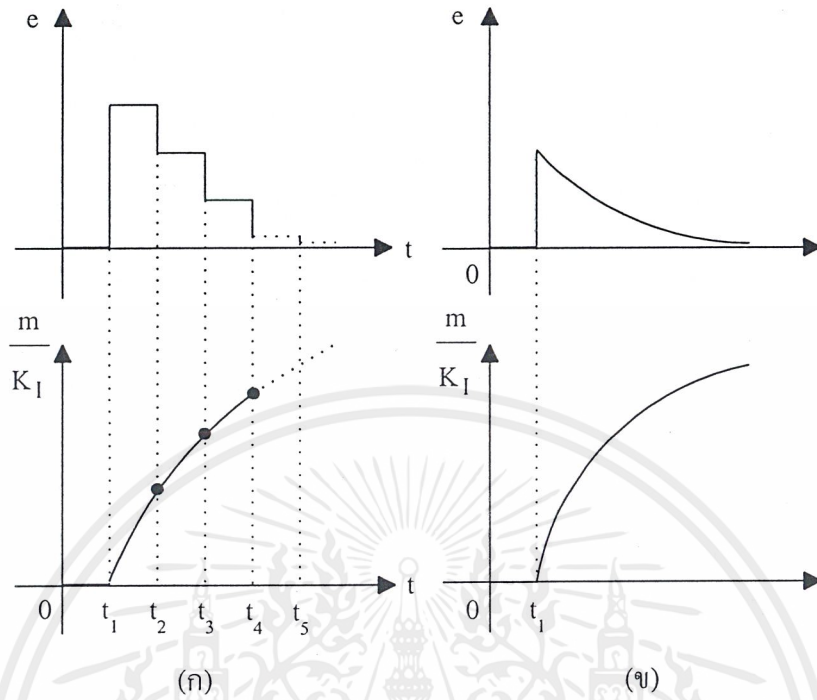
กล่าวคือหากค่าความผิดพลาดเป็นการเปลี่ยนลำดับขั้น การโยกย้ายอัตราส่วนของตัวแปร จะเป็นฟังก์ชันแรมปี ซึ่งมีความลาดชันขึ้นอยู่กับขนาดของค่าความผิดพลาด  $e$  ดังสมการ (2.8) ซึ่งได้จากการดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (2.7) เทียบกับเวลา

$$\frac{1}{K_I} \cdot \dot{m} = e \quad (2.8)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.8) จะเห็นว่าเมื่อค่าความผิดพลาด มีค่าน้อยลงค่าของ  $\frac{\dot{m}}{K_I}$  หรือความชันของ  $\frac{m}{K_I}$  จะใกล้แนวระดับขึ้นทุกที และกลับมามีอยู่ในระดับดังในรูป 2.9

เมื่อ  $e = 0$  ซึ่งในทางคณิตศาสตร์กล่าวได้ว่า  $e$  จะเท่ากับศูนย์ หรือความชันของ  $\frac{1}{K_I} \cdot \dot{m}$  จะอยู่

ในแนวระดับ เมื่อเวลาผ่านไปนานมากคือ  $t \rightarrow \infty$



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงค่าของอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบไอ  
 (ก) เวลากระหว่างดีฟิเน็ตในรูปแบบการพินิจพิเคราะห์  
 (ข) เวลากระหว่างอินฟิเน็ตซิมอลในรูปแบบต่อเนื่อง

ข้อสังเกตที่เห็นได้ชัดอีกประการก็คือ เมื่อ  $e$  กลับมา  $= 0$  (เมื่อ  $t \rightarrow \infty$ ) แล้วค่าของ  $\frac{m}{K_I}$  ไม่จำเป็นว่าจะกลับมา  $= 0$  เลข (เฉพาะ ความชัน ของ  $\frac{m}{K_I}$  เท่านั้นที่กลับมา  $= 0$ ) จึง

อาจสรุปได้ว่า การโยกย้ายตัวแปร ( $m$ ) ของตัวควบคุมแบบไอจะมีค่าที่ล้อยตัวผัดกับในตัวควบคุมแบบพี ดังแสดงในสมการ (2.1)

กล่าวคือ  $m$  จะ  $= 0$  เสมอทุกครั้งที่  $e = 0$

กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น อาจแทนได้ด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้  
 ที่ช่องหลอด

อินพุต คือ  $e$  , เอาต์พุต คือ  $\dot{q}_H$

ความสัมพันธ์ 
$$\dot{Q}_H = C_d \cdot A_f \sqrt{\frac{P_s - P_b}{e}}$$

ซึ่งจะเห็นว่าอยู่ในรูปของ  $\dot{G}_H = f(A, P_b)$  เนื่องจาก  $C_d, P_s$  และ  $e$  มีค่าคงที่ และโดยที่  $A_F$  ซึ่งได้แก่ พื้นที่การไหลมีค่าขึ้นอยู่กับความมากน้อยของ  $e$  ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า

$$\dot{G}_H = f(e, P_b) \quad (2.9)$$

โดยสมการเชิงเส้นใกล้ การเปรียบเทียบสภาวะการทำงาน :

$$\begin{aligned} \dot{q}_H &= K_1 \cdot e - K_2 \cdot P_b \\ &\cong K_1 \cdot e \end{aligned} \quad (2.10)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ  $\dot{q}_H$  จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของ  $e$  มากกว่า  $P_b$  มาก ที่ลูกสูบและกระบอกสูบ

อินพุต คือ การไหลของน้ำมันที่เข้าและออกทางส่วนล่างและบนของลูกสูบ

เอาต์พุต คือ การเคลื่อนที่ของลูกสูบ

ความสัมพันธ์ (จากสมการต่อเนื่อง)

$$\dot{q}_H = A \cdot \dot{y} = AD(y) \quad (2.11)$$

ที่วาล์วควบคุมการไหลของเชื้อเพลิง

อินพุต คือ  $y$  , เอาต์พุต คือ  $q$

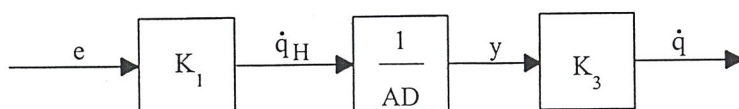
ความสัมพันธ์

$$\dot{q} \propto y$$

หรือ

$$\dot{q} = K_3 \cdot y \quad (2.12)$$

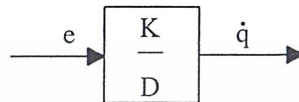
สมการ(2.9) ถึง (2.12) อาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงาน ดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนผังการทำงานของไฮดรอลิกส์แบบรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ} \quad \dot{q} &= \frac{K_1 K_3}{AD} \cdot e \\ &\equiv \frac{K}{D} \cdot e \end{aligned} \quad (2.13)$$

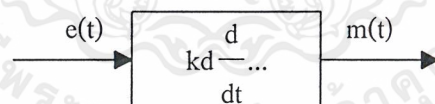


$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad \dot{q} &= \frac{K}{D} \cdot e \\ &= K \int e dt \end{aligned}$$

ซึ่งจะเห็นว่าเอาต์พุตคือการ โยกย้ายตัวแปรที่มีค่าเป็นสัดส่วนกับช่วงเวลาใต้ขึ้นของอินพุตคือ ค่าความผิดพลาด  $e$

### 2.2.3 การควบคุมแบบอัตรา (Derivative Control : D – Control)

การควบคุมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบดีเป็นการควบคุมซึ่งมีการแก้ไขความคลาดเคลื่อนของระบบในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด  $e$  กล่าวคือ



รูปที่ 2.11 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบดี

$$m \propto \frac{de}{dt}$$

$$\text{หรือ} \quad m = K_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (2.14)$$

โดยที่  $K_d$  คือตัวคงค่าซึ่งเรียกว่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมเบื้องต้น หรือตัวควบคุมชนิดนี้จะให้การโยกย้ายตัวแปร  $m$  ทันทีที่ค่าของค่าความผิดพลาด  $e$  มีการเปลี่ยนแปลงผิดกับการควบคุมชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะให้การแก้ไขความคลาดเคลื่อนจากปริมาณของความคลาดเคลื่อน  $e$  การควบคุมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบดีนี่ยิ่งมีประโยชน์มาก เพราะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเฝ้าความเคลื่อนไหวของค่าความผิดพลาด โดยจะให้การแก้ไขทันทีที่สภาพของค่าผิดพลาดเปลี่ยนไป จึงเท่ากับเป็นการแก้ความคลาดเคลื่อนของระบบล่วงหน้าแทนที่จะให้การแก้ไขหลังจากมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นแล้วเหมือนการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบรวม ดังที่ได้กล่าวมา

ข้อเสียของการควบคุมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบดีนี่ยกคือถ้าหากค่าความผิดพลาด  $e$  มีค่าคงที่ไม่ว่าจะมากหรือน้อยเท่าใด การควบคุมเบื้องต้นของตัวควบคุมชนิดนี้จะไม่ให้เกิดการโยกย้ายตัวแปร  $m$  กล่าวคือ

$$\begin{aligned} m &= K_d \cdot \frac{de}{dt} \\ &= 0 \text{ เมื่อ } e = \text{ค่าคงค่า} \end{aligned} \quad (2.14)$$

นั่นคือ มันจะไม่ตอบสนองต่อค่าผิดพลาด  $e_{ss}$  ใด ๆ ในทางปฏิบัติจึงไม่ใช้การควบคุมชนิดนี้เพียงชนิดเดียวในระบบควบคุมอัตโนมัติ แต่จะถูกนำไปใช้ร่วมกับการควบคุมชนิดอื่น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นการควบคุมแบบผสมเสมอ

#### 2.2.4 การควบคุมแบบผสม (Mixed – Mode of Control Action)

การควบคุมแบบผสม เป็นการควบคุมซึ่งมีการแก้ไขความคลาดเคลื่อนหรือ ของระบบเป็นแบบผสมคือให้ การโยกย้ายตัวแปร  $m$  ในลักษณะที่เหมือนกับเอาลักษณะการทำงานของ การควบคุมชนิดต่าง ๆ มาผสมกัน เช่น การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมหรือตัวควบคุมแบบพีและแบบไอ, การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตราหรือ ตัวควบคุมแบบพีและดี และการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบพีไอดี

จุดประสงค์ของการนำเอาการควบคุมแบบต่าง ๆ มาผสมกันเป็นการควบคุมแบบผสมก็เพื่อแก้ไขการตอบสนองของระบบดีขึ้น กล่าวคือเพื่อปรับปรุงความเร็ว ความแม่นยำ และความเสถียรของระบบให้ดียิ่งขึ้น โดยนำเอาข้อดีของการควบคุมแต่ละแบบมารวมกัน เช่น ระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนย่อมมีประสิทธิภาพสู้ระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมไม่ได้ เพราะระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วน อาจจะทำให้การตอบสนองที่รวดเร็วได้จริง แต่ไม่ว่าเวลาจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

ผ่านไปนานเท่าไร (ที่ค่าสูญเสีย) ย่อมมีความคลาดเคลื่อนเสมอ หากระบบถูกรบกวนจากภายนอก ซึ่งปัญหานี้จะแก้ไขไปได้หากใช้การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม และในทำนองเดียวกันการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม สำหรับระบบควบคุมบางชนิด เช่น การควบคุมแบบเบาแรง ย่อมให้การตอบสนองของระบบผู้การตอบสนองของระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตราไม่ได้ ในแง่ที่ว่าขาดระบบล่วงหน้าไป กล่าวคือในบางครั้งระบบจะให้การตอบสนองที่มีความคลาดเคลื่อนหรือเอาต์พุตที่แกว่งไปจากอินพุตตัวแปร ( r ) มากเพราะในระบบที่มีการควบคุมแบบพีและไอนั้นจะไม่ทำงานในทันทีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของค่าความผิดพลาด e ผิดกับแบบหรือในกรณีของการควบคุมแบบเบาแรงระบบที่มีการควบคุมแบบพีและไอ อาจทำงานไม่ทัน เพราะ การเปรียบเทียบอินพุตตัวแปร ( r ) เปลี่ยนแปลงอยู่แทบตลอดเวลา

### 1. การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม (Proportional – Plus Integral Control)

ความสัมพันธ์ของการโยกย้ายตัวแปร m กับค่าความผิดพลาด e ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้ คือ

$$m = K_p \cdot e + K_I \int_0^t e dt$$

$$\equiv K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_I D} \right] e \quad (2.15)$$

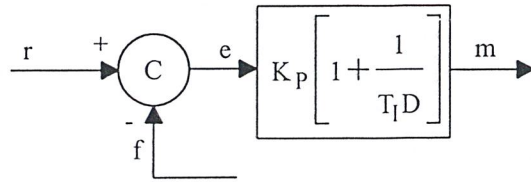
โดยที่  $K_p \equiv$  อัตราขยาย ของตัวควบคุมแบบพี

$K_I \equiv$  อัตราขยาย ของตัวควบคุมแบบไอ

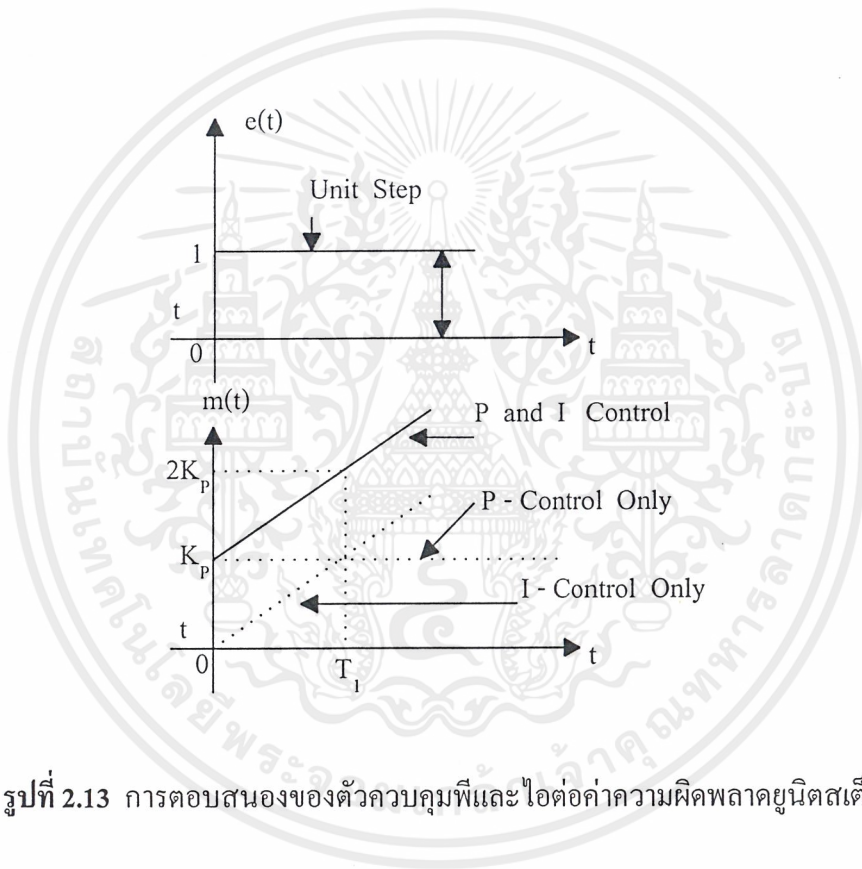
$T_I \equiv$  ช่วงเวลากรียาควบคุมแบบไอ  $= \frac{K_p}{K_I}$

= ระยะเวลาที่ ตัวควบคุมแบบไอ ให้การตอบสนองเท่ากับการตอบสนองของ ตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุม (ส่วนกลับของ  $T_I$  คือ อัตราส่วนเริ่มต้น )

ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.12 และการตอบสนองของการโยกย้ายตัวแปร m ที่มีต่อค่าความผิดพลาด e ในกรณีที่ค่าความผิดพลาดเป็นฟังก์ชันขั้นสตีปและฟังก์ชันแรมป์ อาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

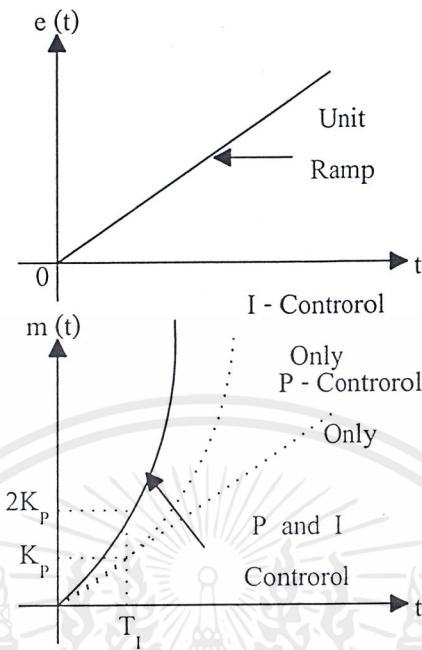


รูปที่ 2.12 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีและไอ



รูปที่ 2.13 การตอบสนองของตัวควบคุมพีและไอต่อค่าความผิดพลาดยูนิตสเต็ป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การตอบสนองของตัวควบคุมพีและไอต่อค่าผิดพลาดยูนิตรัมป์

2. การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตรา ( Proportional – Plus – Derivative Control )

ความสัมพันธ์ของการโยกย้ายตัวแปร  $m$  กับค่าความผิดพลาด  $e$  ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้ คือ

$$\begin{aligned}
 m &= K_p \cdot e + K_D \cdot \frac{de}{dt} \\
 &\equiv K_p \cdot e + K_D \cdot T_d \frac{de}{dt} \\
 &= K_p [1 + T_d \cdot D] e
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

โดยที่  $K_p \equiv$  อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี

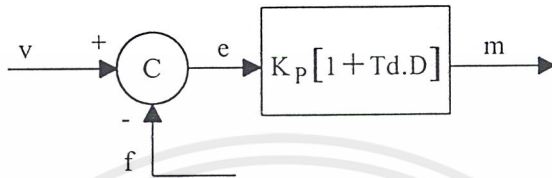
$K_D \equiv$  อัตราขยายของตัวควบคุมแบบดี

$T_d \equiv$  ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบดี

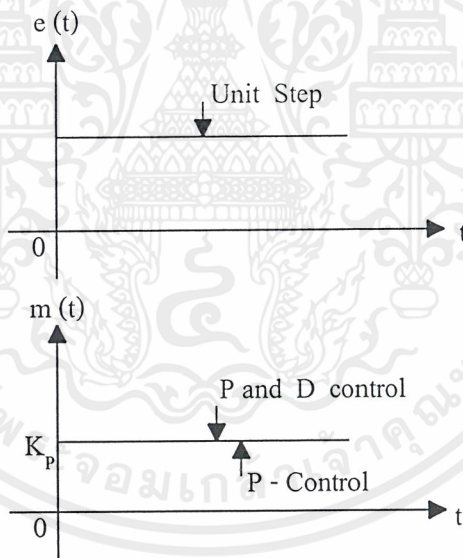
= ระยะเวลาที่ ตัวควบคุมแบบดีให้การตอบสนองนำการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

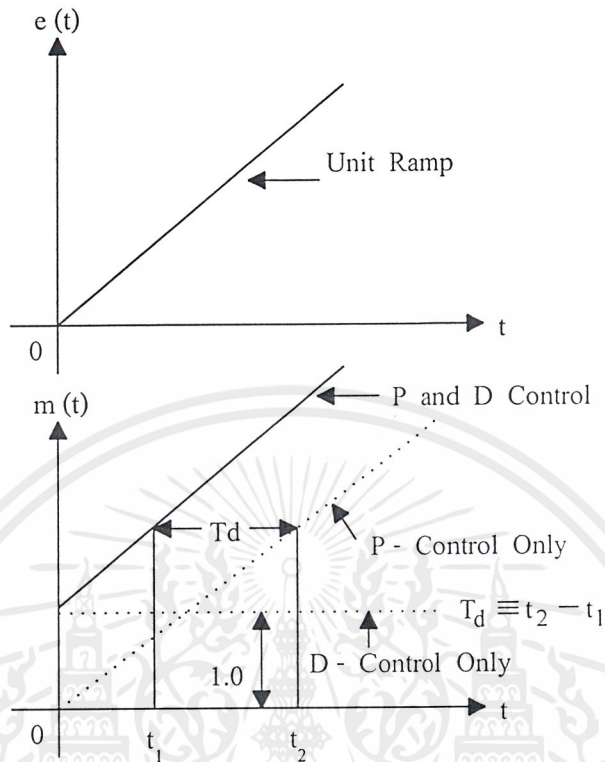
ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และการตอบสนองของการโยกย้ายตัวแปร  $m$  ที่มีต่อค่าความผิดพลาด  $e$  ในกรณีที่ค่าความผิดพลาดเป็นฟังก์ชันขั้นเตี้ยและฟังก์ชันแรมป์ อาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 แผนผังการทำงานตัวควบคุมพีและดี



รูปที่ 2.16 การตอบสนองของตัวควบคุมพีและดีที่มีต่อค่าความผิดพลาดยูนิตสตีป



รูปที่ 2.17 การตอบสนองของตัวควบคุมพีและดีที่มีต่อค่าความผิดพลาดหน่วยเรมป์

### 3. การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตรา (Proportional – plus – Integral – plus – Derivative Control)

ความสัมพันธ์ของการโยกย้ายตัวแปร  $m$  กับค่าความผิดพลาด  $e$  ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้ คือ

$$m = K_p \cdot e + K_I \int_0^t e dt + K_D \cdot \frac{de}{dt}$$

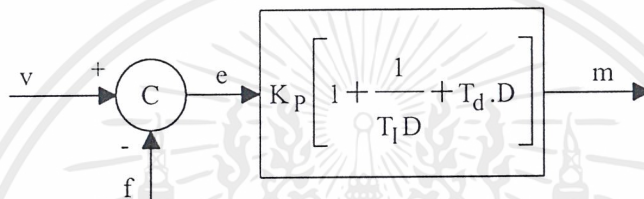
$$K_p \cdot e + \frac{K_p}{T_I} \int_0^t e dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de}{dt}$$

$$K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_I D} + T_d \cdot D \right] e \quad (2.17)$$

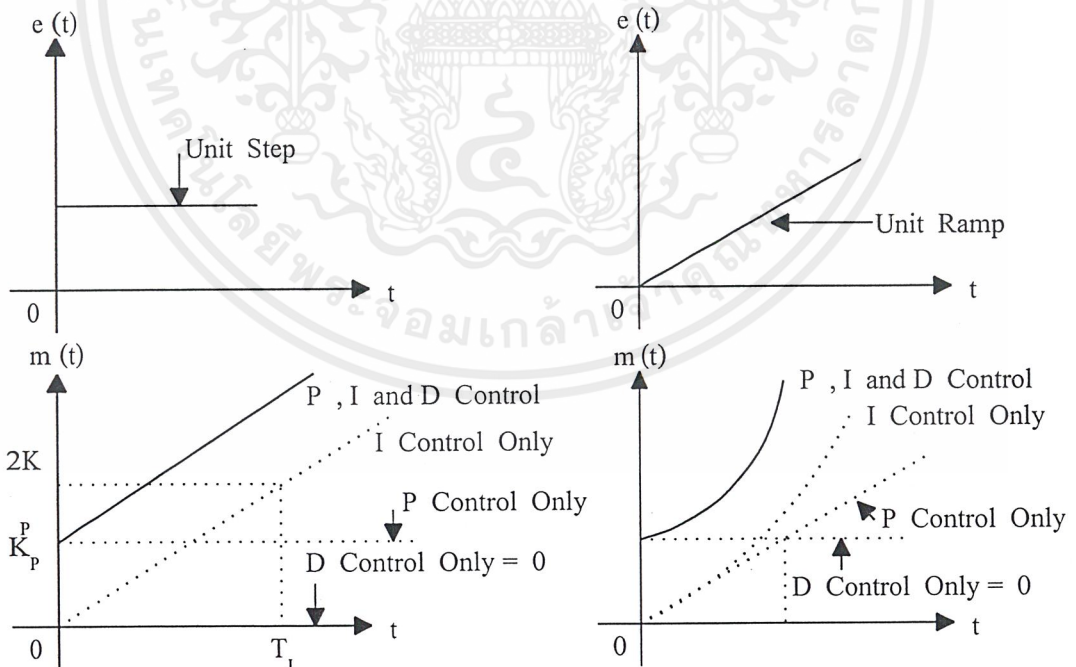
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่  $K_p \equiv$  อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี  
 $K_i \equiv$  อัตราขยายของตัวควบคุมแบบไอ  
 $K_d \equiv$  อัตราขยายของตัวควบคุมแบบดี  
 $T_i \equiv$  ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบไอ  
 $T_d \equiv$  ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบดี

ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และการตอบสนองของการเปรียบเทียบ



รูปที่ 2.18 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี

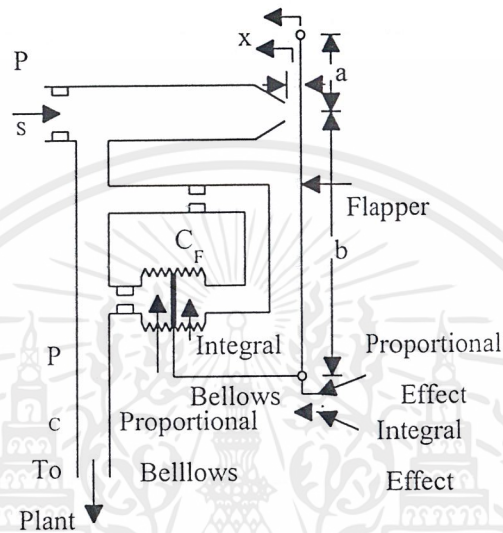


รูปที่ 2.19 การตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปร  $m$  ที่มีต่อค่าความผิดพลาด  $e$  ในกรณีที่ค่าความผิดพลาดเป็นฟังก์ชันสเต็ปและฟังก์ชันแรมป์ อาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.19

การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมหรือตัวควบคุมพีและไอได้แก่ ตัวควบคุมนิวเมติกส์แบบพีและไอ ดังรูปที่ 2.20



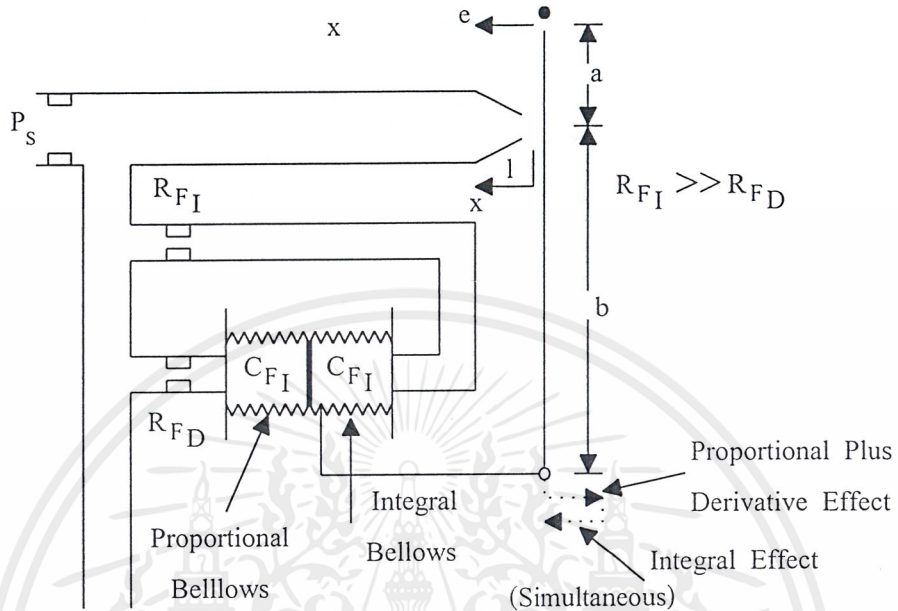
รูปที่ 2.20 ตัวควบคุมนิวเมติกส์แบบพีและไอ

ซึ่งจะเห็นว่า ภิรยาคควบคุมแบบไอ ในตัวควบคุมจะเป็น ไปในลักษณะที่แก้การป้อนกลับเนื่องมาจากตัวควบคุมแบบพีอย่างช้า ๆ ฉะนั้นในช่วงแรกที่  $e$  มีการเปลี่ยนแปลง ระบบก็จะให้ผลตอบสนองเหมือนกับเป็น ตัวควบคุมแบบพี ซึ่งดีคือรวดเร็วและเมื่อเวลาผ่านไป ระบบก็จะให้การตอบสนองเหมือนกับเป็น ตัวควบคุมแบบไอเมื่อเบลดโเบบรวมมีความดัน  $= P_c$

รูปที่ 2.21 แสดงการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตราหรือตัวควบคุมพีและดี ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อ  $R_f$  มีค่าสูงมากตัวควบคุมก็จะกลายเป็นตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมชนิดที่มีการป้อนกลับ ดังในรูปที่ 2.21 ก.และ ข.ตามลำดับ



และตัวควบคุมนิวแมติกส์ ชนิดตัวควบคุมพีไอดี ดังในรูปที่ 2.22



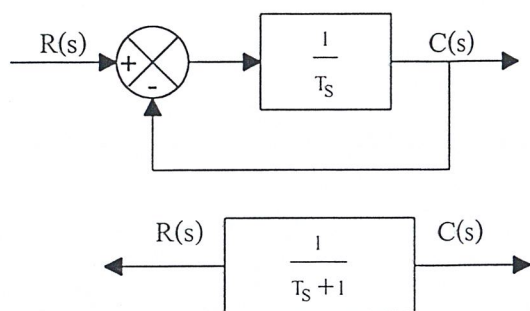
รูปที่ 2.22 ตัวควบคุมนิวแมติกส์แบบพีไอดี

## 2.2 ระบบอันดับหนึ่ง (First Order Systems)

พิจารณาระบบอันดับหนึ่งในรูป 2.23 (ก) ซึ่งระบบนี้อาจจะเป็นวงจร R-C หรือระบบใด ๆ ก็ได้และรูป 2.23 (ข) เป็นแผนผังการทำงานของรูป 2.23 (ก) ที่ทำให้ง่ายขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบอันดับหนึ่งในกรณีนี้คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{T_s + 1} \quad (2.18)$$

ในที่นี้เราจะวิเคราะห์ถึงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็น ยูนิตสเต็ป, ยูนิตแรมป์ และ ยูนิตอิมพัลส์ โดยที่กำหนดให้ภาวะแรกเริ่มเป็นศูนย์ระบบทางกายภาพต่าง ๆ ที่มีทรานซ์เฟอร์ฟังก์ชัน เหมือนกันจะมีผลตอบสนองต่ออินพุตแบบเดียวกันเหมือนกัน และผลตอบสนองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถจะอธิบายถึงคุณสมบัติทางกายภาพของระบบนั้น ๆ ได้



รูปที่ 2.23 (ก) แผนผังการทำงานของระบบอันดับหนึ่ง

(ข) แผนผังการทำงานที่ง่ายขึ้นของรูป (ก)

### 2.3.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็น(Unit Step)

เนื่องจากการแปลงลาปลาซของยูนิทสเต็ปมีค่าเท่ากับ  $1/S$  ดังนั้นแทนค่า  $R(S)$  ในสมการ (2.18) ด้วย  $1/S$  จะได้

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{S} \quad (2.19)$$

โดยใช้ ฟังก์ชันพาร์ทิเชียล

$$C(s) = \frac{1}{S} - \frac{T}{Ts + 1} \quad (2.20)$$

นำสมการ (2.20) มาทำการแปลงกลับลาปลาซ เราจะได้ว่า

$$C(t) = 1 - e^{-t/T}; t \geq 0 \quad (2.21)$$

สมการ (2.21) บอกให้เราทราบว่าที่ภาวะแรกเริ่ม  $t=0$  นั้น เอาต์พุต  $C(t)$  จะมีค่าเท่ากับ ศูนย์และในตอนสุดท้าย  $C(t)$  จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง สำหรับที่  $t=T$  นั้น  $C(t)$  จะมีค่า 0.632 หรือ ผลตอบสนอง  $C(t)$  มีค่าเข้าสู่ 63.2 % ของค่าสุดท้าย ซึ่งจะเห็นได้โดยง่ายจากการแทนค่า  $t=T$  ในสมการ (2.21) นั่นคือ

$$C(t) = 1 - e^{-t/T} = 0.632 \quad (2.22)$$

ดังที่ทราบกันอยู่แล้วว่า  $T$  เป็นช่วงเวลาคงที่ของระบบ ถ้าช่วงเวลาคงที่มีค่าน้อย ความเร็วของผลตอบสนองของระบบจะเร็ว คุณลักษณะที่สำคัญอันดับหนึ่งของกราฟของผลตอบสนองที่เป็นเอ็กโปเนนเชียล ก็คือความชันของเส้นสัมผัสที่  $t = 0$  ซึ่งหาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ (2.21) และให้  $t = 0$  นั่นคือ

$$\left. \frac{dc(t)}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{1}{T} e^{-t/T} \right|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (2.23)$$

เอาต์พุตของระบบจะเข้าสู่ค่าสุดท้ายที่  $t = T$  ถ้าหากว่าผลตอบสนองรักษาความเร็วที่ภาวะแรกเริ่มไว้ได้ และจากสมการ (2.23) เราจะเห็นได้ว่าความชันของกราฟของผลตอบสนอง  $C(t)$  จะลดลงเรื่อยๆ จาก  $1/T$  ที่  $t = 0$  ไปเป็นศูนย์ที่  $t = \infty$  แสดงถึงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป ในช่วงเวลาเท่ากับหนึ่งช่วงเวลาคงที่ ผลตอบสนองเริ่มมีค่าจากศูนย์ไปถึง 63.2 % ของค่าสุดท้ายเมื่อเวลาผ่านไปสองช่วงเวลาคงที่ผลตอบสนองจะมีค่า 86.5 % ของค่าสุดท้ายและเมื่อ  $t = 3T, 4T, 5T$  นั้นผลตอบสนองมีค่า 95 %, 98.2 % และ 99.3 % ของค่าสุดท้ายตามลำดับ ดังนั้นสำหรับ  $t \geq 4T$  นั้น ผลตอบสนองจะมีค่าอยู่ในช่วง 2 % ของค่าสุดท้ายซึ่งโดยทั่วไปเราถือว่าเมื่อผลตอบสนองมีค่าเข้าสู่ช่วง 2 % ของค่าสุดท้ายนั้นแสดงว่าได้เข้าสู่ภาวะคงที่แล้วนั่นก็คือระบบอันดับหนึ่งจะเข้าสู่ภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปสี่ ช่วงเวลาคงที่

ค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่ของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ปสามารถหาได้ดังนี้

$$e(t) = r(t) - C(t) = e^{-t/T} \quad (2.24)$$

โดยที่  $e(t) =$  ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ

ค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่  $e_{ss}(t)$  หาได้จาก

$$e_{ss}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (2.25)$$

นั่นก็คือค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่ของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ปจะมีค่าเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็น (Unit Ramp)

เอาต์พุตของระบบอันดับหนึ่งในสมการ (2.18) ต่ออินพุตที่เป็นยูนิตเรมปีในรูปแบบของการแปลงลาปลาซคือ

$$C(s) = \frac{1}{T_s + 1} \cdot \frac{1}{s^2} \quad (2.26)$$

ทั้งนี้เพราะการแปลงลาปลาซของยูนิตเรมปี มีค่าเท่ากับ  $1/s^2$

สมการ (2-31) เขียนใหม่ได้ว่า

$$C(s) = \frac{1}{s^2} - \frac{T}{s} + \frac{T^2}{T_s + 1} \quad (2.27)$$

ผลตอบสนองในโดเมนเวลาคือ

$$C(s) = t - T + Te^{-t/T}; t \geq 0 \quad (2.28)$$

ค่าความคลาดเคลื่อน  $e(t)$  คือ

$$\begin{aligned} e(t) &= r(t) - c(t) \\ &= T(1 - e^{-t/T}) \end{aligned} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $t$  มีค่าเข้าใกล้อินฟินิตี้  $e^{-t/T}$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$e_{ss}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = T \quad (2.30)$$

### 2.3.3 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็น (Unit Impulse)

เมื่ออินพุตเป็นยูนิตอิมพัลส์  $R(s) = 1$  ดังนั้นเอาต์พุตของระบบอันดับหนึ่งในรูปแบบ 2.23 คือ

$$C(s) = \frac{T^2}{T_s + 1} \quad (2.31)$$

หรือ

$$c(t) = \frac{1}{T} e^{-t/T} \quad (2.32)$$

### 2.3.4 คุณสมบัติที่สำคัญของระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลา

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาข้างต้น เราได้ว่าเอาต์พุต  $c(t)$  ของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นยูนิตแรมป์ คือ

$$c(t) = t - T + T e^{-t/T}; t \geq 0 \quad (2.33)$$

สำหรับอินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป ซึ่งเป็นค่าอนุพันธ์ของยูนิตแรมป์ นั้นเอาต์พุต  $c(t)$  คือ

$$c(t) = 1 - e^{-t/T}; t \geq 0 \quad (2.34)$$

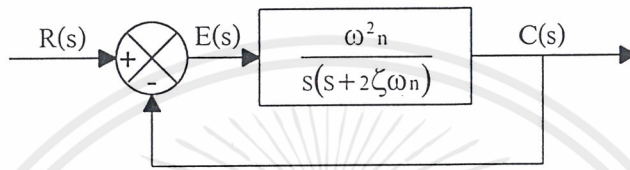
และสำหรับอินพุตที่เป็นยูนิตอิมพัลส์ ซึ่งเป็นค่าอนุพันธ์ของยูนิตสเต็ปนั้นเอาต์พุต  $c(t)$  คือ

$$c(t) = \frac{1}{T} e^{-t/T}; t \geq 0 \quad (2.35)$$

เมื่อนำเอาผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตทั้งสามแบบนี้มาเปรียบเทียบกัน เราจะเห็นได้อย่างแจ่มชัดว่าผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่ได้มาจากการหาค่าอนุพันธ์ของอินพุตเดิมจะมีค่าเท่ากับค่าอนุพันธ์ของผลตอบสนองที่ได้จากอินพุตเดิมนั้น ทำนองเดียวกันผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่ได้จากการอินทิเกรตของอินพุตเดิมจะมีค่าเท่ากับการนำเอาผลตอบสนองของอินพุตเดิมนั้นมาอินทิเกรตและหาค่าคงที่ของการอินทิเกรตจากค่าที่ภาวะแรกเริ่มนี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลา สำหรับระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาหรือระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะไม่มีคุณสมบัติข้อนี้

## 2.3 ระบบอันดับสอง (Second Order Systems)

การออกแบบทางด้านระบบควบคุม ส่วนใหญ่แล้วต้องใช้ในการวิเคราะห์จากระบบอันดับสองถึงแม้ในทางปฏิบัติจริง อาจพบกับระบบที่มีอันดับสูง ๆ หรือหลาย ๆ อันดับก็ตาม เราสามารถที่จะประมาณให้เป็นระบบอันดับสองได้ แผนผังการทำงาน ในรูป 2.24 และ ทรานซ์เฟอร์ฟังก์ชัน วงจรปิด คือ



รูปที่ 2.24 ระบบอันดับสอง

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.36)$$

นั่นคือ พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบอันดับสอง สามารถจะอธิบายในเทอมของ พารามิเตอร์สองตัวคือ  $\zeta$  และ  $\omega_n$  ได้ ถ้า  $0 < \zeta < 1$ , ขั้ววงจรถัดจะเป็นคอมเพล็กซ์คอนจูเกต และอยู่ทางครึ่งซ้ายในระนาบ  $s$  ระบบจะเป็นแบบออสซิลเลตอรี ซึ่งผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบ จะเกิดการแกว่ง ถ้า  $\zeta = 1$ , เราจะเรียกระบบนั้นว่าเป็นแบบครีติกอลแดมพ์ ส่วนระบบโอเวอร์แดมพ์นั้นจะมี  $\zeta > 1$  ผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบที่มีการหน่วงแบบครีติกอลแดมพ์และโอเวอร์แดมพ์นั้นจะไม่มีแกว่งเกิดขึ้น ถ้า  $\zeta = 0$  เอาต์พุตของระบบจะเกิดการแกว่งต่อเนื่องกันไปและสำหรับ  $\zeta < 0$  แล้วจะเป็นกรณีของเน็คกาทีฟแดมพ์ ซึ่งระบบจะไม่เสถียร

### 2.4.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น (Unit Step)

ต่อไปจะแสดงถึงการคำนวณหาผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น ยูนิตสเต็ปโดยจะพิจารณาเป็นสามกรณี คือ กรณีของออสซิลเลตอรี, กรณีของครีติกอลแดมพ์ และกรณีโอเวอร์แดมพ์ ตามลำดับ

### 1. กรณีออสซิลเลเตอร์แดมป์ ( $0 < \zeta < 1$ )

ในกรณีนี้ ทรานซ์เฟอร์ฟังก์ชันวงจรมีได้เขียนได้ในรูป

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(S + \zeta\omega_n + j\omega_d)(S + \zeta\omega_n - j\omega_d)} \quad (2.37)$$

โดยที่  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$  และเรียกว่า ความถี่ธรรมชาติของค่าแดมป์ สำหรับอินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{S(S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2)} \quad (2.38)$$

นำสมการ (2.38) มาทำการแปลงกลับลาปลาซ จะได้

$$\begin{aligned} C(t) &= 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left( \cos \omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \omega_d t \right) \\ &= 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \left( \omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right); t \geq 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

จากสมการ (2.39) จะเห็นว่าความถี่ของการแกว่งชั่วคราวของระบบก็คือ  $\omega_d$  และแปรค่าตามอัตราส่วน  $\zeta$  ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบนี้คือ

$$\begin{aligned} e(t) &= r(t) - c(t) \\ &= e^{-\zeta\omega_n t} \left( \cos \omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \omega_d t \right); t \geq 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนเป็นรูปการแกว่งที่มีการหน่วง ที่ภาวะคงที่  $t = \infty$  นั้นค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเป็นศูนย์ ถ้า  $\zeta$  มีค่าเท่ากับศูนย์ผลตอบสนองของระบบจะเป็นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันเดอร์แดมป์ คือเกิดการแกว่งต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ไม่สิ้นสุดเอาต์พุต  $c(t)$  ในกรณีที่  $\zeta = 0$  หาได้จากสมการ (2.39) นั่นคือ

$$c(t) = 1 - \cos \omega_n t \quad ; t \geq 0 \quad (2.41)$$

นั่นก็คือถ้า  $\zeta$  มีค่าเท่ากับศูนย์  $\omega_n$  จะเป็นความถี่ของการแกว่งของระบบ อย่างไรก็ตามถ้าอัตราการหน่วงของระบบไม่เท่ากับศูนย์ ค่าของ  $\omega_n$  จะไม่สามารถสังเกตได้จากการทดลอง จะสังเกตได้แต่  $\omega_d$  ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า  $\omega_n$  เสมอ

### 2. กรณีครีทิกอลแดมป์ ( $\zeta = 1$ )

ในกรณีนี้ขั้วจริงปิด จะมีค่าเท่ากัน สำหรับอินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป เอาต์พุตคือ

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{S(S + \omega_n)^2} \quad (2.42)$$

และ

$$C(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t); t \geq 0 \quad (2.43)$$

จากสมการ (2.43) จะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป ในกรณีที่  $\zeta = 1$  นั้นไม่มีการแกว่ง

### 3. กรณีโอเวอร์แดมป์ ( $\zeta > 1$ )

ในกรณีนี้ขั้วจริงปิดทั้งสองตัวจะเป็นค่าจริงที่เป็นลบและไม่เท่ากันเอาต์พุต  $C(s)$  เมื่ออินพุตเป็นยูนิตสเต็ป ในกรณีนี้คือ

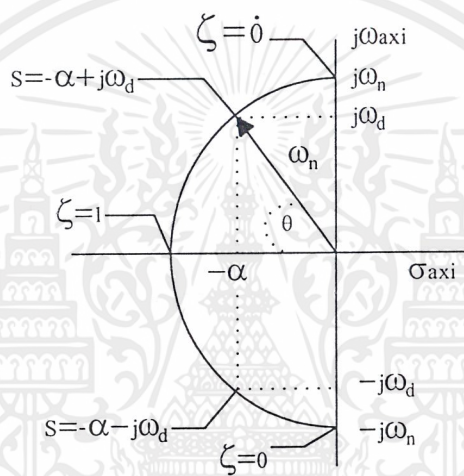
$$C(s) = -\frac{\omega_n^2}{S(S + \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})(S + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})} \quad (2.44)$$

$$C(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left( \frac{e^{-S_1 t}}{S_1} - \frac{e^{-S_2 t}}{S_2} \right) ; t \geq 0 \quad (2.45)$$

โดยที่  $S_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$  และ  $S_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป ในกรณีนี้จะประกอบไปด้วยเทอมเอ็กโปเนนเชียล ที่มีกำลังเป็นลบสองเทอมและการลดลงของเอ็กโปเนนเชียลอันดับหนึ่ง ต้องลดลงเร็วกว่าอีกอันหนึ่ง ดังนั้นเทอมของเอ็กโปเนนเชียลที่ลดค่าลงเร็ว (ซึ่งหมายถึงช่วงเวลาคงที่ของเทอมนั้นมีค่าน้อย) อาจจะถูกตัดทิ้งได้ นั่นคือถ้าสมมติให้  $S_2$  อยู่ใกล้กับแกน  $j\omega$  ในระนาบ  $S$  มากกว่า  $S_1$  แล้ว คำตอบโดยประมาณของสมการ (2.45) นั้นสามารถตัดเทอมที่มี  $S_1$  ออกไปได้ ทั้งนี้เพราะเทอมที่ประกอบด้วย  $S_1$  จะมีผลตอบสนองของระบบน้อย และผลตอบสนองในกรณีนี้จะคล้ายกับผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง



รูปที่ 2.25 ตำแหน่งของโพลบนระนาบ  $S$

สรุปได้ว่า

1. ถ้า  $\zeta > 1$ , โพลทั้งสองจะเป็นจำนวนจริง (โอเวอร์แดมพ์)
2. ถ้า  $\zeta = 1$ , โพลทั้งสองจะเท่ากันและเป็นจำนวนจริงลบ (ครีทีคอนแดมพ์)
3. ถ้า  $0 < \zeta < 1$  โพลจะเป็นคอมเพล็กซ์คอนจูเกต โดยส่วนที่เป็นจริงจะลบ (อันเดอร์แดมพ์)
4. ถ้า  $\zeta = 0$  โพลจะเป็นจินตภาพและเป็นคอมเพล็กซ์คอนจูเกต (การแกว่ง)
5. ถ้า  $\zeta < 0$  โพลจะอยู่ทางด้านขวาของระนาบ  $S$  (เน็คกาทีฟแดมพ์)

## 2.4.2 นิยามของลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผลตอบสนองชั่วคราว

ในทางปฏิบัติแล้ว สมรรถนะของระบบควบคุมจะแสดงในเทอมของปริมาณต่าง ๆ ในโดเมนเวลา และส่วนมากแล้วเราจะวิเคราะห์สมรรถนะของระบบควบคุมนี้จากผลตอบสนองชั่วคราวของระบบต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป โดยพิจารณาถึงลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ต่อไปนี้

1. ช่วงเวลา  $t_d$  (Delay Time) เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบมีค่าเข้าสู่ 50 % ของค่าที่ภาวะคงที่
2. ช่วงเวลา  $t_r$  (Rise Time) เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบมีค่าขึ้นจาก 10 % ไปถึง 90 % ของค่าที่ภาวะคงที่ ในบางครั้งอาจจะถือว่าช่วงเวลา  $t_r$  เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองมีค่าจาก 10 % - 90 % หรือ 5 % - 95 % หรือ 0 - 100 % ของค่าที่ภาวะคงที่ก็ได้
3. ช่วงเวลา  $t_p$  (Peak Time) เป็นค่าของเวลาที่ผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป เกิดโอเวอร์ชูตสูงสุดเป็นครั้งแรก
4. ค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด  $M_p$  : ค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด  $M_p$  ซึ่งในบางครั้งนิยมแสดงในเทอมของเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูต เป็นค่าแตกต่างสูงสุดระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ถ้าผลตอบสนองของระบบมีค่าที่ภาวะคงที่ไม่เท่ากับหนึ่งแล้ว เราได้ว่า

$$\text{เปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูตสูงสุด} = \frac{C(t_p) - C(\infty)}{C(\infty)} \times 100\% \quad (2.46)$$

ค่าของโอเวอร์ชูตสูงสุดนี้จะแสดงถึงเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบ

5. ช่วงเวลา  $t_s$  (Setting time) เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป มีค่าเข้าสู่ช่วง 2 % หรือ 5 % ของค่าที่ภาวะคงที่และมีค่าอยู่ในช่วงนี้ตลอด

อย่างไรก็ตามลักษณะเฉพาะต่าง ๆ เหล่านี้อาจจะไม่สามารถนำไปใช้ในทุกระบบได้ เช่น ระบบที่เป็นแบบโอเวอร์แดมพ์นั้น เราไม่สามารถหาค่าของ  $t_p$  และ  $M_p$  ได้เป็นต้น นอกจากนี้ลักษณะเฉพาะเหล่านี้จะใช้กับระบบที่เสถียรเท่านั้น เพราะระบบที่ไม่เสถียรนั้นผลตอบสนองของระบบจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ และควบคุมไม่ได้ ทั้งนี้ค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาต้องขึ้นอยู่กับค่าของ  $\zeta$  อัตราส่วนแดมพ์และค่าของความถี่ธรรมชาติ

### 2.4.3 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบอันดับสอง

สำหรับอินพุต  $r(t)$  ที่เป็นยูนิตอิมพัลส์,  $R(s)$  จะเท่ากับ 1 ดังนั้นเอาต์พุต  $C(s)$  ของระบบอันดับสอง คือ

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.47)$$

สำหรับ  $0 \leq \zeta < 1$ :

$$C(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_n t \sqrt{1-\zeta^2}; \quad t \geq 0 \quad (2.48)$$

สำหรับ  $\zeta = 1$

$$C(t) = \omega_n^2 t e^{-\omega_n t}; \quad t \geq 0 \quad (2.49)$$

สำหรับ  $\zeta > 1$

$$C(t) = \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2-1}} e^{-(\zeta-\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} - \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2-1}} e^{-(\zeta+\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t}; \quad t \geq 0 \quad (2.50)$$

ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็นยูนิตอิมพัลส์ จากสมการ (2.48) และสมการ (2.49) สำหรับต่าง ๆ ของ  $\zeta$  ในกรณีของครีติกอลแดมป์ และกรณีโอเวอร์แดมป์นั้น ผลตอบสนองจะมีค่าเป็นบวกหรือศูนย์เท่านั้น นั่นคือ  $c(t) \geq 0$ , สำหรับกรณีของอันเดอร์แดมป์ ผลตอบสนอง  $c(t)$  จะมีค่าเป็นทั้งบวกและลบ เราจึงอาจสรุปได้ว่าถ้าผลตอบสนองอิมพัลส์  $c(t)$  มีค่าเป็นบวกอย่างเดียวแล้ว ระบบนั้นจะเป็นแบบครีติกอลแดมป์ หรือโอเวอร์แดมป์ เท่านั้นซึ่งหมายถึงว่าผลตอบสนองของระบบนี้ต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ปก็จะมีโอเวอร์ชูตเช่นกัน

ค่าโอเวอร์ชูตสูงสุดของผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็นยูนิตอิมพัลส์ ในกรณีที่ระบบเป็นแบบอันเดอร์แดมป์จะเกิดขึ้นที่

$$t = \frac{\tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} ; 0 \leq \zeta < 1 \quad (2.51)$$

และค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด คือ

$$C(t)|_{\max} = \omega_n \exp \left[ \frac{-\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right] ; \quad (2.52)$$

$$0 \leq \zeta < 1$$

เนื่องจากผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นยูนิตอิมพัลส์ของระบบอันดับสองเป็นค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับเวลาของผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ปของระบบนั้นเราจึงสามารถหาค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด  $M_p$  ของผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ปได้จากค่าผลตอบสนองของระบบนี้ต่ออินพุตที่เป็นยูนิตอิมพัลส์

พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งของผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็น ยูนิตอิมพัลส์ ที่เริ่มตั้งแต่  $t = 0$  ไปจนถึงเวลาที่ผลตอบสนองนั้นมีค่ากลับเป็นศูนย์ครั้งแรก พื้นที่นี้จะมีค่า  $1 + M_p$  โดยที่  $M_p$  เป็นค่าของค่าโอเวอร์ชูตสูงสุดของผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นยูนิตสเต็ป

$$\begin{aligned} \text{ในสมการ} & \quad M_p = e^{-(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})\pi} & (2.53) \\ \text{ตัดกับแกนเวลา} & \quad t = \frac{n\pi}{\omega_d} \end{aligned}$$

#### 2.4.4 ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น(Unit Ramp)

ผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบอันดับสอง ต่ออินพุตที่เป็นยูนิตแรมปีสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้คือ

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{s^2} \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีอันเดอร์แดมป์,  $0 \leq \zeta < 1$

$$\begin{aligned} C(t) &= t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + e^{-\zeta\omega_n t} \left( \frac{2\zeta}{\omega_n} \cos \omega_d t + \frac{(2\zeta^2 - 1)}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \omega_d t \right) \\ &= t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \left( \omega_d t + \tan^{-1} \frac{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}{2\zeta^2 - 1} \right) \quad ; t \geq 0 \quad (2.55) \end{aligned}$$

โดยที่

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.56)$$

และ

$$\tan^{-1} \frac{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}{2\zeta^2 - 1} = 2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \quad (2.57)$$

สำหรับกรณีของครีติกอนแดมป์,  $\zeta = 1$

$$C(t) = t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + \frac{2}{\omega_n} e^{-\zeta\omega_n t} \left( 1 + \frac{\omega_n t}{2} \right) ; t \geq 0 \quad (2.58)$$

สำหรับกรณีของโอเวอร์แดมป์,  $\zeta > 1$

$$\begin{aligned} C(t) &= t - \frac{2\zeta}{\omega_n} - \frac{2\zeta^2 - 1 - 2\zeta\sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \\ &\quad + \frac{2\zeta^2 - 1 + 2\zeta\sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} ; t \geq 0 \quad (2.59) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นถ้าต้องการให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่ของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น  
 ยูนิตแรมป์ มีค่าน้อย ๆ แล้ว  $\zeta$  ต้องมีค่าน้อยและ  $\omega_n$  ต้องมีค่ามากเพียงพอหรือโดยการทำให้  
 อัตราขยาย  $K$  มีค่ามาก ๆ สำหรับค่าต่าง ๆ ของอัตราขยาย  $K$

## 2.5 คุณสมบัติของออปแอมป์

ออปแอมป์ คืออุปกรณ์ชนิดหนึ่งซึ่งถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานได้หลายรูปแบบและ  
 ยังเน้นความสะดวกในการนำไปใช้งานอีกด้วย โดยสามารถประกอบเป็นวงจรได้โดยการต่อร่วม  
 กับอุปกรณ์ภายนอกเพียงไม่กี่ตัวเท่านั้น ในอดีตออปแอมป์จะประกอบขึ้นจากอุปกรณ์หลายตัวที่นำ  
 มาบรรจุไว้ในภาชนะชิ้นเดียวกัน ซึ่งนอกจากจะทำให้ออปแอมป์มีขนาดใหญ่แล้ว ยังอาจมี  
 ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำด้วย แต่ปัจจุบันเราสามารถซื้อออปแอมป์ในรูปแบบของวงจรรวม (IC) ได้ตาม  
 ท้องตลาดและจากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ดีได้พัฒนาขึ้นทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันอย่าง  
 แพร่หลาย

โดยทั่วไปแล้วเราสามารถกล่าวได้ว่าไอซีออปแอมป์คือ อุปกรณ์โซลิตสเททเทคนิคหนึ่ง  
 สามารถวัดระดับสัญญาณไฟตรงและไฟสลับได้และยังสามารถนำไปใช้ขยายสัญญาณได้อีกด้วย  
 ไอซีออปแอมป์พื้นฐานจะต้องประกอบด้วยวงจรรายในภาคต่าง ๆ ดังนี้

1. ดิฟเฟอเรนเชียลออปแอมป์ หรือ วงจรขยายผลต่าง ๆ ที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมาก
2. วงจรขยายแรงดันซึ่งมีอัตราขยายสูงมาก
3. วงจรขยายภาคเอาต์พุตที่มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำมาก

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่กล่าวมาทำให้เราสามารถสรุปคุณสมบัติที่สำคัญ  
 บางประการของออปแอมป์ในอุดมคติ ดังนี้

1. เนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าสูงเป็นอนันต์กระแสเข้าที่อินพุตจะต่ำ  
 จนเกือบเท่าศูนย์หรืออีกนัยหนึ่ง ไม่มีกระแสอินพุตเข้าไปสู่ออปแอมป์เลย
2. อัตราขยายขณะวงจรเปิด (ขณะที่ยังไม่มีกร็อนกลับ) จะมีค่าสูงมาก ซึ่งหมายความว่า  
 แรงดันระหว่างขั้วอินพุตควรมีค่าใกล้เคียงศูนย์ (เนื่องจาก  $\frac{V_{out}}{A} = V_{in}$ )
3. เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำมากจนไม่ทำตัวเป็น โหลดต่อภาคเอาต์พุตของวงจขยาย

## 2.5.1 คุณสมบัติและพารามิเตอร์บางชนิดของออปแอมป์

### 1. อินพุตอิมพีแดนซ์

ในทางอุดมคติควรมีค่าเท่ากับอนันต์ แต่ในความเป็นจริง อินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าประมาณ 1 เมกะโอห์ม ( $1 \times 10^6$  โอห์ม) ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์นี้ยังมีค่ามากขึ้นเท่าใด ออปแอมป์ตัวนั้นก็ทำงานได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำออปแอมป์ไปใช้งานในย่านความถี่สูง ควรระวังผลจากอินพุตคาปาซิแตนซ์ของวงจรด้วย ซึ่งมักมีค่าประมาณ 2 พิโคฟารัด ( $2 \times 10^{12}$  ฟารัด) เมื่อขั้วอินพุตขั้วหนึ่งต่อกับกราวด์

### 2. เอาต์พุตอิมพีแดนซ์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์ แต่ในความเป็นจริง ค่านี้อาจมีได้ตั้งแต่ 25 ถึงหลายพันโอห์มขึ้นไป แต่อย่างไรก็ตาม เรามักสมมุติให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ในวงจรมีค่าเป็นศูนย์เพื่อง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงและมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ ออปแอมป์จึงเปรียบเสมือนเป็นอุปกรณ์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอิมพีแดนซ์เมทซิงที่คิดตัวหนึ่ง

### 3. กระแสไบอัสด้านอินพุต

เนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์ไม่เป็นอนันต์ ดังนั้น จึงมีกระแสค่าน้อยๆ (มีหน่วยเป็น นาโน ( $10^{-9}$ ) ถึง ไมโคร ( $10^{-6}$ ) แอมแปร์) ไหลผ่านขั้วอินพุตทั้งสอง ซึ่งค่าเฉลี่ยของกระแสดังกล่าวถูกเรียกว่าเป็น “กระแสไบอัสด้านอินพุต” กระแสจะก่อให้เกิดความไม่สมดุลในวงจรภายใน ซึ่งจะเป็ผลกระทบท่ออากาศเอาต์พุตด้วย ดังนั้นกระแสเหล่านี้ควรถูกจำกัดให้มีค่าต่ำสุด (อาจทำได้โดยการใช้ออปแอมป์ที่มีอินพุตเป็น FET)

### 4. แรงดันออฟเซต (Offset) ที่เอาต์พุต

แรงดันออฟเซตที่เอาต์พุตเกิดขึ้นจากกระแสไบอัสด้านอินพุต ซึ่งในทางอุดมคติ เมื่อแรงดันอินพุตระหว่างขั้วทั้งสองมีค่าเท่ากัน แรงดันที่เอาต์พุตควรเป็นศูนย์ แต่โดยทั่วไปมักไม่เป็นเช่นนั้น คือ มักมีแรงดันค่าหนึ่งปรากฏที่เอาต์พุตขณะที่อินพุตเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแก้ไขได้โดยการป้อนแรงดัน หรือกระแสออฟเซตที่อินพุตแล้วปรับจนได้  $V_{out} = 0$  โวลต์

### 5. กระแสออฟเซตที่อินพุต

ในการปรับแรงดันออฟเซตที่เอาต์พุตให้มีค่าเป็นศูนย์ กระแสอินพุตทั้งสองขั้วควรมีค่าเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่า เราต้องจ่ายกระแสให้แก่อินพุตขั้วหนึ่งมากกว่าอินพุตอีกขั้วหนึ่งเสมอเพื่อทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งกระแสออฟเซตนี้อาจมีค่าประมาณ 20 มิลลิแอมป์

## 6. แรงดันออฟเซตที่อินพุต

ในอุดมคติ แรงดันเอาต์พุตจะเท่ากับศูนย์ก็ต่อเมื่อแรงดันระหว่างขั้วอินพุตมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน แต่ในทางปฏิบัติ ความไม่สมดุลภายในวงจร มักทำให้เราต้องป้อนแรงดันค่าหนึ่งแก่อินพุตใด ๆ เสมอ เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์

## 7. ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่ออุปกรณ์โซลิตสเตรททุกชนิดรวมทั้งออปแอมป์ ดังนั้นผลกระทบจากอุณหภูมิจะทำให้กระแสและแรงดันออฟเซตเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเราเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงคั่นเกิดจากอุณหภูมิ “คริปต์” ในขณะที่ทำงาน ควรตรวจสอบด้วยว่าออปแอมป์จะมีเปอร์เซ็นต์การผิดพลาดมากน้อยเพียงไร หากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

## 8. การชดเชยความถี่

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับออปแอมป์ที่ใช้ในย่านความถี่สูงก็คือการแกว่งซึ่งเกิดจากอัตราขยายที่มีค่าค่อนข้างสูงของออปแอมป์เอง และยังเกิดจากการเปลี่ยนเฟส ณ จุดต่าง ๆ ภายในวงจรเป็นผลให้เราไม่สามารถควบคุมอัตราขยายของสัญญาณป้อนกลับได้ วิธีแก้ปัญหาก็คือต่อตัวเก็บประจุชดเชยให้แก่วงจร ซึ่งจะทำให้อัตราขยายของออปแอมป์มีขนาดลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

## 9. อัตราสโลว์ (Slow Rate)

อัตราสโลว์ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตเทียบกับเวลาดังสมการ

$$\text{อัตราสโลว์} = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงสูงสุดของแรงดันเอาต์พุต}}{\text{การเปลี่ยนแปลงเวลา}}$$

$$= \frac{V_{\text{out}}(\text{max})}{t} \quad (2.60)$$

## 10. การตอบสนองต่อความถี่

อัตราขยายออปแอมป์จะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น จะพบว่าอัตราขยายที่ผู้ผลิตแสดงไว้ในคู่มือจะเป็นอัตราขยายที่ความถี่ 0 Hz หรือไฟฟ้ากระแสตรงตรง (ซึ่งแสดงให้เห็นความถี่สูงสุดของออปแอมป์) ในการทำงานแบบวงจรมีเปิด จะเห็นได้ว่าวงจรมีเสถียรภาพต่ำมาก นั่นคือเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นสิบเท่า อัตราขยายจะลดลง 10 เท่าทันที

### 11. อัตราการลดสัญญาณชนิดคอมมอนโหมด (CMRR)

เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของออปแอมป์ที่ได้มาจากภาคอินพุตที่เป็นดิฟเฟอเรนเชียลแอมป์ หมายความว่า หากสัญญาณที่เข้ามายังขั้วอินพุตทั้งสองมีเฟสตรงกันและยังมีขนาดเท่ากัน (สัญญาณแบบนี้เรียกว่าอยู่ในคอมมอนโหมด) สัญญาณทั้งสองนี้จะถูกกำจัดทิ้งไป ดังนั้นเอาต์พุตจะเป็นศูนย์ ส่วนสัญญาณที่มีขนาดต่างกันและมีเฟสต่างกันจะเรียกว่าอยู่ในดิฟเฟอเรนเชียลโหมด

### 12. ค่าใช้งานต่าง ๆ ที่ควรเข้าใจ

การนำไอซีออปแอมป์ไปใช้งาน ผู้ใช้ควรศึกษาค่าดัชนีของบริษัทผู้ผลิตให้ละเอียดเสียก่อน เพื่อป้องกันออปแอมป์ชำรุดหรือเสียหาย ค่าต่าง ๆ ที่ควรรู้ได้แก่

- ก) แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง  $\pm V$
- ข) กำลังที่สูญเสียในตัวไอซี ซึ่งแสดงกำลังสูงสุดที่อุปกรณ์ สามารถปลดปล่อยออกมาโดยที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปจนทำให้ไอซีพัง
- ค) แรงดันสูงระหว่างขั้วอินพุตดิฟเฟอเรนเชียลแอมป์อินพุต
- ง) แรงดันสูงสุดที่อินพุตแต่ละขั้วอินพุต
- จ) ความสามารถในการทนทานภาวะลัดวงจรที่เอาต์พุต
- ฉ) อุณหภูมิที่ใช้งาน
- ช) อุณหภูมิที่ใช้เก็บอุปกรณ์
- ฎ) อุณหภูมิของขาอุปกรณ์ แสดงอุณหภูมิที่ไอซีสามารถทนได้ในขณะที่ถูกบัดกรี

### 13. การป้องกันภาคอินพุต

เช่นเดียวกับอุปกรณ์โซลิตสเตทชนิดอื่นออปแอมป์ก็มีค่าจำกัดสำหรับภาคอินพุตเช่นกัน ซึ่งหมายถึงทั้งอินพุตแบบดิฟเฟอเรนเชียลและแบบคอมมอนโหมด จากการศึกษาวงจรภายในออปแอมป์ขั้วอินพุตจะทำตัวเสมือนมิชเนอรัไดโอดสองตัวกลับหัวกัน ดังนั้นแรงดันที่ขั้วอินพุตทั้งสองจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ (ตามคุณสมบัติของมิชเนอรัไดโอด) จนกระทั่งมีแรงดันพังทลายมิชเนอรัไดโอดทั้งสองจะเสมือนตัวต้านทานที่ต่ำมาก เป็นผลให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านออปแอมป์และกระแสนี้จะทำให้ทรานซิสเตอร์ภายในออปแอมป์เสียหาย

### 14. วงจรป้องกันภาคเอาต์พุต

ปัจจุบันออปแอมป์เกือบทุกเบอร์จะถูกออกแบบให้มีวงจรป้องกันภาคเอาต์พุตอยู่แล้ว แต่ในกรณีที่ออปแอมป์ที่เราใช้อยู่ไม่มีภาคป้องกันเอาต์พุตควรนำตัวต้านทานมาต่อเพื่อป้องกันเอาต์พุตถูกลัดวงจร ซึ่งหากใช้ตัวต้านทานค่าต่ำ ๆ ตัวต้านทานจะไม่มีผลร้ายแรงต่อสัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับมากนัก

ปัญหาอีกข้อหนึ่งที่มีมักเกิดขึ้นกับวงจรตามแรงดันคือ การที่แรงดันเอาต์พุตถูกตรึงหรือ แลท็อพซึ่งมักเริ่มจากสัญญาณอินพุตที่มีการสวิงสูงกว่าระดับของแรงดัน ไบอัส ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเกินแรงดันอิมิตัว ซึ่งจะทำการป้อนเปลี่ยนจากลบเป็นบวกด้วยตัวเองผลคือขนาดของแรงดันเอาต์พุตจะถูกล็อกไว้ที่ระดับนี้แม้ว่าอินพุตจะลดลงก็ตาม ฉะนั้นในการทดลองใด ๆ ควรคำนวณระดับการสวิงสูงสุดของเอาต์พุตให้ดี โดยเฉพาะกับวงจรตามแรงดัน

#### 15. วงจรป้องกันขั้วที่ต่อไฟเลี้ยง

ออปแอมป์ทุกตัวที่ผลิตขึ้นจะสามารถทนแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงได้ไม่เท่ากันดังนั้นเมื่อนำออปแอมป์มาใช้งาน ควรศึกษาคุณสมบัติดังกล่าวอย่างละเอียดหาไม่แล้วการต่อขั้วจ่ายไฟผิดหรือการป้องกันแรงดันเกินค่าที่กำหนดเพียงชั่วคราวก็จะทำให้อุปกรณ์นั้นเสียหายทันที

#### 16. การเพิ่มเสถียรภาพให้แก่วงจร

การเพิ่มเสถียรภาพให้แก่วงจรขยายชนิดที่มีการป้อนกลับ หมายถึง การป้องกันไม่ให้วงจร ออสซิลเลท (เพิ่มขึ้นจนเราควบคุมไม่ได้) วงจรจะต้องมีอัตราขยายตามที่ถูกรอกแบบมาและต้องสามารถลดสัญญาณลบกววนออกไปให้ได้มากที่สุด การเพิ่มเสถียรภาพดังกล่าวอาจทำได้โดยการ ออกแบบวงจรหรือการวางอุปกรณ์แต่ละชนิดในตำแหน่งที่เหมาะสม การต่ออุปกรณ์ต่างโดยใช้ สายไฟตัวนำขนาดสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ และการลดอิมพีแดนซ์ของกราวด์ร่วมให้เหลือน้อยที่สุด

นอกจากวิธีดังกล่าวการทำให้แหล่งจ่ายมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่สามารถเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ระบบได้ ซึ่งทำได้โดยการดีคัปปลิงสัญญาณรบกวน ตัวเก็บประจุควรใช้เป็นชนิดแทนทาลัมและมีขนาด 1 ไมโครฟารัด

### 2.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงของออปแอมป์ ไบอัสออฟเซตและดริฟต์

ในปัจจุบันออปแอมป์ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในวงจรขยาย เพื่อขยายสัญญาณ ทั้งแรงดันที่เป็นไฟกระแสตรงและกระแสสลับ หรือนำมาทำเป็นวงจรรวมสัญญาณ สำหรับวงจรขยายสัญญาณไฟกระแสตรงเท่านั้น คุณสมบัติบางอย่างของตัวออปแอมป์จะเป็นตัวจำกัดขอบเขตในการนำไปใช้งาน ถ้านำเอาไปใช้งานเกินขอบเขตของตัวมันเองแล้วก็จะทำให้เกิดผลการทำงานที่ผิดพลาด ในทางทฤษฎีนั้นแรงดันเอาต์พุตจะต้องเกิดจากค่าศักดาของสัญญาณอินพุตคูณกับค่าอัตราขยายแรงดันวงจรปิด เท่านั้นแต่ในทางปฏิบัติค่าแรงดันเอาต์พุตจะต้องรวมเอาผลของค่าความผิดพลาดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ไว้ด้วย

$$V_0 = A_{OL} \times V_{in} \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการนำเอาออปแอมป์ไปใช้งานนั้น ถ้าค่าแรงดันของเอาต์พุตที่ควรจะเป็นมีค่ามากกว่า ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ตัวออปแอมป์มาก ๆ ก็มักจะไม่นำถึงผลในส่วนของความผิดพลาดนั้น แต่อย่างไรก็ตามในบางครั้งผลของความผิดพลาดก็มีมากจนเกินกว่าที่จะยอมรับได้ ดังนั้นจึงเป็น สิ่งจำเป็นอย่างยั้งที่จะได้ศึกษาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เป็นข้อจำกัดของตัวออปแอมป์เมื่อนำมาใช้งาน จริง ๆ เนื่องจากไม่มีออปแอมป์ตัวใดที่มีคุณสมบัติตรงตามคุณสมบัติในอุดมคติได้

ข้อจำกัดของออปแอมป์ที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดแก่งจรในส่วนที่เป็นแรงดันไฟกระแสตรง ได้แก่

1. กระแสอินพุตไบอัส
2. กระแสอินพุตออฟเซต
3. แรงดันอินพุตออฟเซต
4. ครีพต์ (Drift)

และในกรณีที่น่าเอาออปแอมป์ไปใช้งานในวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีการ ชัดไฟกระแสตรงออกไปโดยการใช้ตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรม ดังนั้นทำให้ผลของข้อจำกัดทั้ง 4 ข้อ ที่ทำให้เกิดการผิดพลาดที่แรงดันเอาต์พุตนั้นลดลงจนมีผลน้อยมากต่อวงจร แต่อย่างไรก็ตามจะเกิด ปัญหาอื่นซึ่งจะมีผลกรณิของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้นคือ

5. ผลตอบสนองทางความถี่
6. อัตราการสลัวร์

### 1. ผลตอบสนองทางความถี่

หมายถึง ความสัมพันธ์ของอัตราขยายแรงดันที่เปลี่ยนไปตามความถี่ปกติจะแสดงข้อมูลนี้ โดยวาดเป็นกราฟระหว่างอัตราขยายแรงดันเมื่อเทียบกับความถี่ซึ่งผู้ผลิตจะให้ข้อมูลส่วนนี้ไว้ เสมอซึ่งจากกราฟชนิดนี้จะทำให้ผู้ใช้ทราบได้ทันทีว่าช่วงความถี่ที่จะนำออปแอมป์ชนิดนี้มา ใช้งานนั้นอยู่ในช่วงใด มีคุณสมบัติตอบสนองเป็นอย่างไร

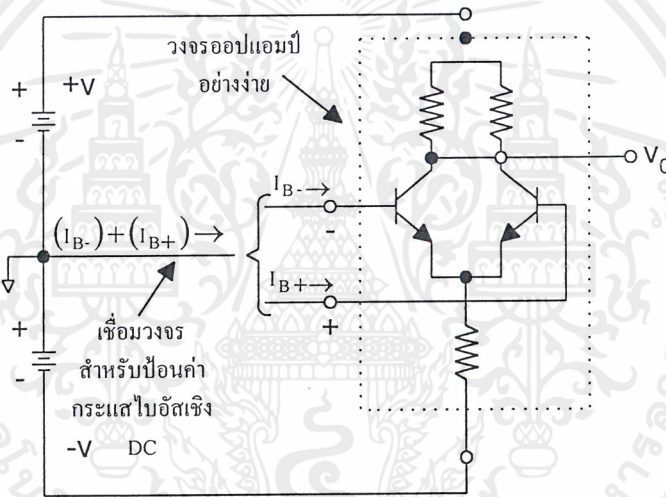
จะเห็นว่าออปแอมป์ทุกตัวนั้น ไม่สามารถใช้งานตลอดทุกช่วงของความถี่ได้ เมื่อผู้ใช้เลือก ความถี่ที่จะใช้งานได้แล้ว ต่อไปก็พิจารณาถึงปัญหาอีกข้อหนึ่งที่จะพบคือ ความเร็วในการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตเมื่อเทียบกับอินพุต หมายถึงว่าเมื่อมีสัญญาณอินพุตใด ๆ ป้อนให้แก่วงจร แล้วจะเกิดการตอบสนองที่เอาต์พุตได้รวดเร็วเพียงใด ออปแอมป์ทุกตัวต้องอาศัยเวลาช่วงหนึ่ง ก่อนที่เอาต์พุตจะเปลี่ยนไปตามอินพุตได้ คุณสมบัติข้อนี้เราเรียกว่า “ อัตราการสลัวร์ ”

### 2. กระแสอินพุตไบอัส

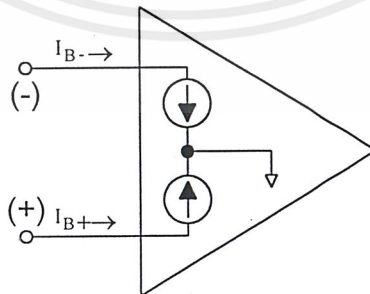
กระแสอินพุตไบอัส หมายถึงกระแสที่ออปแอมป์ดึงมาจากขาอินพุตทั้งสองข้างสมมุติว่า ออปแอมป์ที่ใช้มีคุณสมบัติในเชิงอุดมคติคือกระแสเข้าอินพุตทั้งสองข้างมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในความเป็นจริงแล้วเป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงไม่เป็นเช่นนั้น ออปแอมป์จะทำงานได้ต้องมีกระแสไฟตรง คงที่ค่าหนึ่งไหลเข้าที่ขาอินพุตซึ่ง เป็นปริมาณที่ไม่มากนักจากความรู้ในเรื่องทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์จะทำงานได้ต้องมีการ ไบอัสที่ถูกต้องออปแอมป์ก็เช่นกันภายในมีลักษณะเป็นทรานซิสเตอร์หลายตัวต่อรวมกัน

รูปที่ 2.26 (ก) แสดงวงจรภายในภาคอินพุตของตัวออปแอมป์แบบง่าย ๆ จากรูปประกอบ ด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อแบบคอมมอนอิมิตเตอร์ที่ขาอิมิตเตอร์ทั้งสองของทรานซิสเตอร์ จะต่อชื้อตกัน เราเรียกววงจรที่ต่อกันในลักษณะนี้ว่าดิฟเฟอเรนเชียลแอมพลิไฟเออร์ ทรานซิสเตอร์ ทั้ง 2 ตัวทำงานได้ก็ต่อเมื่อขาเบสของทั้ง 2 ตัวมีกระแสไบอัสให้กับมันด้วยค่ากระแสค่าหนึ่งโดย กระแสไบอัสทั้ง 2 ตัวนี้ไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากันย่อมมีคุณสมบัติแตกต่างกัน รูปที่ 2.26 (ข) แสดง แบบจำลองของการไบอัสด้วยกระแสแก่ตัวออปแอมป์



(ก) แสดงสาเหตุและภายในภาคอินพุตของตัวออปแอมป์แบบง่าย



(ข) แสดงแบบจำลองของการไบอัสด้วยกระแสแก่ตัวออปแอมป์

### รูปที่ 2.26 แสดงสาเหตุและแบบจำลองของการเกิดกระแสอินพุตไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอินพุตไบอัสที่ขาลบ (-) สมมุติให้เป็น  $I_{B-}$  โดยปกติทั่วไปจะมีค่าไม่เท่ากับกระแสอินพุตไบอัสที่ขาบวก (+) ซึ่งแทนด้วย  $I_{B+}$  ทางบริษัทผู้ผลิตมักบอกค่ากระแสไบอัสเป็นค่าเฉลี่ย  $I_B$  ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้คิดได้จากขนาดของกระแส  $I_{B-}$  และ  $I_{B+}$  รวมกันแล้วหารด้วยสอง

### 3. กระแสอินพุตออฟเซต

จากในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวแล้วว่ากระแสอินพุตไบอัสที่ขาบวกและขาลบของออปแอมป์มักมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากยังไม่มีผู้ผลิตรายใดที่สามารถผลิตทรานซิสเตอร์สองตัวให้มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองตัวนี้เรียกว่า กระแสอินพุตออฟเซตแทนได้ด้วย  $I_{Os}$

ผู้ผลิตมักจะบอกค่า  $I_{Os}$  มาให้โดยค่านี้ผู้ผลิตกำหนดไว้ที่สภาวะแรงดันเอาต์พุตเป็น 0 โวลต์ วัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยปกติค่า  $I_{Os}$  จะมีค่าน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ของ  $I_B$

## 2.5.3 ผลของกระแสไบอัสที่มีต่อแรงดันเอาต์พุต

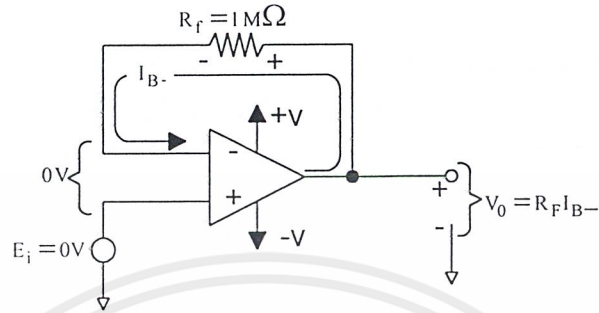
### 1. ผลของกระแสอินพุตไบอัสที่ขาลบ

รูปที่ 2.27 (ก) เป็นตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่ากระแสอินพุตไบอัสที่ขาลบมีผลต่อวงจรจากรูปถั้ออปแอมป์ที่ใช้มีคุณสมบัติเป็นไปตามอุดมคติ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตต้องมีค่าเป็นศูนย์โวลต์ เนื่องจากไม่มีกระแสอินพุตไหลผ่านเข้าที่ขาอินพุตทั้งสองข้างดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลผ่าน  $R_f$  หมายถึงแรงดันอินพุตเท่ากับที่จุดเอาต์พุต แต่ในทางปฏิบัติจริงจะมีกระแส  $I_{B-}$  ค่าหนึ่งที่ไหลผ่าน  $R_f$  ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $V_{R_f}$  กระแส  $I_{B-}$  นี้ได้มาจากตำแหน่งเอาต์พุตเกิดการป้อนกลับแบบลบถึงตอนนี้  $V_o$  จึงไม่ได้มีค่าเป็น 0 โวลต์ ดังที่คิดไว้แต่แรกแต่มีค่าเป็น  $V_o = R_f \times I_{B-}$  สำหรับวงจรนี้  $I_{B+}$  ไม่มีผลต่อวงจรเนื่องจากเป็นการต่อไม่มีตัวต้านทานใด ๆ ต่อระหว่างขาอินพุตบวกกับขาอินพุตโดยตรงดังนั้นจึงไม่เกิดแรงดันตกคร่อมไปทำความผิดพลาดให้แก่วงจร

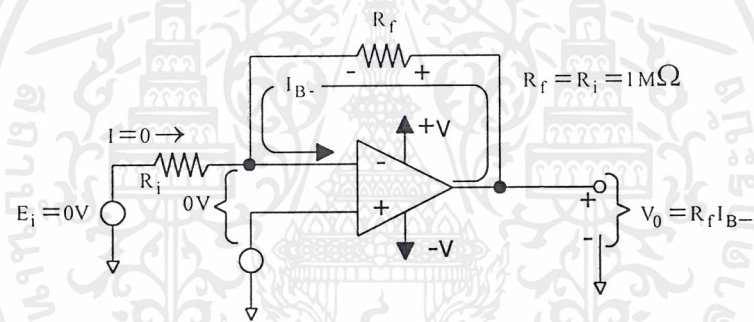
สำหรับวงจรในรูป 2.27 (ข) จะให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ผิดพลาดเท่ากับวงจรในรูปที่ 2.27 (ก) จากวงจรถ้าพิจารณาที่  $R_f$  จะได้ว่าไม่มีกระแสไหลผ่าน  $R_i$  เป็น 0 โวลต์ ดังนั้นกระแสป้อนกลับที่ไหลมาจากทางเอาต์พุตผ่าน  $R_f$  จึงเป็นกระแส  $I_{B-}$  ทั้งหมด

จากวงจรในรูปที่ 2.27 (ข) นั้นถ้านำเอาตัวต้านทานต่อเพิ่มที่ขาอินพุตลบของตัวออปแอมป์จะได้วงจรดังรูปที่ 2.27 (ค) จะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีผลที่ผิดพลาดมากยิ่งขึ้นคือมีกระแส  $I_{B-}$  ไหลผ่าน  $R_M$  เกิดแรงดันขึ้นค่าหนึ่ง และแรงดันนี้ทำให้เกิดกระแสไหลผ่าน  $R_i$  ด้วยดังนั้นกระแสที่

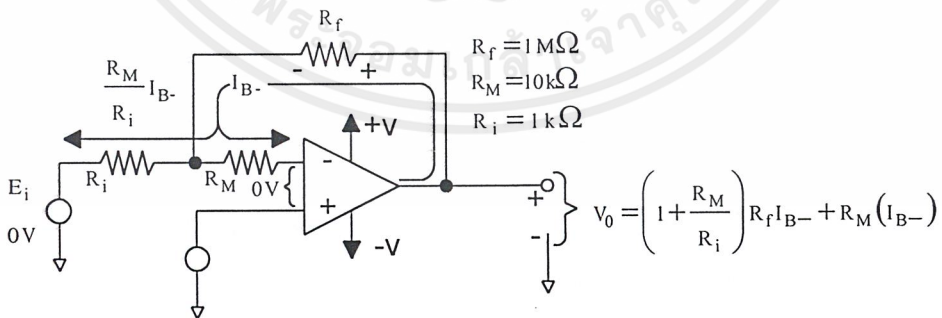
ป้อนกลับจากเอาต์พุตผ่าน  $R_f$  มายังอินพุตจึงไม่ได้เป็น  $I_{B+}$  เท่านั้น แต่ยังรวมถึงกระแสที่แยกไหลไปทาง  $R_i$  ด้วยความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุตจึงมีค่ามากขึ้น



(ก) วงจรตามแรงดันหรือบัพเฟอร์



(ข) วงจรขยายแบบกลับสัญญาณทั่วไป



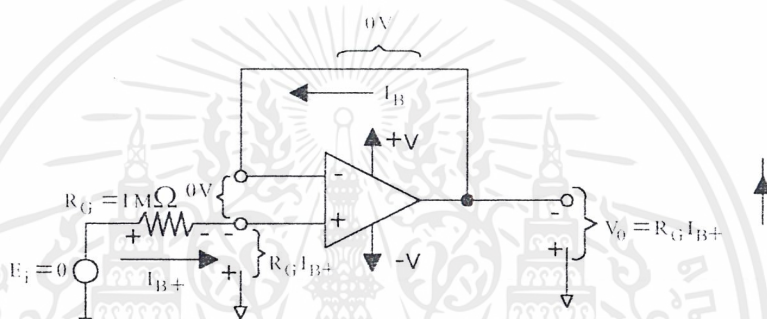
(ค) ผลของการต่อ  $R_M$  เพิ่มเข้าไปจะยิ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดกับค่าแรงดันเอาต์พุตมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 2.27 ผลกระทบของกระแสอินพุตไปอัสที่มีต่อแรงดันเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ผลของกระแสอินพุตไบอัสที่ขาบวก

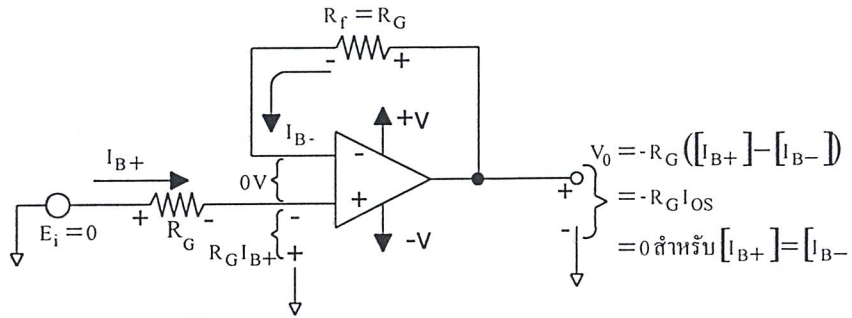
วงจรในรูปที่ 2.28 เป็นตัวอย่างของวงจรที่แสดงให้เห็นว่ากระแสอินพุตไบอัสที่ขาบวกมีผลทำให้วงจรเกิดการดำเนินงานที่ผิดพลาดได้ด้วยเช่นกันจากรูปกำหนดให้  $E_i = 0$  V ดังนั้นถ้าเป็นออปแอมป์ในทางอุดมคติ แรงดันที่เอาต์พุตมีค่าเป็น 0 โวลต์ แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติจะมีกระแส  $I_{B+}$  ไหลผ่าน  $R_i$  ด้วย ดังนั้นทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานขึ้นนี้มีค่าเป็น  $R_G \times I_{B+}$  เราได้กำหนดไว้แล้วว่าแรงดันตกคร่อมระหว่างอินพุตขาลบและขาบวกมีค่าเป็น 0 โวลต์ ดังนั้นแรงดันที่เกิดขึ้นที่อินพุตขาบวกมีค่าเท่ากับแรงดันที่เอาต์พุตมีค่าเป็น  $-R_G \times I_{B+}$



รูปที่ 2.28 ผลกระทบของกระแสอินพุตไบอัสที่ขาอินพุตบวก

## 3. การชดเชยกระแสของวงจรตามแรงดัน

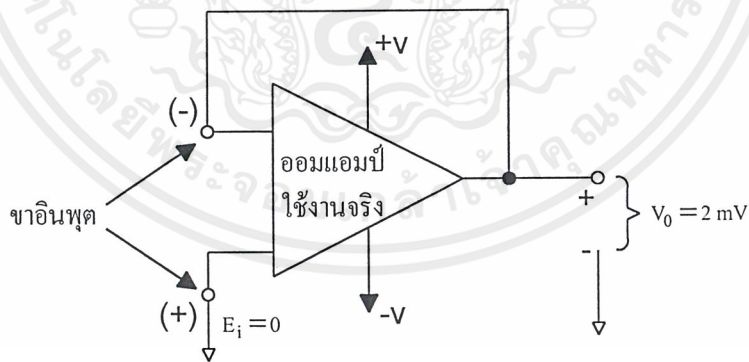
เพื่อพิจารณาผลของกระแสออฟเซตในที่นี่จะใช้วงจรตามแรงดันเป็นตัวอย่างในการพิจารณาในรูปที่ 2.29 จากวงจรถ้าในกรณีที่  $I_{B+}$  เท่ากับ  $I_{B-}$  อาจเป็นไปได้ว่าผู้ใช้สามารถทำการชดเชยผลของความผิดพลาดได้คือการกำหนดให้  $R_f$  ที่ป้อนกลับเท่ากับ  $R_G$  ซึ่งทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ  $V_0 = -R_i \times I_{B+} + R_f \times I_{B-}$  จะมีผลหักล้างกันจนได้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0 V ในขณะที่  $E_i = 0$  V แต่เนื่องจากในความเป็นจริงยังไม่สามารถทำออปแอมป์ตัวใดให้มีค่า  $I_{B+}$  เท่ากับ  $I_{B-}$  ได้



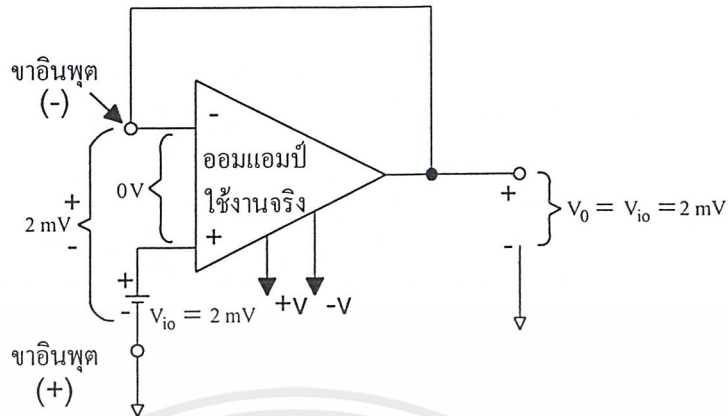
รูปที่ 2.29 การชดเชยในกรณีที่วงจรมีลักษณะเป็นวงจรตามแรงดัน

### 2.5.4 แรงดันอินพุตออฟเซต

ในรูปที่ 2.30 (ก) ถ้าออปแอมป์ที่ใช้ในทางอุดมคติค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_0$  มีค่าเป็น 0 V แต่ในทางความเป็นจริงแรงดันเอาต์พุตไม่ได้เท่ากับ 0 V อย่างเป็นจะมีค่าผิดพลาดอยู่เล็กน้อยออปแอมป์ทุกตัวจะมีแรงดันอินพุตออฟเซตอยู่ด้วยเสมอและแต่ละตัวไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากันเพื่อความสะดวกในการพิจารณาเราจะสมมุติว่าแรงดันตกคร่อมระหว่างขาบวกและขาลบมีค่าเป็นศูนย์ส่วนของแรงดันอินพุตออฟเซตที่ออปแอมป์มีอยู่ก็สมมุติเป็นว่าออปแอมป์ตัวนั้นถูกต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตออฟเซต  $V_{i0}$  ดังที่แสดงในรูปที่ 2.30 (ข) ในที่นี้สมมุติให้ออปแอมป์มีค่าแรงดันอินพุตออฟเซตเป็น 2 มิลลิโวลต์ จากรูปก็แสดงว่าออปแอมป์ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีขนาด 2 มิลลิโวลต์



(ก)  $V_0$  ควรเท่ากับศูนย์ เพราะ  $E_i$  เท่ากับศูนย์อยู่

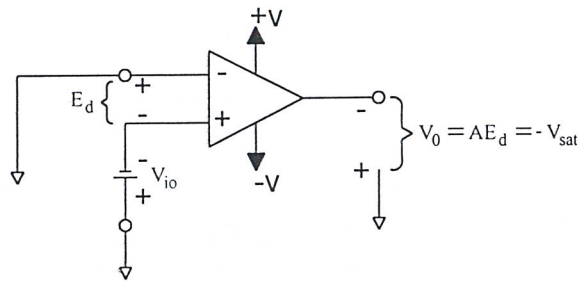


(ข) การหาค่าผิดพลาดของแรงดันอินพุตทำได้โดยป้อนไฟกระแสตรงค่าหนึ่งเข้าที่ขาอินพุตบวก

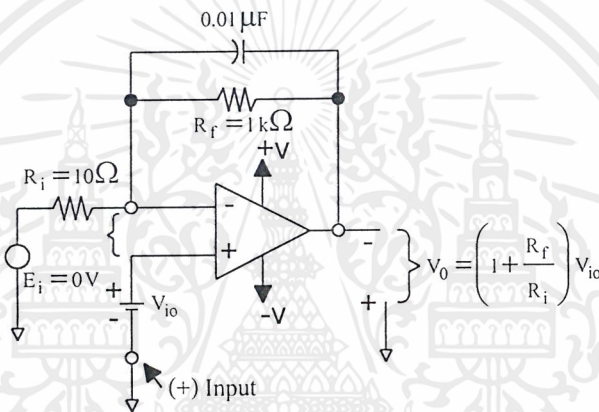
### รูปที่ 2.30 ผลของแรงดันอินพุตออฟเซตในออปแอมป์ทั่วไป

#### 1. ผลของแรงดันอินพุตออฟเซตที่มีต่อแรงดันเอาต์พุต

รูปที่ 2.31 (ก) แสดงถึงผลของแรงดันอินพุตออฟเซตที่มีต่อวงจร จากรูปเป็นวงจรขยายที่ไม่มี การป้อนกลับผลของแรงดันอินพุตออฟเซตทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับอัตราขยายแบบ วงจรเปิดคูณกับ  $V_{i_0}$  ซึ่งค่าอัตราขยายแบบวงจรเปิดนี้มีค่าสูงมากจนทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่า เท่ากับแรงดันอิมิตัวทางด้านใดด้านหนึ่ง(แรงดันอิมิตัวด้านบวกจะเท่ากับ  $+V_{sat}$  และแรงดันอิมิตัว ในด้านลบเท่ากับ  $-V_{sat}$  สังเกตค่า  $V_{i_0}$  จากรูปที่ 2.30 (ก) และรูปที่ 2.31 (ก) พบว่าแตกต่างกันซึ่ง ขึ้นอยู่กับตัวของออปแอมป์ตัวที่จะใช้นั้นมีค่า  $V_{i_0}$  เป็นบวกหรือเป็นลบ ก็ต้องนำแต่ละตัวนั้นมาทำ การทดสอบโดยนำมาต่อตามรูปที่ 2.31 (ก) แล้วดูว่าจะเกิดการอิมิตัวไปทางด้านใด ถ้าอิมิตัวในด้าน บวกก็แสดงว่ามีค่า  $V_{i_0}$  เป็นบวก แต่ถ้าอิมิตัวในด้านลบ  $V_{i_0}$  ของออปแอมป์ตัวนั้นก็มีความเป็นลบ สังเกตว่าสิ่งที่เราทราบได้จากการทดสอบโดยใช้วงจรในรูปที่ 2.31 (ก) นี้จะทราบได้เพียงว่า  $V_{i_0}$  เป็นบวกหรือลบเท่านั้น แต่ไม่สามารถวัดได้ว่ามีค่าเป็นเท่าไร ในหัวข้อต่อไปจะเป็นการทดสอบ และวัดขนาดของ  $V_{i_0}$  ด้วย



(ก)  $V_{i0}$  จะเป็นตัวที่ทำให้  $V_0$  มีค่าเท่ากับ  $-V_{sat}$



(ข)  $V_{i0}$  จะถูกขยายโดยออปแอมป์ซึ่งจะทำให้ผลผิดพลาดเป็นอัตราส่วนที่แน่นอนที่  $V_0$

รูปที่ 2.31 ค่า  $V_0$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์เมื่อมีการต่อวงจรดังรูป ก. และ ข.

## 2. การวัดขนาดของแรงดันอินพุตออฟเซต

เพื่อที่จะให้การวัดขนาดของแรงดันอินพุตออฟเซตทำได้ง่าย และให้เห็นได้อย่างชัดเจนในที่นี้จะสมมุติให้กระแสไบอัสมีค่าเป็น 0 แอมป์ รูปที่ 2.31 (ข) เป็นวงจรที่ใช้สำหรับทดสอบวัดค่าของ  $V_{i0}$  จากรูปกำหนดให้  $E_i = 0\text{ V}$  และ  $V_{i0}$  เป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกต้องอยู่กับตัวออปแอมป์ ดังนั้นถ้า  $V_{i0}$  มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ แรงดันเอาต์พุตก็มีค่าไม่เท่ากับ 0 โวลต์ด้วยโดยค่าของแรงดันเอาต์พุตถูกกำหนดจากแรงดันอินพุตออฟเซตเป็นไปตามสมการ

$$V_0 = \text{error voltage due to } V_{i0} = V_{i0} \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \quad (2.62)$$

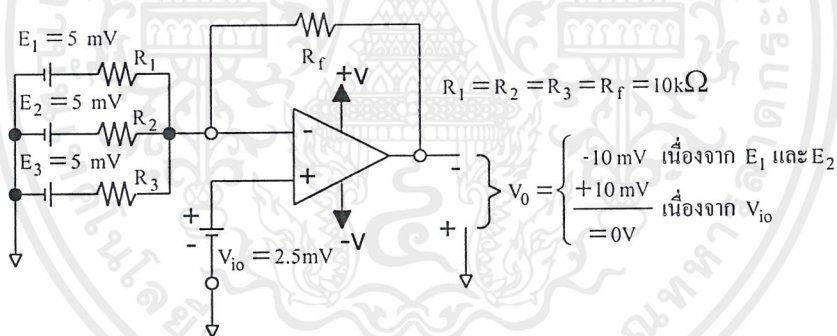
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุต ดังในสมการที่ (2.62) นี้เป็นจริงเสมอไม่ว่าวงจรในรูปที่ 2.40 (ข) จะเป็นวงจรกลับสัญญาณหรือไม่กลับสัญญาณ ถ้าเป็นวงจรรขยายแบบกลับเฟส ก็ให้ต่อสัญญาณที่อินพุตขาลบ และถ้าเป็นวงจรรขยายแบบนอนอินดิ้งหรือแบบไม่กลับเฟสก็ต่อสัญญาณที่อินพุตขาบวก

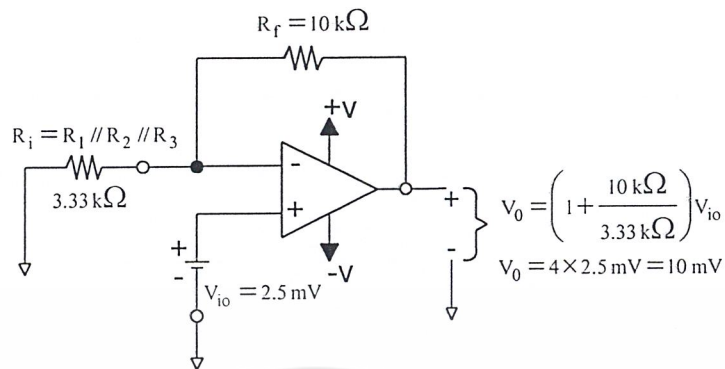
### 2.5.5 แรงดันอินพุตออฟเซตของวงจรรวมสัญญาณ

#### 1. อัตราการขยายตัวของสัญญาณและอัตราขยายของแรงดันอินพุตออฟเซต

ในวงจรรขยายกลับสัญญาณและไม่กลับสัญญาณนั้นจะเกิดผลของแรงดันเอาต์พุตมีค่าของอัตราขยายเป็น  $-R_f/R_i$  กรณีที่เป็นวงจรรขยายแบบกลับสัญญาณ และมีค่าอัตราขยายเป็น  $(1+R_f/R_i)$  กรณีที่เป็นวงจรรขยายแบบไม่กลับสัญญาณ สำหรับในหัวข้อนี้จะพิจารณาต่อไปถึงกรณีที่เป็นการรวมของสัญญาณที่มีมากกว่า 1 จุด ความผิดพลาดอันเนื่องมาจาก  $V_{io}$  จะยังมีผลมากขึ้นกว่ากรณีที่มีอินพุตเพียงตัวเดียว



- (ก)  $V_0$  จะประกอบด้วยแรงดันจาก  $E_1$  และ  $E_2$  ซึ่งมีค่ารวมเท่ากับ  $-10$  มิลลิโวลต์ ในขณะที่แรงดัน  $V_{io}$  ก็มีค่าเท่ากับ  $10$  มิลลิโวลต์



(ข)  $V_{io}$  จะถูกขยายด้วยเกน + 4 ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันที่ผิดพลาดถึง 10 มิลลิโวลต์มาหักล้างกับสัญญาณที่ควรเกิดขึ้นจริงที่  $V_o$

รูปที่ 2.32 แรงดันอินพุตแต่ละแหล่งจะมีผลต่อความผิดพลาดโดยในรูป (ก) แรงดันอินพุตแต่ละตัวจะถูกขยายด้วยอัตราขยาย -1 เท่า ในขณะที่  $V_{io}$  จะถูกขยายด้วยอัตราขยาย + 4 เท่า

รูปที่ 2.32 (ก) เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบเฟสที่มีการบวกหรือรวมสัญญาณกันที่อินพุต (ในตอนนี้ในตอนนี้จะคิดเฉพาะแรงดันอินพุตออฟเซต กระแสไบอัสยังไม่นำมาคิด) จากรูปจะเห็นได้ว่า  $E_1$  และ  $E_2$  มีค่ามากกว่า  $V_{io}$  สัญญาณ  $E_1$  มีอัตราขยายเป็น  $-R_f/R_1 = -1$  ทำให้เกิดผลที่เอาต์พุตเท่ากับ -5 มิลลิโวลต์ และสัญญาณ  $E_2$  มีการขยายตัวเป็น  $-R_f/R_2 = -1$  ทำให้เกิดผลที่เอาต์พุตเท่ากับ -5 มิลลิโวลต์ สำหรับ  $E_3$  ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเป็น 0 โวลต์ จึงไม่มีผลต่อเอาต์พุต ดังนั้นผลลัพธ์ที่ถูกต้องของแรงดันเอาต์พุต ต้องมีค่าเป็น -10 มิลลิโวลต์

เมื่อคำนวณเอาต์พุตที่ควรจะเป็นได้แล้ว ต่อไปจะคำนวณแรงดันเอาต์พุตผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น โดยตอนแรกสมมติให้  $E_1 = E_2 = 0 \text{ V}$  ในรูปที่ 2.32 (ก) ดังนั้นที่ขาของออปแอมป์กลายเป็นมีตัวต้านทานสามตัวต่อขนานกันสามารถคิดให้เหลือเพียงตัวเดียวได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.32 (ข)  $R_i = R_1 / R_2 / R_3$  เท่ากับ  $10 \text{ k}\Omega / 3 = 3.33 \text{ k}\Omega$  ดังนั้น  $V_{io}$  จะทำให้เกิดผลความผิดพลาดเท่ากับ

$$V_{err} = V_{io} \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \quad (2.63)$$

$$= V_{io} \left(1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{3.33 \text{ k}\Omega}\right)$$

$$E_i = 10 \text{ mV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุตที่ควรจะเป็นทีเดียว ดังนั้นค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ในทางปฏิบัติจึงเป็น  $V_0 = -10 \text{ mV} + 10 \text{ mV} = 0 \text{ V}$  แทนที่จะเป็น  $-10$  มิลลิโวลต์

จากที่กล่าวมาทั้งหมดสรุปได้ว่า ในวงจรบวกสัญญาณใด ๆ ค่าผิดพลาดที่เอาต์พุตจะมีผลมาจากแต่ละอินพุตที่ป้อนคือเสมือนว่ามีแรงดันอินพุตออฟเซตไปปรากฏที่แต่ละอินพุตนั้น ๆ ยังมีการป้อนสัญญาณอินพุตหลายแหล่งมากขึ้น ผลของความผิดพลาดก็จะยังมีมาก

## 2. การลดผลของแรงดันอินพุตออฟเซต

วงจรในรูปที่ 2.32 (ก) หลายคนอาจคิดว่า ทำไมเราไม่ใส่แรงดันให้กับ  $E_3$  ลักค่าหนึ่งจนถึงระดับที่สามารถชดเชยค่าผิดพลาดของ  $V_{i0}$  จนทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตถูกต้องตามที่ต้องการคือ  $V_0 = -10 \text{ mV}$  เรื่องนี้อาจเป็นสิ่งที่ทำได้จริง แต่มีข้อเสียอยู่ 2 ประการคือ ประการแรก การที่จะทำเช่นนั้นได้ จะต้องตัวต้านทานชนิดพิเศษ ซึ่งปรับค่าได้ละเอียดมาก ทั้งนี้เพราะ  $0$  โวลต์ กับ  $-10$  มิลลิโวลต์นั้นมีความแตกต่างกันน้อยมาก จากนั้นต้องนำตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ต่อระหว่างไฟเลี้ยงบวก (+V) และไฟเลี้ยงลบ (-V) ของวงจร ประการที่สอง ค่าความต้านทานใด ๆ ที่ต่อระหว่างขาอินพุตลบกับกราวด์จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่านอยซ์ขึ้นมาอีก

### 2.5.6 คริปต์

ความผิดพลาดที่เกิดจากกรณีสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงสามารถลดหรือชดเชยได้โดยการเพิ่มความต้านทานเพื่อชดเชยกระแส และปรับตัวความต้านทานเพื่อลดผลของแรงดันอินพุตออฟเซต สิ่งที่ยากจะเน้นในตอนนี้เป็น การชดเชยความผิดพลาดนั้นจะยังคงถูกต้องเฉพาะที่อุณหภูมิหนึ่งและเวลาหนึ่งเท่านั้น

ทั้งนี้เพราะค่าของแรงดันและกระแสออฟเซตจะเปลี่ยนไปตามเวลาของการทำงานของอุปกรณ์อุณหภูมิและนอกจากนั้น ไฟเลี้ยงที่จ่ายให้แก่วงจร กระแสไบอัสก็ยังมีผลทำให้กระแสออฟเซตเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน ไฟเลี้ยงที่ต่างกัน กระแสไฟฟ้างก็ต่างกัน

การใช้แหล่งไฟจ่ายที่ดีมีสัญญาณไฟเรียบสม่ำเสมอจะช่วยลดผลความผิดพลาดในส่วนองไฟเลี้ยงได้สำหรับผลจากอุณหภูมินั้นสามารถลดได้โดย

1. ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่หรือ
2. เลือกออปแอมป์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อย

การเปลี่ยนแปลงของกระแสออฟเซตและแรงดันอินพุตออฟเซตที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมินั้นเราเรียกว่า คริปต์ เช่นกระแสคริปต์ก็คือค่าของกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเป็นต้น คริปต์ของกระแสไฟฟ้าออฟเซตจะมีหน่วยเป็นนาโนแอมป์ต่อองศาเซลเซียส (NA/°C) คริปต์ของแรงดันอินพุตออฟเซตจะมีหน่วยเป็นไมโครโวลต์ต่อองศาเซลเซียส ( $\mu \text{ V} / ^\circ \text{C}$ ) ค่าของคริปต์นี้อาจเปลี่ยนไปได้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

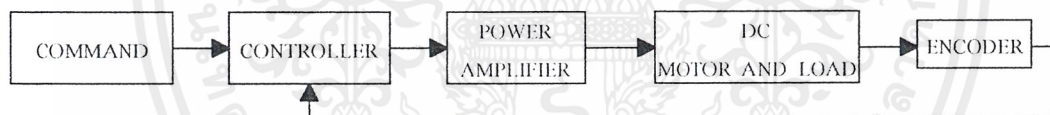
แต่ละช่วงอุณหภูมิ เช่นที่อุณหภูมิค่าคริปต์ของแรงดันอินพุตออฟเซตเป็น +20 นาโนแอมป์ต่อ องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าเป็น -10 นาโนแอมป์ต่อองศาเซลเซียสเป็นต้น ด้วยเหตุผลนี้เองในหนังสือคู่มืออาจแสดงค่าคริปต์ได้มากกว่า 1 ค่า ขึ้นอยู่กับแต่ละช่วงของอุณหภูมิหรือในออปแอมป์บางตัวก็อาจวาดเป็นกราฟเพื่อให้ได้รายละเอียดที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

## 2.6 ระบบการบังคับมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอนุาลอกแอ็คชิวเอทเตอร์ที่ไม่มีตำแหน่งหยุดที่แน่นอนเหมือนสแต็ปปีงมอเตอร์ ดังนั้นระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรง โดยทั่วไปมักเป็นระบบแบบวงจรถัด ในระบบวงจรถัดตำแหน่งเอาต์พุต หรือความเร็วเอาต์พุตจะถูกป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับอินพุตอ้างอิงเพื่อให้ได้คุณสมบัติการทำงานที่ต้องการ

### 2.6.1 พื้นฐานของระบบคอนโทรลดีซีมอเตอร์

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแสดงได้ในแผนผังการทำงานในรูปที่ 2.33 ซึ่งประกอบด้วยบล็อกที่สำคัญ 4 บล็อก คือ



รูปที่ 2.33 ระบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบพื้นฐาน

#### 1. ตัวคอนโทรลเลอร์

เป็นส่วนหนึ่งของระบบที่ทำให้เกิดการควบคุมสัญญาณไปบังคับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวควบคุมโพลที่ให้การควบคุมสัญญาณเป็นสัญญาณอนุาลอกเราเรียกว่าตัวควบคุมแบบอนุาลอก ส่วนตัวควบคุมที่ให้ที่ให้การควบคุมสัญญาณเป็นสัญญาณดิจิทัล เราเรียกว่าตัวควบคุมแบบดิจิทัล

#### 2. วงจรไดรเวอร์

เป็นส่วนประกอบของระบบที่อยู่ระหว่างตัวควบคุมและโพลที่มีหน้าที่ปรับรูปและขยายสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะป้อนเข้าไปขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโพล วงจรไดรเวอร์

ส่วนใหญ่ได้แก่ วงจรขยายกำลังซึ่งอาจแบ่งย่อยออกเป็นเชิงเส้น วงจรขยายกำลังและวงจรขยายพัลส์วิคทโมดูเลชัน

### 3. การป้อนกลับทรานสดิวเซอร์หรือเอนโคเดอร์

เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้รับรู้หรือตีเทคสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ โดยไม่มีผลของการส่งสัญญาณที่ตีเทคได้นี้จะป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงทำให้ได้สัญญาณผิดพลาดการป้อนกลับทรานสดิวเซอร์แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ อนุลอกทรานสดิวเซอร์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณอนุลอกได้แก่ พกทาลอเจนเนอเรเตอร์ โปเทนทิโอมิเตอร์ และซิงโคร เป็นต้น ส่วนการป้อนกลับทรานสดิวเซอร์อีกแบบหนึ่ง คือ ดิจิตอลทรานสดิวเซอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณดิจิตอลได้แก่ พกอินคริमेंท์ เอนโคเดอร์รีโซลเวอร์ แมกนิติคพิลอัพ เป็นต้น

### 4. มอเตอร์กระแสไฟฟ้าตรงและโหลดของระบบ

ระบบที่ถูกควบคุมหรือส่วนที่ออกแรงทำงานซึ่งจะเป็นเครื่องจักรกล (มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง) หรืออะไรก็ตามที่ให้ตัวแปร มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในที่นี้เป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่มีคุณสมบัติการทำงานสูงมีอาร์มาเจอร์อินคัลแดนซ์และแรงเฉื่อยของโรเตอร์ต่ำ

#### 2.6.2 ทาโคมิเตอร์

ทาโคมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่สามารถแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และให้กำเนิดแรงดันเอาต์พุตที่เป็นสัดส่วนกับแมกนิจูดของความเร็วเชิงมุม ในระบบการบังคับมอเตอร์โดยทั่วไปจะใช้ทาโคมิเตอร์เป็นตัวแสดงความเร็วเพื่ออ่านค่าความเร็วของเพลลาของมอเตอร์ หรือเพื่อป้อนความเร็วกลับสำหรับการบังคับความเร็วหรือสำหรับทำให้เสถียรภาพของระบบดีขึ้น

ลักษณะการทำงานของดีซีทาโคมิเตอร์กับดีซีมอเตอร์จะตรงกันข้าม ส่วนดีซีทาโคมิเตอร์กับดีซีเจนเนอเรเตอร์จะเหมือนกันเพียงแต่ต่างกันที่การใช้งาน กล่าวคือดีซีทาโคมิเตอร์มีขอบเขตการใช้งานเพียงเป็นตัววัดความเร็วของเพลลาแล้วส่งผลออกมาเป็นสัญญาณที่อ่านค่าได้ง่ายเท่านั้น แต่ถ้านำทาโคมิเตอร์ไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีสัญญาณรบกวนมาก และบางครั้งต้องส่งผลที่วัดได้ไปเป็นระยะทางไกลพอสมควร ทาโคมิเตอร์จึงต้องมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ และผลิตกำลังงานออกมาสูงพอสมควร ในกรณีนี้เราอาจจะเรียกทาโคมิเตอร์นี้ว่าเป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ดีซีทาโคมิเตอร์ สามารถใช้เป็นตัวป้อนความเร็วของเพลลาของมอเตอร์กลับเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเปรียบเทียบแล้วขยายผลต่างที่ได้ให้ไปขับมอเตอร์ในระบบการบังคับความเร็วของมอเตอร์โดยการต่อหาโคมิเตอร์เข้ากับเพลลาของมอเตอร์โดยตรงการใช้งานอีกอย่างของทาโคมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือเป็นตัวเซนเซอร์ความเร็วในระบบการบังคับตำแหน่งส่วนการใช้งานอย่างที่สองของทาโคมิเตอร์คือใช้เป็นตัววัดความเร็วของเพลลาของมอเตอร์ แล้วส่งผลออกมาให้เห็น โดยการต่อแรงดันเอาต์พุตของทาโคมิเตอร์เข้ากับโวลต์มิเตอร์แล้วอ่านค่าความเร็วการหมุนของมอเตอร์ในรูปของแรงดัน

### 2.6.3 ลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟ

ลิเนียร์เซอร์โวแอมพลิไฟ โดยปกติสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ขยายแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกับออปแอมป์ หรือวงจรขยายคิฟเฟอร์เรนเชียลที่ใช้ไปกระตุ้นภาคกำลังให้ไปขับมอเตอร์ ภาคกำลังรวมอยู่ในวงจรป้อนกลับเฉพาะแห่งเพื่อให้พารามิเตอร์ที่ต้องการได้แก่ มอเตอร์แรงดันกระแสของมอเตอร์หรือพารามิเตอร์ทั้งสองดังกล่าวมีความเป็นเชิงเส้น ในกรณีนี้ความไม่เป็นเชิงเส้นและคริฟต์ที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิในภาคกำลังจะลง โดยอัตราขยายวงจรของระบบ นอกจากนั้นออปแอมป์ยังมักใช้เป็นเสมือนการชดเชยหรือใช้เป็นวงจรรวมสัญญาณทำหน้าที่เหมือนกับจุดรวมของสัญญาณบังคับและสัญญาณป้อนกลับของระบบ ซึ่งได้แก่สัญญาณที่ได้จากนาลอกทาโคมิเตอร์(ในระบบการบังคับความเร็ว)และสร้างสัญญาณผิดพลาดซึ่งจะถูกขยายโดยภาคกำลังเพื่อไปแก้พารามิเตอร์ที่ต้องการบังคับให้มีค่าที่ถูกต้อง

วงจขยายแบบเชิงเส้นจะเป็นตัวควบคุมแรงดันหรือกระแสของมอเตอร์ โดยการบังคับขนาดของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นมันจะเป็นตัวที่ลดแรงดันเอาไว้อซึ่งเท่ากับผลต่างของแหล่งจ่ายแรงดันและแรงดันที่มอเตอร์ใช้งานจริงในขณะที่มีกระแสที่เหมาะสมไหลผ่าน กำลังงานสูญเสียในเอาต์พุตทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะขณะที่มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่ำแรงบิดสูง เพราะขณะนั้นแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ต่ำกระแสจึงสูงนี้เป็นความแตกต่างที่เห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับวงจขยายสวิตซิ่ง สวิตแอมพลิไฟควบคุมแรงดันของมอเตอร์โดยปรับรูปคลื่นของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และให้มันทำงานทุก ๆ การอิมตัวหรือที่ภาวะปิด ดังนั้นการสูญเสียของกำลังงานจะน้อยในแต่ละภาวะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น อย่างไรก็ตามวงจขยายแบบสวิตซิ่งก็สร้างปัญหาใหม่ขึ้นอีก เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียการสวิตซ์ที่ความถี่สูง ค่าของอินดักแตนซ์ของมอเตอร์ (หรือภายนอก) ต้องมีค่าน้อย ดังนั้น จึงเป็นการเพิ่มเวลาคงที่ของระบบซึ่งจะทำให้ย่านการตอบสนองความถี่ของระบบลดลงด้วย

นอกจากนั้นยังเกิดปัญหาคลื่นสนามแม่เหล็กรบกวนซึ่งมักจะเกิดขึ้นขึ้นรุนแรงทำให้ระบบเกิดความยุ่งยากและทำงานผิดพลาดขึ้นได้ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะตัดสินว่าวงจขยายชนิดใดชนิดดีกว่ากัน

วงจขยายแบบเชิงเส้นตามปกตินิยมใช้ในระบบที่มีย่านของสัญญาณกว้างและกำลังงานต่ำ (น้อยกว่า 2 - 3 ร้อยวัตต์) และมักจะใช้สำหรับขับคลื่นขดลวดหมุนของมอเตอร์ที่มีความเฉื่อยต่ำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มกระแสด้วยอัตราเร่งสูงในช่วงเวลาอันสั้น (2-3 มิลลิวินาที) ซึ่งกระแสฟลักซ์ที่กำหนดไว้ของเอาต์พุตทรานซิสเตอร์อาจจะยังใช้งานได้ดี

ในทางตรงกันข้ามสวิตชิงแอมพลิไฟโดยทั่ว ๆ ไปมักจะใช้ในระบบที่ใหญ่ ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบดังกล่าวต้องการขยายช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำ และมีแรงบิดสูง ซึ่งจะทำให้เกิดสูญเสียกำลังงานมากในวงจรขยายแบบเชิงเส้น

วงจรถยายแบบเชิงเส้นอาจจำแนกตามหน้าที่จะแบ่งได้เป็น : ยูนิโคเร็กซ์ันแนล และไบโคเร็กซ์ันแนลแอมพลิไฟ แบ่งตามโครงสร้างได้เป็น : ไบโพลาร์หรือบริดจ์ หรือถ้าแบ่งตามทรานซ์เฟอร์ฟังก์ชัน ได้เป็นแรงดันและกระแสวงจรถยาย

### 1. ยูนิโคเร็กซ์ันแนลเซอร์โวแอมพลิไฟ

ยูนิโคเร็กซ์ันแนลแอมพลิไฟเป็นเครื่องขยายแบบง่ายที่สุดของวงจรถยายแบบเชิงเส้นและใช้ในระบบที่มอเตอร์ถูกขับให้หมุนได้ในทิศทางเดียว นั่นคือทรานซ์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรถยายแบบนี้ จะทำงานอยู่ในควอเตอร์แรกเท่านั้น และไม่สามารถให้แรงดันหรือกระแสไหลกลับทิศทางได้ระบบดังกล่าวแสดงคุณสมบัติการทำงานโดยสามารถเพิ่มอัตราเร่งได้อย่างรวดเร็วแต่สามารถลดความเร็วลงได้อย่างเชื่องช้า เนื่องจากมอเตอร์จะลดความเร็วลงได้ด้วยแรงเสียดทานของระบบเพียงเท่านั้น

### 2. ไบโคเร็กซ์ันแนลเซอร์โวแอมพลิไฟ

ไบโคเร็กซ์ันแนลเซอร์โวแอมพลิไฟสามารถทำให้มอเตอร์ทำงานได้ทั้งสองทิศทางและมีทรานซ์เฟอร์ฟังก์ชันแบบเชิงเส้นตลอดถึงความเร็วศูนย์ วงจรถยายแบบนี้สามารถบังคับได้เต็มที่ถึง 4 ควอเตอร์และสามารถป้อนแรงดันและกระแสทั้งขั้วบวกหรือลบให้กับมอเตอร์ได้

ไบโคเร็กซ์ันแนลแอมพลิไฟแบบพื้นฐาน 2 แบบ ได้แก่ ลิเนียร์ไบโพลาร์และบริดจ์แบบเชิงเส้นซึ่งแบ่งออกตามลักษณะโครงสร้างของภาคเอาต์พุต

ไบโพลาร์แอมพลิไฟจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าถึงสองลักษณะสำหรับการทำงานแบบป้อนเข้าและป้อนกลับแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์เท่ากับผลต่างระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันและแรงดันตกคร่อมคอนเดคเตอร์ – อิมิตเตอร์ของ  $Q_1$  หรือ  $Q_2$  ในขณะที่ตัวหนึ่งตัวใดนำกระแส เนื่องจากวงจรถยายแบบเชิงเส้นโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพไม่ค่อยดีนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ภาวะความเร็วต่ำแรงบิดสูง ซึ่งในภาวะนี้กระแสจะไหลสูงและแรงดันตกคร่อมเอาต์พุตทรานซิสเตอร์สูงด้วย ดังนั้นในระบบใหญ่จำเป็นต้องใช้ตัวระบายความร้อนขนาดใหญ่ หรือใช้พัดลมสำหรับระบาย ความร้อน

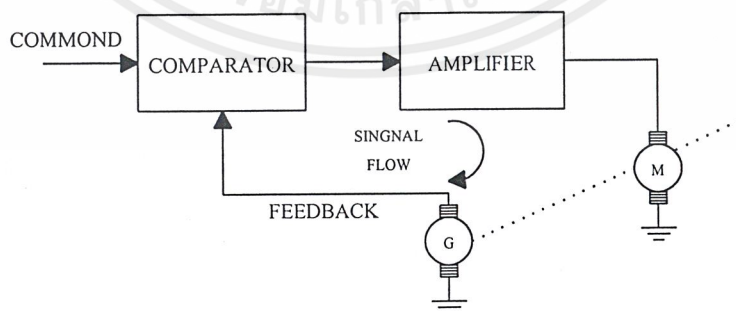
ลิเนียร์โพลาร์แอมพลิไฟเป็นแอมพลิไฟที่ออกแบบได้ง่ายกว่าลิเนียร์บริดจ์ แต่การออกแบบไบโพลาร์มีข้อเสียที่สำคัญหลายข้อ ซึ่งควรจะได้ประเมินข้อดีข้อเสียของระบบเสียก่อน

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบไบโพลาร์คือมีสองขั้วบวกและลบ
2. ค่า  $V_{cc0}$  ของทรานซิสเตอร์กำลังต้องสูงกว่าผลบวกของแหล่งจ่ายแรงดันทั้งสอง ( $2 V_S$ )
3. ลิเนียร์ไบโพลาร์แอมพลิไฟจะต้องทนต่อฟอร์เวิร์ด-ไบอัสเบรคดาวน์ที่สองเอาต์พุตเพาเวอร์ ทรานซิสเตอร์อาจจะเสียได้ในช่วงการลดความเร็วลงของโหลดที่มีความเฉื่อยสูงลงจากความเร็วสูง  
ข้อดีอีกอันหนึ่งของบริดจ์ คือ ช่วยลดแรงดันผลึกดันบนตัวทรานซิสเตอร์ที่นำกระแส ถ้าบริดจ์ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมความแตกต่างระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันและแรงดันที่มอเตอร์ต้องการจะถูกแบ่งเท่า ๆ กันระหว่างทรานซิสเตอร์ที่นำกระแสทั้ง 2 ตัวนั้น จากผลอันนี้ช่วยเพิ่มกระแสของเอาต์พุตทรานซิสเตอร์ก่อนที่จะเกิดความเสียหายจากฟอร์เวิร์ด-ไบอัส เบรคดาวน์ครั้งที่สอง การเพิ่มกระแสเอาต์พุตอย่างปลอดภัยสำหรับการทำงานของมอเตอร์ควรจะใช้ทรานซิสเตอร์กำลังที่เหมือนกันในวงจรบริดจ์ที่แสดงให้ดูในระหว่างมอเตอร์และกราวด์ เพื่อให้ได้แรงดันที่เป็นสัดส่วนกับกระแสของมอเตอร์สำหรับเป็นตัวลิมิตกระแส หรือใช้เป็นการป้อนกลับของกระแส

#### 2.6.4 การบังคับแบบวงจรมอเตอร์

แม้ว่าการบังคับวงจรมอเตอร์จำนวนมากสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีในปัจจุบันก็ตาม แต่แนวโน้มของความถี่ความต้องการเรีกูละชันของความเร็วที่ดีกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบวงจรมอเตอร์

ในระบบของการบังคับแบบวงจรมอเตอร์ประกอบด้วยแอ็คชูเอเตอร์ (มอเตอร์) คอมพาราเตอร์ เครื่องขยายและเซนเซอร์ (เจนเนอเรเตอร์)



รูปที่ 2.34 แสดงถึงส่วนประกอบของระบบการบังคับความเร็วแบบวงจรมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.5 ระบบการบังคับความเร็ว

ระบบการบังคับความเร็วสามารถจะกำหนดความเร็วให้คงที่หรือสามารถเปลี่ยนค่าได้ตามที่ต้องการ ระบบนี้มีหลักการอยู่บนพื้นฐานของการป้อนกลับ เพื่อให้ได้ความเร็วที่มีความเที่ยงตรงสูง หลักการทำงานของระบบความเร็วของมอเตอร์จะวัดได้โดยตัวเซนเซอร์ความเร็วป้อนกลับไปยังออฟเพอร์เรชั่นแนลแอมพลิไฟ เพื่อเปรียบเทียบกับระดับความเร็วที่ต้องการ ความแตกต่างของค่าทั้งสองจะอยู่เหนือก่าผิดพลาดของความเร็ว ซึ่งจะได้รับขยายและป้อนให้กับมอเตอร์ เพื่อแก้ไขความเร็วให้มีค่าถูกต้องมีค่าความเบี่ยงเบนของความเร็วเป็นศูนย์ หรือพยายามให้สัญญาณบังคับและความเร็วของมอเตอร์มีความสอดคล้องกันใกล้ที่สุด การทำงานของระบบบังคับความเร็วสามารถจะตอบสนองได้ ทั้งสัญญาณคำสั่งบังคับให้ความเร็วคงที่ หรือให้ความเร็วแปรค่าไปได้ ซึ่งการแปรไปของคำสั่งบังคับนั้น จะต้องอยู่ภายในช่วงความกว้างของสัญญาณของระบบ

ชนิดของมอเตอร์ที่ใช้ในระบบการบังคับความเร็วแบบวงจรถัด โดยทั่วไปได้แก่ เซอร์โวมอเตอร์แบบสองเฟส ดีซีมอเตอร์แบบบังคับแรงดันอาร์มาเจอร์ และดีซีมอเตอร์แบบบังคับความเข้มของสนามแม่เหล็ก

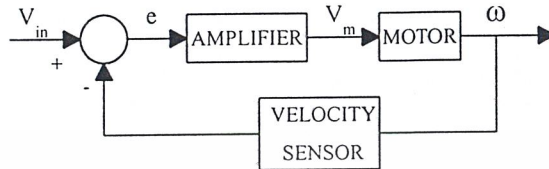
การประยุกต์ใช้งานของการบังคับความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์แบบสองเฟส ปกติจะถูกจำกัดให้ใช้งานอยู่ในจำพวกอุปกรณ์เครื่องมือขนาดเล็กต่าง ๆ เท่านั้น เนื่องจากการสูญเสียภายในตัวมอเตอร์สูง การบังคับความเร็วด้วยการปรับความเข้มของสนามแม่เหล็ก มักจะใช้เมื่อต้องการความเร็วสูงซึ่งสูงกว่าความสูงสุดที่กำหนดของมอเตอร์ (ส่วนมากจะใช้งานเป็นแบบวงจรถัด) ระบบการบังคับความเร็ว ด้วยการบังคับความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนัก เพราะคุณสมบัติไดนามิกของมันมักจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับความเสถียรภาพของระบบ ส่วนการบังคับความเร็วแบบปรับแรงดันของอาร์มาเจอร์ จะใช้สำหรับการบังคับความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วสูงสุดที่กำหนดของตัวมอเตอร์ และมักได้รับความนิยมใช้เป็นตัวขับเคลื่อนในระบบการบังคับความเร็ว โดยทั่วไป ซึ่งจะใช้งานได้ตั้งแต่ขนาดไม่ถึงหนึ่งแอมป์จนถึงขนาดหลายร้อยแอมป์ นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียภายในต่ำและมีคุณลักษณะการทำงานเป็นลิเนียร์และมีคุณสมบัติของไดนามิกที่ดีเมื่อเทียบกับการบังคับแบบอื่น ๆ

เริ่มต้นการวิเคราะห์ระบบการบังคับความเร็วแบบอนาลอก โดยอธิบายระบบเหล่านี้ในเทอมของแผนผังการทำงาน ต่อจากนั้นเราจะได้แก่การวิเคราะห์ให้เห็นความแตกต่างระหว่างระบบการบังคับความเร็วที่ใช้วงจรถัดแบบวงจรถัดกระแสและระบบที่ใช้วงจรถัดแรงดัน การวิเคราะห์ระบบเราจะวิเคราะห์จากทรานสเฟอร์ฟังก์ชันสองแบบ คือแบบแรกเป็นฟังก์ชันระหว่างอินพุตและความเร็วเอาต์พุต แบบที่สองเป็นฟังก์ชันระหว่างโหนดและความเร็วเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บล็อกไดอะแกรมของระบบ

แผนผังการทำงานซึ่งอธิบายถึงระบบการบังคับความเร็วแสดงได้ดังในรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.35 ระบบการบังคับความเร็ว

เมื่อ  $V_{in}$  = สัญญาณคำสั่งบังคับอินพุต  
 $V_u$  = สัญญาณป้อนกลับ  
 $e = (V_{in} - V_u) =$  สัญญาณผิดพลาด

สัญญาณคำสั่งบังคับอินพุตจะได้รับการเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนกลับความแตกต่างของค่าทั้งสองได้เป็นสัญญาณผิดพลาดป้อนผ่านแอมพลิไฟไปยังมอเตอร์ ซึ่งเป็นผลให้ค่าผิดพลาดของความเร็วจะได้รับการแก้ไขให้ถูกต้อง

ส่วนประกอบอันแรกในวงจร ได้แก่ แอมพลิไฟที่เป็นแบบลิเนียร์แอมพลิไฟหรือพัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟ นอกจากนั้นแอมพลิไฟอาจจะเป็นแบบตัวกำเนิดกระแสหรือตัวกำเนิดแรงดัน ทั้งในสองกรณีเราจะกำหนดให้แอมพลิไฟมีทรานสเฟอร์ฟังก์ชันเป็นส่วนประกอบส่วนที่สองในวงจรได้แก่ มอเตอร์และแทนได้ด้วยทรานสเฟอร์ฟังก์ชันเป็น  $A(s)$  ส่วนประกอบส่วนที่สามของวงจรความเร็วคือ ตัวเซนเซอร์ความเร็วจะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณอนาล็อกอย่างต่อเนื่องและมีแมกนิจูดของสัญญาณเป็นสัดส่วนกับความเร็วของมอเตอร์ ในกรณีทั่ว ๆ ไป ตัวเซนเซอร์นี้ ได้แก่ ทาโคมิเตอร์ อย่างไรก็ตามการใช้ทาโคมิเตอร์ในวงจรของการป้อนกลับจำเป็นต้องพิจารณาถึงข้อเสียบางประการคือเรื่องราคาและขนาดของระบบ เราสามารถสร้างสัญญาณป้อนกลับของความเร็วได้เหมือนกับสัญญาณที่ได้จากทาโคมิเตอร์ โดยการรวมของสัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดัน

## 2.6.6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์

การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์หักเหไปจากความเร็วที่ต้องการ มีสาเหตุมาจากหลายแฟคเตอร์ การแปรไปของความเร็วของมอเตอร์แบ่งออกได้ 2 พวก คือ การแปรความเร็วไปอย่างช้า ๆ เรียกว่า Long - Term Speed Variations (LTSV) และการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์เป็นไปอย่างรวดเร็วเราเรียกว่า Instantaneous Speed Variations (ISV) เทร็ชโฮลด์ระหว่างลักษณะการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 แบบขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการนำไปใช้งาน ตัวอย่างของระยะเวลาจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงของความเร็วคือ 1 นาที ดังนั้น LTSV คือการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่เวลายาวนานกว่า 1 นาที ส่วน ISV คือการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่สั้นกว่า 1 นาที

LTSV เกิดขึ้นเนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแรงดันขับเคลื่อนและส่วนประกอบขำรุด ในการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการเสถียรภาพเป็นระยะเวลายาวนาน (LTSV) เราจำเป็นต้องใช้ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์อยู่ภายในค่าที่สามารถยอมรับได้ ถ้าเราไม่สามารถทำให้ค่าเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์อยู่ในขีดจำกัดได้เราต้องดัดแปลงระบบให้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์น้อยที่สุด ระบบดังกล่าวได้แก่ ระบบการบังคับความเร็วแบบเฟสล็อกคูลฟ

ส่วนในกรณีของ ISV นั้นค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนและขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของการใช้งานเป็นส่วนใหญ่ ตามปกติเหตุผลหลักของ ISV อธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 1. เวลาของผลตอบสนอง

เมื่อสัญญาณคำสั่งเปลี่ยนแปลง ระบบก็จะเข้าสู่โหลดทรานเซียนท์ก่อนที่จะเข้าสู่ความเร็วที่ต้องการผลตอบสนองทรานเซียนท์นี้สามารถจะคาดหมายได้โดยขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์ของวงจรและเสถียรภาพของระบบ

### 2. การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดโหลด

เมื่อแรงบิดโหลดเปลี่ยนแปลงจะเป็นสาเหตุให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนไป ผลที่เกิดขึ้นนี้ไม่เป็นที่ต้องการเนื่องจากเราต้องการให้ความเร็วของมอเตอร์เป็นอิสระต่อโหลดความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงโหลดที่สอดคล้องการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ไม่ค่อยมีใครจะสนใจมากนัก เพราะว่าการวัดผลของการเปลี่ยนแปลงโหลดกระทำได้ยากลำบาก ถ้าเราต้องการให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดของระบบเป็นไปอย่างรวดเร็ว เราควรจะหลีกเลี่ยงการออกแบบขดเซอร์ระบบด้วยวงจร Lag - Lead ที่มีซีโรอยู่ที่ความถี่ต่ำ ๆ เพราะว่าวงจร Lag - Lead จะทำให้ผลตอบสนองของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดเป็นไปอย่างเชื่องช้า

### 3. การกระเพื่อมของแรงบิด

แรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ไม่ได้เป็นส่วนที่เที่ยงตรงกับกระแสโดยตรง มันจะค่อย ๆ แปรไปเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งเชิงมุมของเพลามอเตอร์ การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดเหล่านี้เราเรียกว่า การกระเพื่อมของแรงบิด และยังเป็นสาเหตุให้เกิด ISV ผลของการกระเพื่อมของแรงบิดมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ความเร็วต่ำ ๆ เพราะว่าคุณสมบัติของการกระเพื่อมต่ำ ถ้าการกระเพื่อมของแรงบิดและความถี่ของมันสามารถวัดได้ เราก็สามารถจะคาดหมายถึงผลการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ได้

### 4. แรงเสียดทานภายใน

แรงเสียดทานที่สามารถแปรค่าได้ในตัวมอเตอร์จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปได้ เช่นเดียวกับสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด แรงเสียดทานภายในตัวมอเตอร์สามารถจะจัดค่าได้และกำหนดไว้โดยโรงงานผู้ผลิตมอเตอร์นั้น

### 5. สัญญาณรบกวน

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์อาจจะเป็นผลตอบสนองที่มีต่อสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณแปลงปลอมจากภายนอกและสัญญาณที่ไม่ต้องการอื่น ๆ ผลของสัญญาณรบกวนนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบที่ใช้แอมพลิไฟแบบพัลส์วิดท์โมดูเลชันหรือเฟสดีเท็คเตอร์เราสามารถวัดสัญญาณที่ไม่ต้องการเหล่านี้ได้ที่หลายจุดในระบบ ถ้าเราไม่สามารถจะลดขนาดของสัญญาณเหล่านี้ลงได้ เราก็ควรจะเพิ่มความถี่ของสัญญาณเหล่านี้ขึ้น เพื่อลดผลที่จะกระทบกระเทือนต่อความเร็วของมอเตอร์

### 6 สัญญาณรบกวนที่เกิดในทาโคมิเตอร์

ลักษณะที่เลวร้ายที่สุดของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ เป็นสาเหตุมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในทาโคมิเตอร์ เพราะวาระบบไม่มีการป้องกันการรบกวนของสัญญาณที่เกิดขึ้นดังกล่าว สัญญาณรบกวนเหล่านี้อธิบายได้ในรูปของค่าผิดพลาดความเร็วของระบบซึ่งวงจรพยายามจะแก้ไขค่าผิดพลาดความเร็วดังกล่าว ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ทาโคมิเตอร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องเป็นแบบกำเนิดสัญญาณรบกวนต่ำ เมื่อระดับความเที่ยงตรงของความเร็วของระบบขึ้นอยู่กับการป้อนกลับความเร็วนี้ได้จากทาโคมิเตอร์

## บทที่ 3

### การออกแบบและการสร้าง

การออกแบบและการจัดสร้างชุดทดลองตัวควบคุม พี.ไอ.ดี. ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนของ พี.ไอ.ดี. บอร์ด และ ส่วนของบอร์ดมอเตอร์ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วงจรตัวควบคุมแบบพี

เป็นวงจรถูกใช้จำลองคุณลักษณะหรือพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบพี ใช้ IC เบอร์ UA741 หรือ LF351 ซึ่งเป็น IC ออปแอมป์ ขนาด 8 ขา

##### 3.1.1 การออกแบบวงจรถูกตัวควบคุมแบบพี

การออกแบบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่สามารถเลือกค่า  $K_p$  ซึ่งมีค่า 1, 5, 10 เท่า ซึ่งใช้สวิตช์ปรับค่า ในการเลือกและส่วนที่สามารถปรับค่า  $K_p$  ซึ่งมีค่า  $X \ 0...1$  เท่า ซึ่งใช้คานาด้านทานปรับค่าในการปรับค่าซึ่งค่า  $K_p$  สามารถคำนวณได้จาก

$$K_p = \frac{R_f}{R_i} \quad (3.1)$$

เลือก  $R_i = 10 \text{ k}\Omega$

จะได้

$$K_p = \frac{R_f}{10\text{k}\Omega}$$

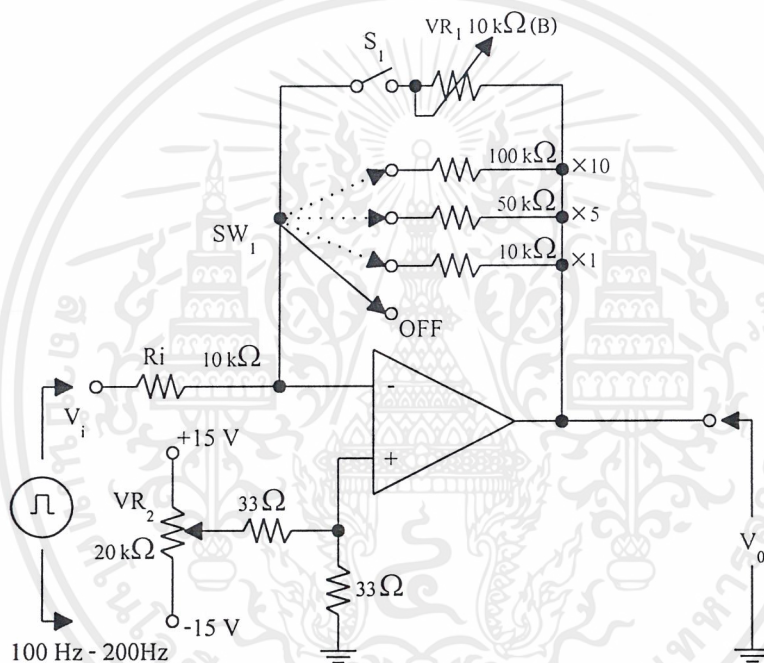
สมมติต้องการ  $K_p = 5$  เราต้องเลือก  $R_f = 50 \text{ k}\Omega$

$$K_p = 5 = \frac{50\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} = 5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การสร้างวงจรตัวควบคุมแบบพี

รูปที่ 3.1 แสดงวงจรตัวควบคุมแบบพีที่ใช้งานจริง ซึ่งจากวงจรจะเห็นได้ว่าเป็นวงจรขยายกลับสัญญาณ ซึ่งสามารถปรับค่าเกนที่ได้ การปรับค่า  $K_p$  นั้นเองด้วย  $VR_1$  และเลือกค่า  $K_p$  ด้วยสวิตช์ปรับค่า ( $SW_1$ ) เราป้อนสัญญาณทดสอบเป็นพัลส์ที่อินพุตความถี่ประมาณ 100 Hz ถึง 200 Hz แล้วปรับค่า  $K_p$  ค่าต่าง ๆ สัญญาณเอาต์พุตต้องมีขนาดใหญ่และเล็กตามค่า  $K_p$  ที่ปรับและต้องมีการแกว่งของสัญญาณเอาต์พุตทั้งซีกบวกและซีกลบเท่ากัน หากไม่เท่ากันให้ปรับ  $VR_2$  จนสัญญาณเอาต์พุตแกว่งเท่ากันทั้งซีกบวกและซีกลบ



รูปที่ 3.1 วงจรตัวควบคุมแบบพี

### 3.2 วงจรตัวควบคุมแบบไอ

เป็นวงจรที่ใช้จำลองคุณลักษณะหรือพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบไอใช้ IC เบอร์ UA741 หรือ LF 351 ซึ่งมีกริยาในการอินทิเกรตค่าอินพุต

### 3.2.1 การออกแบบวงจรตัวควบคุมแบบโอ

การออกแบบวงจรแบ่งเป็น 2 ส่วนเช่นกัน คือ ส่วนที่สามารถเลือกค่า  $T_1$  (การอินทิเกรตช่วงเวลาคงที่) ซึ่งมีค่า 0.1 ms, 1ms และ 10 ms ซึ่งใช้สวิตช์ปรับค่าในการเลือก และส่วนที่ปรับค่า  $T_1$  ซึ่งมีค่า  $X 0...1$  ซึ่งใช้ความต้านทานปรับค่าในการปรับค่าซึ่งค่า  $T_1$  สามารถหาได้จาก

$$V_0(s) = \frac{1}{T_1 S} \cdot V_i(s)$$

$$T_1 = RC \quad (3.2)$$

เลือก  $C = 0.01 \mu\text{F}$

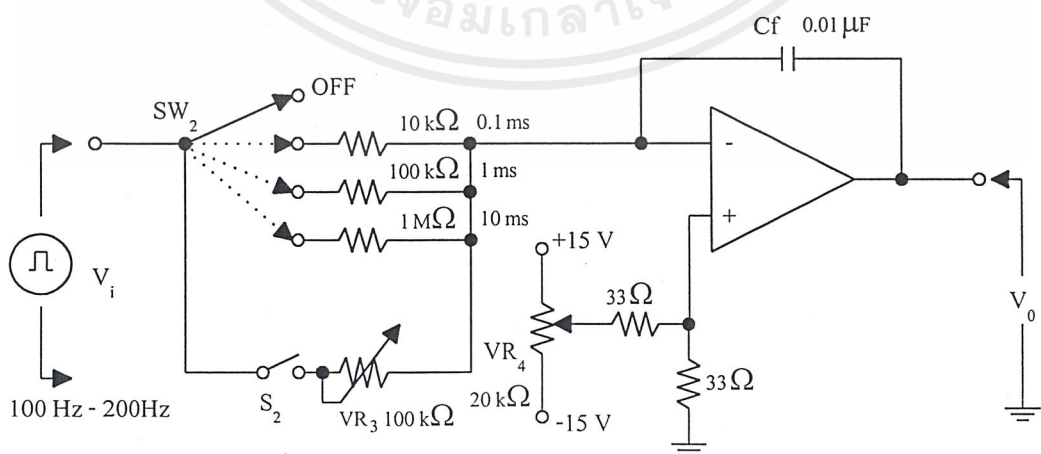
จะได้  $T_1 = R \times 0.01 \mu\text{F}$

สมมติต้องการ  $T_1 = 1 \text{ ms}$  เราจะต้องเลือก  $R = 100 \text{ k}\Omega$

$$T_1 = 1 \text{ ms} = 100 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} = 1 \text{ ms}$$

### 3.2.2 การสร้างวงจรตัวควบคุมแบบโอ

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรตัวควบคุมแบบโอที่ใช้งานจริง ซึ่งจากวงจรจะเห็นว่าเป็นวงจรอินทิเกรตสามารถปรับค่า  $T_1$  ได้โดยการปรับค่า  $R_i$  หรือ  $C_f$  แต่เราเลือกปรับค่า  $R_i$  เพราะง่ายต่อการจัดสร้างเราป้อนสัญญาณทดสอบเป็นพัลส์ที่อินพุต ความถี่ประมาณ 100Hz – 200 Hz แล้วปรับค่า  $T_1$  รูปสัญญาณเอาต์พุตเป็นลักษณะของแรมป์ ซึ่งมีค่าความชันตามค่า  $T_1$  ที่ปรับ และรูปสัญญาณจะต้องไม่ถูกยกขึ้นหรือลงเพราะค่าออฟเซต หากสัญญาณโค่นยกขึ้นเพราะออฟเซตให้ปรับ  $VR_4$  จนสัญญาณถูกต้อง



รูปที่ 3.2 วงจรตัวควบคุมแบบโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วงจรตัวควบคุมแบบดี

เป็นวงจรใช้จำลองคุณลักษณะหรือพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบดี ใช้ IC เบอร์ UA 741 หรือ LF 358 ซึ่งมีกริยาเป็นของตัวควบคุมแบบดี คือจะให้สัญญาณเอาต์พุต เมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงเท่านั้น

#### 3.3.1 การออกแบบวงจรตัวควบคุมแบบดี

การออกแบบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่สามารถเลือกค่า  $T_D$  (การดิฟเฟอเรนเชียลช่วงเวลาลงที่) ซึ่งค่า 0.1 ms, 1 ms และ 10 ms ซึ่งใช้สวิตช์ปรับค่าได้ ในการเลือกและส่วนที่สามารถปรับค่า  $T_D$  ซึ่งมีค่า  $\times 0...1$  ซึ่งใช้ ความต้านทานปรับค่าได้ในการปรับค่าซึ่งค่า  $T_D$  สามารถคำนวณได้จาก

$$V_0(s) = S.T_D \cdot V_i(s) \quad (3.3)$$

$$T_D = R_f C_i$$

$$C_i = 0.01 \mu F$$

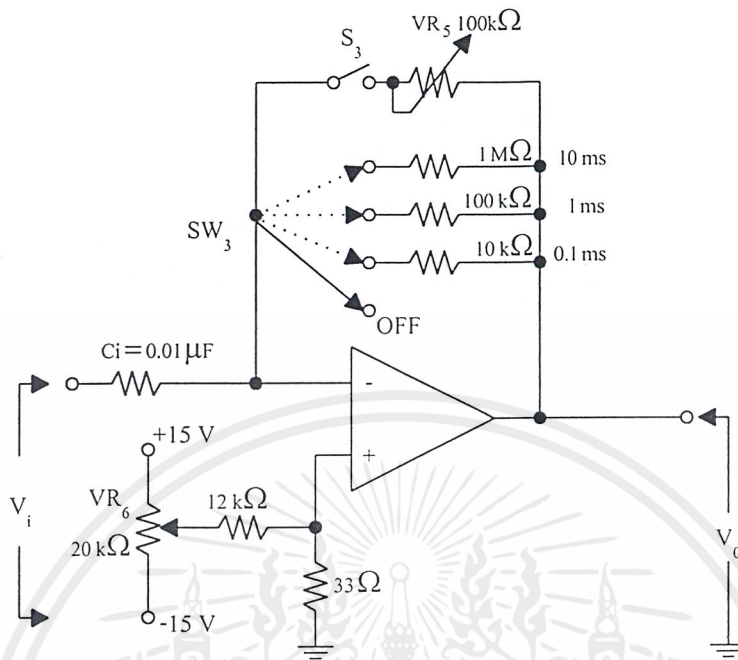
เลือก

จะได้  $T_D = 10 \text{ ms}$  เราจะต้องเลือก  $R_f = 1M\Omega$

$$T_D = 10 \text{ ms} = 1 \times 10^6 \times 0.01 \times 10^{-6} = 10 \text{ ms}$$

#### 3.3.2 การสร้างวงจรตัวควบคุมแบบดี

รูปที่ 3.3 แสดงวงจรตัวควบคุมแบบดี ที่ใช้งานจริง ซึ่งจากวงจรจะเห็นว่าเป็นวงจรดิฟเฟอเรนเชียล สามารถปรับค่า  $T_D$  ได้โดยการปรับค่า  $C_i$  และ  $R_f$  แต่เราเลือกปรับค่า  $R_f$  เพราะง่ายต่อการจัดสร้าง ถ้าเราป้อนสัญญาณอินพุตพัลส์เอาต์พุตจะต้องเป็นสัญญาณอิมพัลส์ แต่ถ้าป้อนอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมเอาต์พุตจะเป็นสัญญาณพัลส์ ตามคุณสมบัติของวงจรดิฟเฟอเรนเชียล



รูปที่ 3.3 วงจรตัวควบคุมแบบพี

### 3.4 วงจร ตัวควบคุมแบบพีไอ

เป็นวงจรใช้จำลองคุณลักษณะพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบพีและไอรวมกัน ใช้ IC เบอร์ UA 741 หรือ LF 351 ซึ่งจะสามารถปรับค่าของ  $K_p$  และ  $T_i$  แยกกันอย่างอิสระเป็นการศึกษาการนำตัวควบคุมสองตัวมาใช้ร่วมกัน

#### 3.4.1 การออกแบบวงจรตัวควบคุมแบบพีไอ

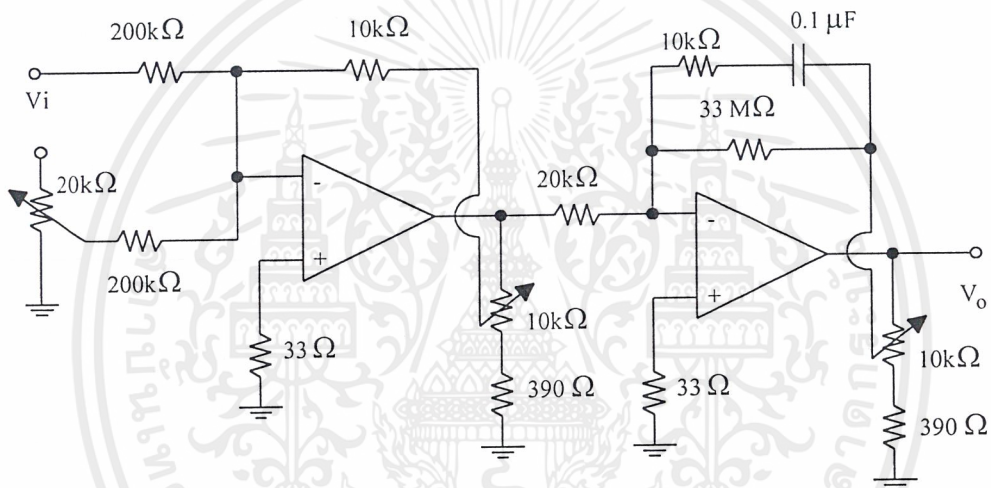
การออกแบบประกอบด้วยหลายส่วน ในส่วนของตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอ ออกแบบให้สามารถปรับค่า  $K_p$  และ  $T_i$  ได้ตามลำดับโดยการปรับความต้านทานปรับค่าได้มีการเพิ่มส่วนของวงจรรวมสัญญาณและวงจรกลับเฟสสัญญาณให้ถูกต้องตามลักษณะการต่อวงจรแบบมาตรฐานลักษณะสมการของตัวควบคุมพีไอ

$$\begin{aligned}
 V_0(s) &= K_p Vi(s) + \frac{K_p}{T_i \cdot s} Vi(s) \\
 &= K_p \frac{(s + 1/T_i)}{s}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การสร้างวงจร ตัวควบคุมแบบพีไอ

รูปที่ 3.4 แสดงวงจรตัวควบคุมพีไอ ที่ใช้งานจริง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นการเอาตัวควบคุมทั้งสองตัวมาต่ออนุกรมกัน สามารถปรับค่า  $K_p$  และค่า  $T_i$  ได้อย่างอิสระแยกจากกัน สามารถปรับค่า  $K_p$  ด้วย  $VR_7$  ซึ่งปรับค่า  $T_i$  ได้  $\times 0 \dots 1$  และสามารถปรับค่า  $T_i$  ได้โดยปรับ  $VR_8$  ซึ่งปรับค่า  $T_i$  ได้  $\times 0 \dots 0.1$  S และมีวงจรกลับเฟสสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตัวควบคุมไอ เพื่อจะมารวมสัญญาณกับตัวควบคุมพี ไอเอาต์พุตของวงจรตัวควบคุมแบบพีไอจะกลับเฟสกับอินพุต ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตเมื่อป้อนอินพุตเป็นสัญญาณพัลส์ จะมีผลของตัวควบคุมพีและตัวควบคุมไอรวมกัน โดยมีผลของตัวควบคุมพีก่อนและมีผลของตัวควบคุมไอรวมมา



รูปที่ 3.4 วงจรตัวควบคุมแบบพีไอ

### 3.5 วงจรระบบอันดับหนึ่ง

เป็นวงจรที่ใช้ในการจำลองคุณสมบัติของระบบอันดับหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานและคาปาซิเตอร์ต่อร่วมกัน ใช้ในการศึกษาระบบและใช้เป็นระบบจำลองในการควบคุมด้วยตัวควบคุมเพื่อศึกษาและสังเกตพฤติกรรมของการตอบสนอง

#### 3.5.1 การออกแบบวงจรระบบอันดับหนึ่ง

การออกแบบวงจรแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่สามารถเลือกค่า  $T$  (ช่วงเวลาที่) ได้ซึ่งมีค่า 0.1 ms, 0.5 ms และ 10 ms ซึ่งใช้สวิตช์ปรับค่าได้ ในการเลือก และส่วนที่สามารถปรับค่า  $T$  ได้ซึ่งใช้ความต้านทานปรับค่าได้ ในการปรับค่า

สมการของวงจรอันดับหนึ่ง

$$\frac{V_0(s)}{V_i(s)} = \frac{\omega C}{S + \omega C} \quad ; \quad \omega C = \text{Cut-off frequency} \quad (3.5)$$

เมื่อป้อนอินพุตเป็นยูนิตสเต็ป

$$V_0(S) = \frac{\omega C}{S(S + \omega C)} \quad (3.6)$$

$$v(t) = 1 - e^{-\omega C t}$$

$$v(t) = 1 - e^{-t/T}$$

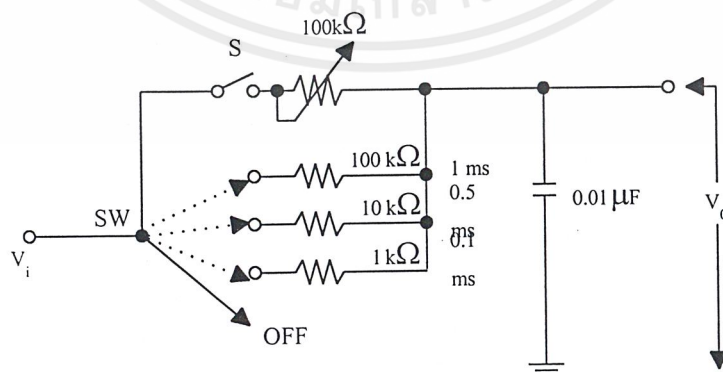
โดยที่

$$T = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{RC} \quad (3.7)$$

จะเห็นว่าสิ่งที่ปรับค่า T ก็คือการปรับค่า  $\omega C$  ด้วยนั่นเอง เราสามารถปรับค่า T โดยการปรับค่า R ซึ่งจะสะดวกกว่าการปรับค่า C

### 3.5.2 การสร้างวงจรระบบอันดับหนึ่ง

รูปที่ 3.5 แสดงวงจรระบบอันดับหนึ่งที่ใช้งานจริง ซึ่งจากวงจรจะเห็นว่าป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ สามารถปรับค่า ช่วงเวลาคงที่ได้ โดยการปรับค่าความต้านทาน



รูปที่ 3.5 วงจรระบบอันดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 วงจรระบบอันดับสอง

เป็นวงจรที่ใช้ในการทดลองคุณลักษณะอันดับสอง ซึ่งจากวงจรใช้ IC เบอร์ 741 ซึ่งเป็น ออปแอมป์เลือกค่าแอมป์ โดยการเลือกค่า C ค่าต่าง ๆ

#### 3.6.1 การออกแบบวงจรระบบอันดับสอง

การออกแบบแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 สามารถเลือกค่าแอมป์ ได้ ซึ่งมีค่าครีทีคอนแอมป์ , โอเวอร์แอมป์ และ ค่าออสซิลเลท ซึ่งมีค่า  $D = 1$  ,  $D > 1$  และ  $D = 0$  ตามลำดับ และส่วนที่ 2 สามารถเลือกค่าแอมป์ ได้ซึ่งมีค่า  $0 < D < 1$  คือ  $D = 0.1, 0.2, 0.5, 0.7$  โดยใช้ สวิตช์ปรับค่าได้ในการปรับเลือกค่าสมการวงจรอันดับสอง

$$\frac{V_0(S)}{V_i(S)} = \frac{1}{s^2 + \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 C_1 C_2} s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

เทียบสมการระบบอันดับสอง

$$\frac{V_0(S)}{V_i(S)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2D\omega_n s + \omega_n^2}$$

โดย 
$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.8)$$

$$D = \frac{R_1 + R_2}{2\sqrt{R_1 R_2}} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (3.9)$$

ถ้า  $R_1 = R_2 = R$

$$\omega_n = \frac{1}{R\sqrt{C_1 C_2}} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (3.11)$$

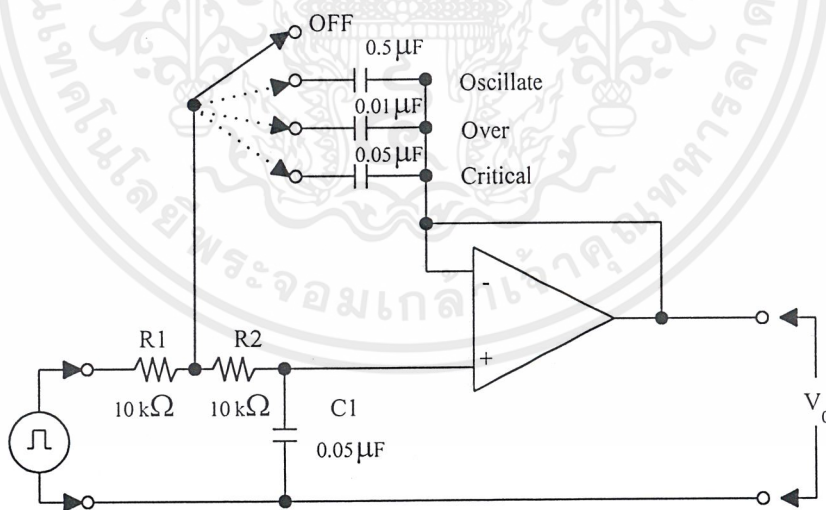
เราเลือกค่า  $R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 0.05 \mu\text{F}$  สำหรับส่วนที่ 1 และ  $C_1 = 0.002 \mu\text{F}$  สำหรับส่วนที่ 2 สมมติต้องการค่า  $D = 0.5$

$$0.5 = \sqrt{\frac{0.002 \times 10^{-6}}{C_2}}$$

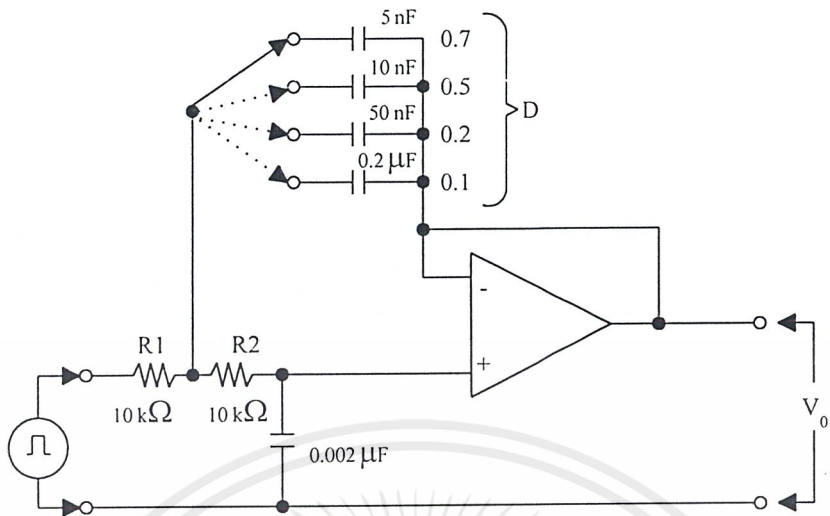
$$C_2 = 10 \mu\text{F} \text{ หรือ } 0.01 \mu\text{F}$$

### 3.6.2 การสร้างระบบอันดับสอง

รูปที่ 3.6 แสดงวงจรระบบอันดับสองที่ใช้งานจริงซึ่งก็คือวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ เราสามารถคำนวณค่าหรือปรับค่าแอมป์ โดยการปรับค่า  $C_2$  โดย  $C_1$  และ  $R$  ถูกเลือกให้คงที่ จะเห็นว่า  $C_1$  มี 2 ค่า เพื่อความเหมาะสมของวงจร กล่าวคือจะสามารถเห็นความแตกต่างของกราฟตอบสนองได้ชัดเจนกว่า



รูปที่ 3.6 วงจรระบบอันดับสองกรณีโอเวอร์แดมป์ , กรณีออสซิลเลท และกรณีครีทีคัลแดมป์



รูปที่ 3.7 วงจรระบบอันดับสองกรณีอินเวอร์เตอร์

### 3.7 วงจรรวมสัญญาณ

ใช้ในการรวมสัญญาณ ในกรณีต้องการใช้ตัวควบคุมหลาย ๆ ตัวต่อร่วมกันหรือการต่อเป็นระบบควบคุม ใช้ IC เบอร์ UA 741 และซึ่งเป็น IC ออปแอมป์

#### 3.7.1 การออกแบบวงจรรวมสัญญาณ

ใช้เป็นวงจรรวมสัญญาณ ที่มีเกนที่ขยาย เท่ากับ  $-1$  นั่นคือมีการกลับเฟสสัญญาณด้วย

ลักษณะสมการ 
$$V_0(s) = \frac{R_f}{R_1} V_1(s) + \frac{R_f}{R_2} V_2(s) + \dots + \frac{R_n}{R_m} V_n(s) \quad (3.12)$$

รวม 2 สัญญาณ 
$$V_0(s) = \frac{R}{R} V_1(s) + \frac{R}{R} V_2(s) \quad (3.13)$$

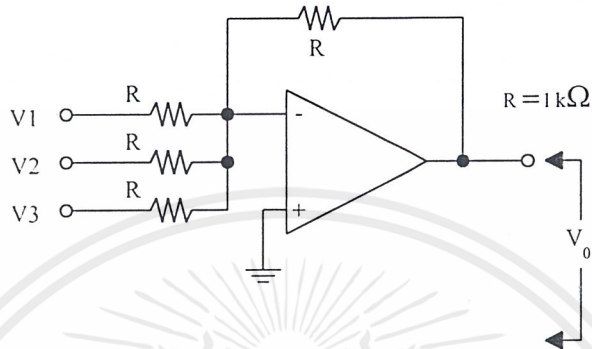
รวม 3 สัญญาณ 
$$V_0(s) = \frac{R}{R} V_1(s) + \frac{R}{R} V_2(s) + \frac{R}{R} V_3(s) \quad (3.14)$$

จะเห็นได้ว่าเราแค่เลือกค่าความต้านทานให้มีค่าเท่ากันทุกตัวในวงจรและต่อแบบรวมสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.2 การสร้างวงจรรวมสัญญาณ

รูปที่ 3.7 แสดงวงจรรวมสัญญาณซึ่งใช้ประโยชน์ ในการรวมสัญญาณมีเกณฑ์ขยายเท่ากับ  $-1$  ซึ่งสามารถอำนวยความสะดวกในการรวมสัญญาณในการต่อใช้งานในการทดลอง



รูปที่ 3.8 วงจรรวมสัญญาณ

### 3.8 วงจรขยายแบบกลับเฟส

สร้างจากวงจรขยายแบบกลับเฟสโดยใช้ IC ออปแอมป์เพื่อใช้ประโยชน์ในการกลับสัญญาณในการต่อวงจรที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.8.1 การออกแบบวงจรขยายแบบกลับเฟส

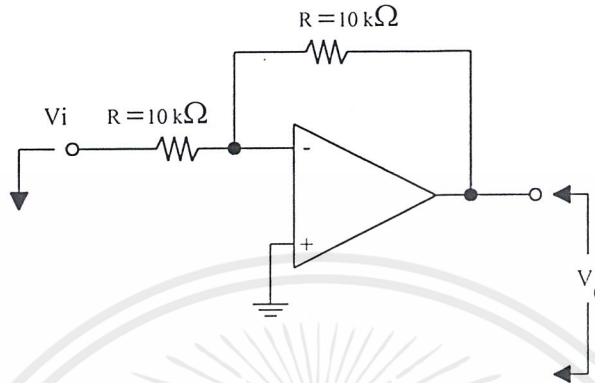
วงจรขยายแบบกลับเฟสที่มีมีเกณฑ์ขยายเท่ากับ  $-1$  ออกแบบโดยง่ายเพียงต่อความต้านทานอินพุตและความต้านทานป้อนกลับรวมกับออปแอมป์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$V_0(s) = -\frac{R_f}{R_i} \cdot V_i(s) \quad (3.15)$$

$$V_0(s) = -\frac{R}{R} \cdot V_i(s)$$

### 3.8.2 การสร้างวงจรขยายแบบกลับเฟส

รูปที่ 3.8 แสดงวงจรขยายแบบกลับเฟสที่มีเกนขยายเท่ากับ 1 ที่ใช้งานจริง



รูปที่ 3.9 วงจรขยายแบบกลับเฟส

### 3.9 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ และสัญญาณสามเหลี่ยม

สร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยม เพื่อเป็นสัญญาณที่ป้อนเป็นอินพุตของวงจรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ใช้ IC เบอร์ XR 2206 ซึ่งสามารถกำเนิดสัญญาณได้ทั้งสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยม

#### 3.9.1 การออกแบบวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยม

เราสามารถปรับค่าความถี่โดยการปรับค่า VR สัญญาณพัลส์จะออกที่ขา 11 และสัญญาณสามเหลี่ยมจะออกที่ขา 2 โดยความถี่ที่ใช้คือ 10Hz - 10 kHz

$$f_0 = \frac{1}{RC} \quad (3.16)$$

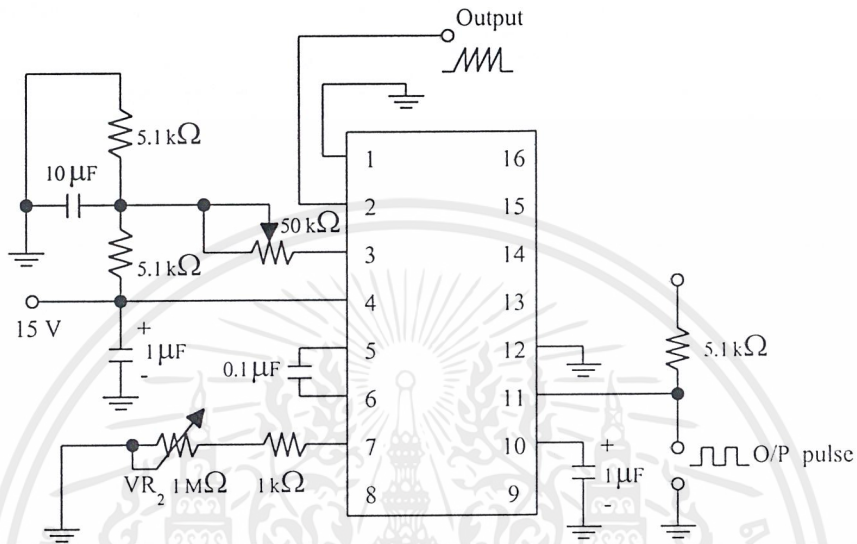
เลือก  $C = 0.1 \mu\text{F}$

เลือก  $VR = 1 \text{ M}\Omega$

ดังนั้นสามารถปรับความถี่ได้ช่วง 10 Hz - 10 kHz

### 3.9.2 การสร้างวงจร กำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยม

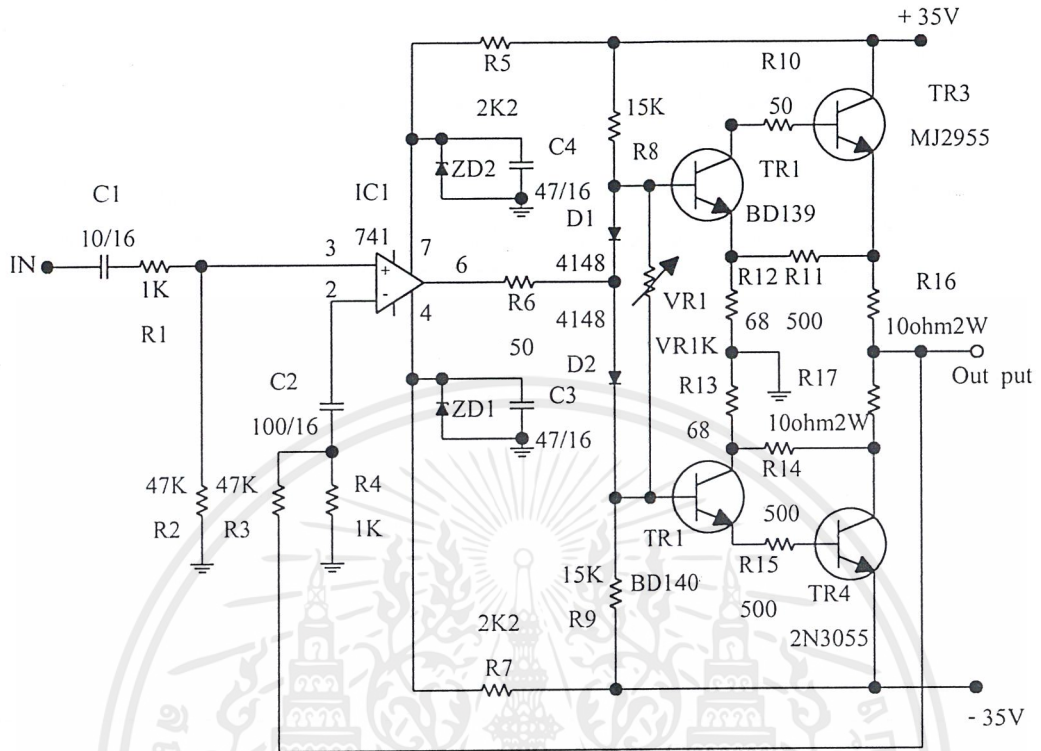
รูปที่ 3.9 แสดงวงจร กำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้งานจริง ซึ่งเป็นวงจรที่สร้างง่าย คุณภาพของสัญญาณที่ออกมาดีพอสมควรใช้แหล่งจ่าย 15 V



รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และสัญญาณสามเหลี่ยม

### 3.10 วงจรไดร์เวอร์

ใช้ในการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สัญญาณเข้าวงจรผ่านไอซีเบอร์ 17741 ทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์ 2 ข้างต่อแบบพหุขพูล ซึ่กบวักใช้ ทรานซิสเตอร์เบอร์ BD140 และ ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3055 ต่อแบบคาร์ลิงตันและซึ่กบใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MJ2955 และ ทรานซิสเตอร์เบอร์ BD139 ต่อแบบคาร์ลิงตันมีความต้านทานปรับค่าได้ 1 kΩ เป็นความต้านทานปรับค่ากระแสไอเดิล (กระแสในสภาวะการทำงานปกติ)



รูปที่ 3.11 วงจรไดร์เวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

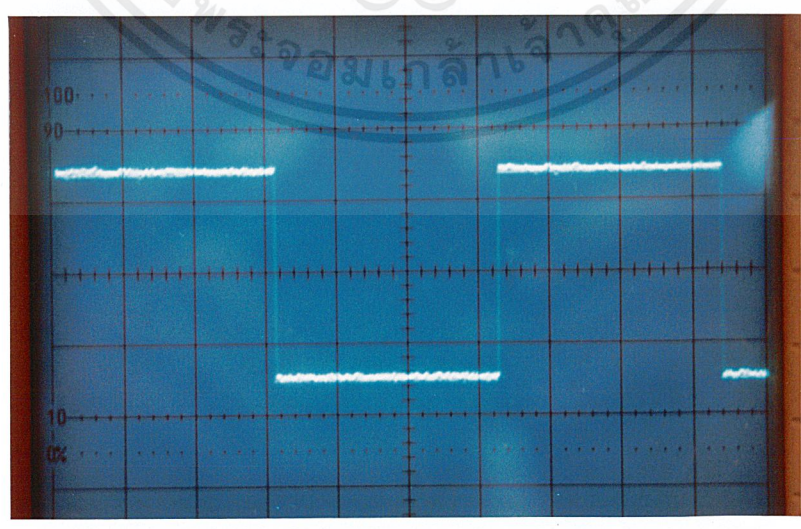
ในการทดลองชุดทดลองใช้เพียงออสซิลโลสโคปเท่านั้นในการต่อร่วมเพื่อวัดสัญญาณ โดยแบ่งการทดลอง ได้แก่ การทดลองผลตอบสนองของตัวควบคุมพี ต่ออินพุตพัลส์และอินพุตแรมพ์ ที่ค่า  $K_p$  ต่าง ๆ ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบไต่ออินพุตพัลส์และอินพุตแรมพ์ ที่ค่า  $T_i$  ต่าง ๆ ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดีต่ออินพุตพัลส์และแรมพ์ ที่ค่า  $T_d$  ต่าง ๆ ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอ,ตัวควบคุมแบบพีดีและตัวควบคุมพีไอดีต่ออินพุตพัลส์ และผลตอบสนองของอันดับหนึ่งและอันดับสอง ต่ออินพุตพัลส์ และที่ค่าแกมมาค่าต่าง ๆ

#### 4.1 การทดลองและผลการทดลองของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ

##### 4.1.1 ลำดับขั้นการทดลอง

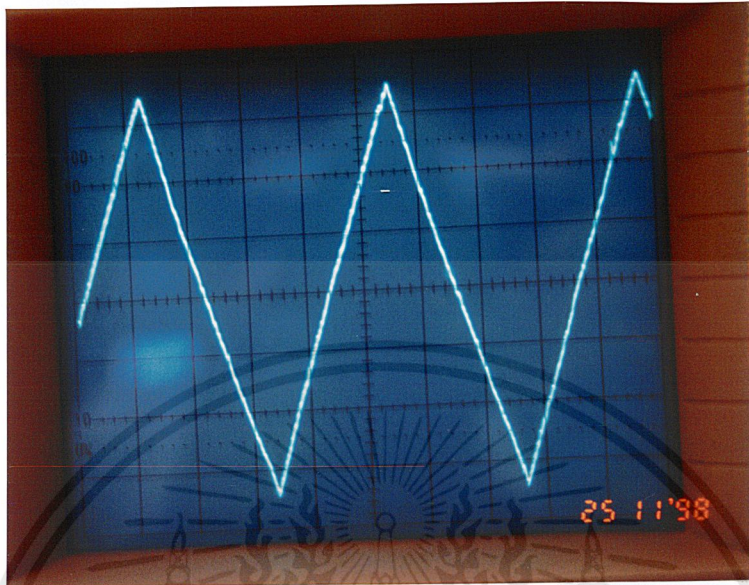
1. ต่อบริเวณที่ต้องการจะทดสอบ โดยป้อนพัลส์และแรมพ์เป็นอินพุตที่ขนาด 1 Vp-p ความถี่ประมาณ 100 Hz
2. วัดสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคปที่เอาต์พุตของวงจรต่าง ๆ

##### 4.1.2 ผลการทดลอง

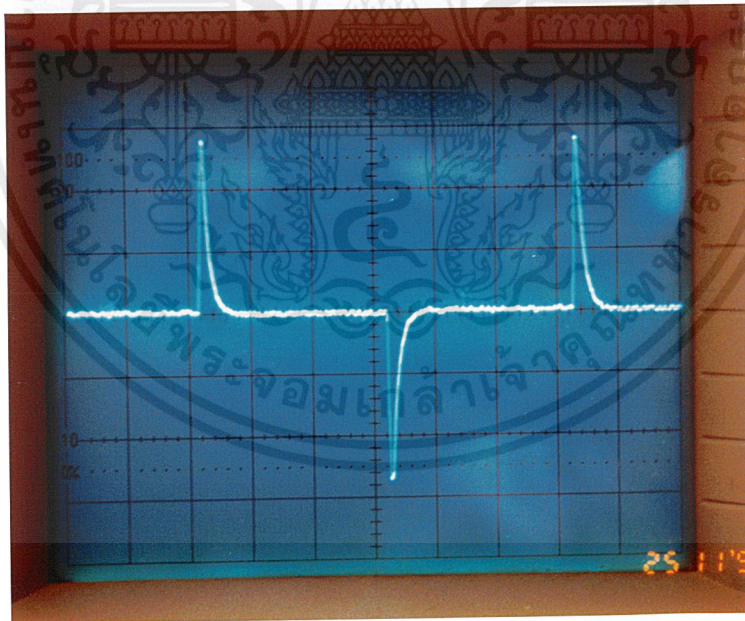


รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

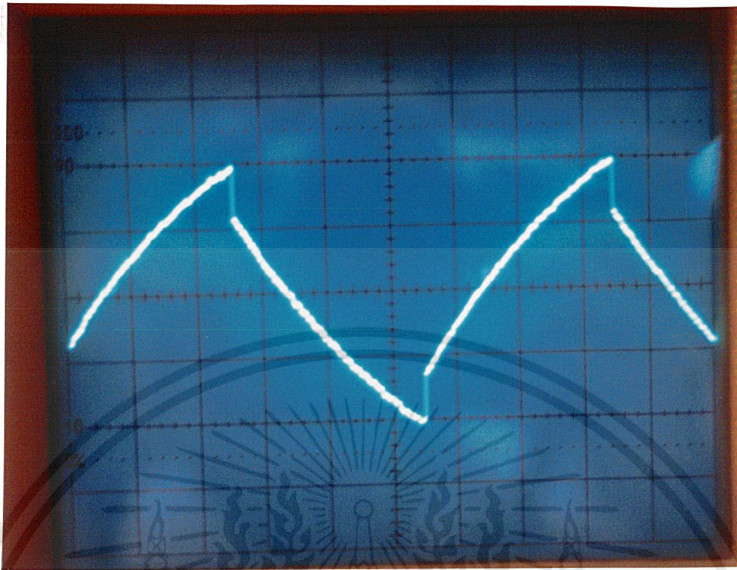


รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ

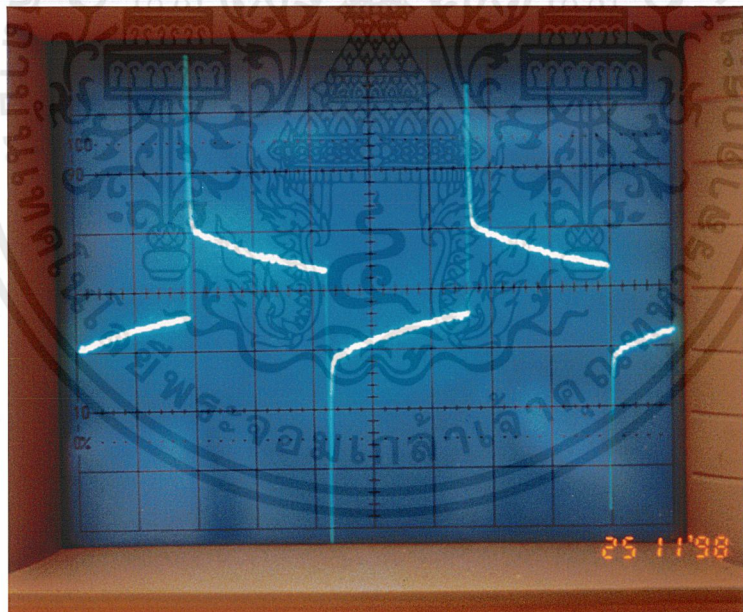


รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

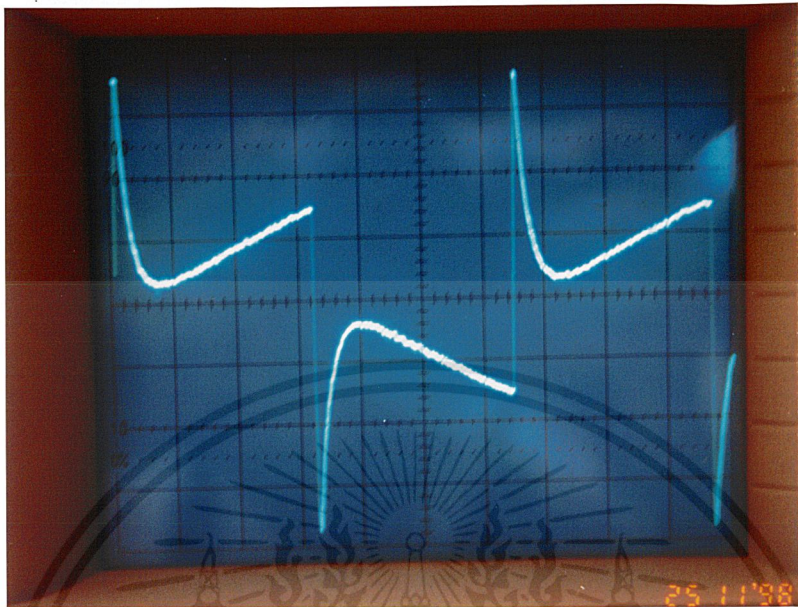


รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมพีและไอ

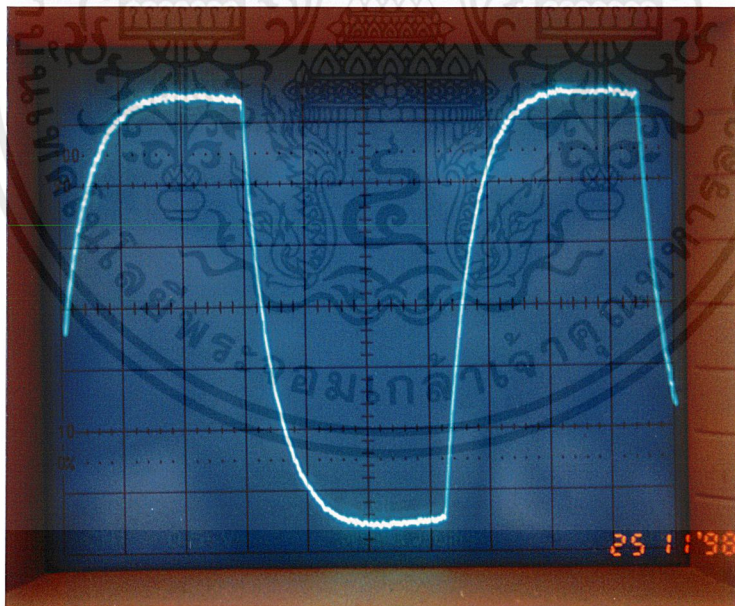


รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของตัวควบคุมพีและดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

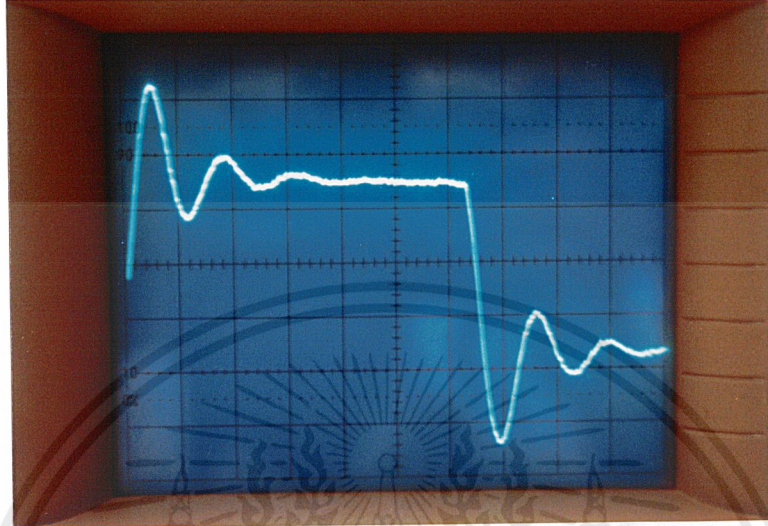


รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองระบบอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# บทสรุป ปัญหาแนวทางการแก้ไขและพัฒนา

### 5.1 บทสรุป

ชุดทดลองตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งจัดทำขึ้นเป็น 2 ชุดด้วยกัน คือ

1. บอร์ดพีไอดี ซึ่งประกอบด้วย ตัวควบคุมพี, ตัวควบคุมไอและตัวควบคุมดี วงจรรวมสัญญาณ วงจรระบบอันดับหนึ่ง วงจรระบบอันดับสอง วงจรขยาย เพื่อความสะดวกในการทดลอง เราสามารถสร้างตัวควบคุมตัวอื่นจากบอร์ดทดลองนี้เช่น พีไอ, พีดี, พีไอดี ซึ่งเกิดจากการต่อรวมหรือขนานกัน และยังสามารถต่อวงจรศึกษาลักษณะนำตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ดังกล่าวแล้วไปควบคุมระบบซึ่งจำลองขึ้นมา ซึ่งก็คือระบบอันดับหนึ่งและระบบอันดับสอง ซึ่งวงจรทุกวงจรสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ในการนำไปใช้งาน เพื่อผลตอบสนอง ภายในบอร์ดนี้ยังอำนวยความสะดวกโดยการมี วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์และวงจรกำเนิดสัญญาณแรมป์ มีความถี่ประมาณ 10 Hz – 10 kHz เพื่อใช้เป็นอินพุตของวงจรต่าง ๆ ที่จะทดลอง

2. บอร์ดมอเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีทาโคเจนเนอร์เตอร์ในตัววงจรได้และมีโวลต์มิเตอร์ ให้สำหรับการใช้ร่วมกันกับบอร์ดพีไอดี ในลักษณะต่าง ๆ

### 5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการจัดทำโครงการ

ในการจัดทำโครงการชุดทดลองนี้ สามารถที่จะสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. การทำชุดทดลองนี้เกี่ยวข้องกับย่านความถี่ใช้งาน ดังนั้นการออกแบบต้องใช้คณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนพอสมควรออกแบบเพื่อให้ผลของรูปคลื่นชดเชยในย่านความถี่ที่ต้องการต้องออกแบบโดยคำนึงถึงค่าความถี่คัทออฟด้วย

2. การออกแบบชุดทดลองเพื่อให้สามารถทดลองได้ครอบคลุมเนื้อหาหรือเนื้อเรื่องที่ต้องการทำให้เสียเวลาและยุ่งยากพอสมควร ยังต้องคำนึงถึงความสวยงาม การนำไปใช้และง่ายต่อความเข้าใจ

### 5.3 แนวทางการแก้ไขและพัฒนา

แนวทางการแก้ไขและพัฒนาชุดทดลองมีดังนี้

1. การออกแบบลายวงจร ควรออกแบบรวมอยู่ในแผ่นเดียวกันเพราะจะทำให้ปัญหาเรื่องความคมชัดของสัญญาณหายไปเมื่อลงกล่อง
2. ควรจะเพิ่มเติมอุปกรณ์ประยุกต์มากกว่านี้ เช่น การควบคุมตำแหน่ง ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อการควบคุมที่กว้างขวางขึ้น





ภาคผนวก ก.

ใบงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

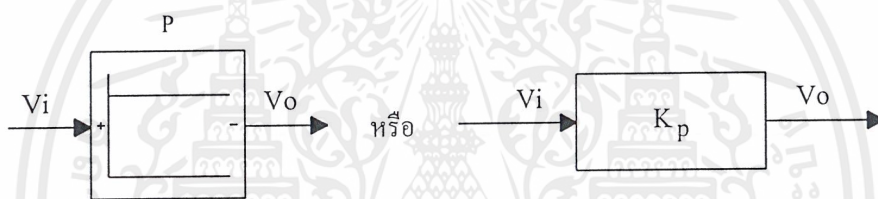
# การทดลองที่ 1

## ตัวควบคุมแบบพี ( P Controller )

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงลักษณะพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบพี
2. เข้าใจถึงค่า Proportional action factor ( $K_p$ )
3. เข้าใจถึงลักษณะกราฟตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

### บทวิเคราะห์



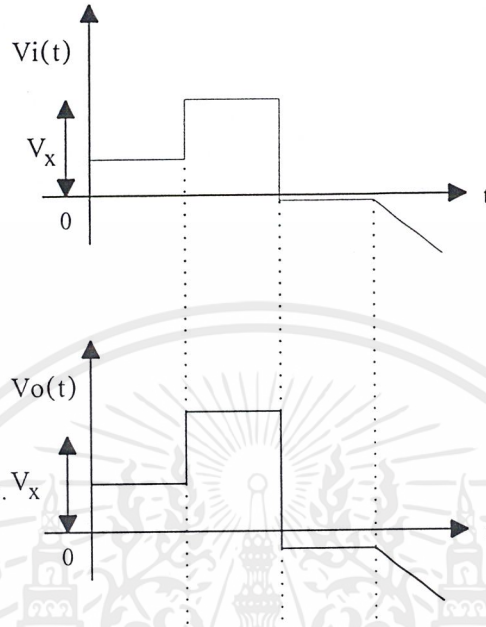
รูปที่ 1.1 บล็อกไคอะแรมของตัวควบคุมแบบพี

### สมการของตัวควบคุมแบบพี

$$v_o(t) = K_p \cdot v_i(t) \quad (1.1)$$

$K_p$  คือค่าตัวประกอบกิริยาของตัวควบคุมแบบพีซึ่งจะมีค่า  $K_p \geq 0$  หรือ  $K_p \leq 0$  ก็ได้ ในทางอุดมคติแล้วค่า  $K_p$  จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่แต่ในความจริงแล้ว  $K_p$  มักจะเป็นระบบอันดับหนึ่ง แต่มีความถี่ของโพลที่สูงกว่าโพลอื่น ๆ ในระบบมาก ๆ จึงสามารถละเลยโพลเนื่องจากตัวควบคุมแบบพีได้

## พิจารณาสัญญาณเอาต์พุต

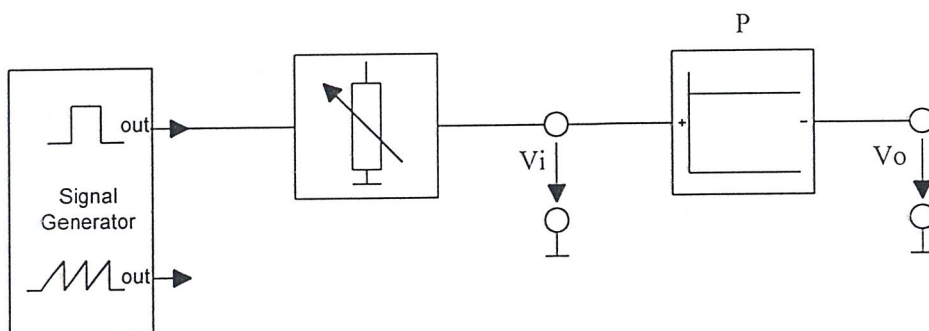


รูปที่ 1.2 กราฟตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี เมื่อค่า  $K_p > 0$

หากค่า  $K_p < 0$  กราฟตอบสนองก็จะกลับกันกับรูปที่แสดง จะเห็นว่ากราฟตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีจะมีลักษณะเหมือนกับอินพุตทุกประการแต่จะมีขนาดสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับสัญญาณอินพุตคูณกับค่า  $K_p$

## เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอดี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



รูปที่ 1.3 การต่อวงจรทดลองของตัวควบคุมแบบพี

## ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูป
2. ปรับค่าอินพุตพัลส์ เท่ากับ 1Vp-p ตามที่ประมาณ 100 Hz
3. เลือก S1 ไปยังตำแหน่ง OFF ตั้งค่า  $K_p = 1, 5$  และ 10
4. บันทึกค่า  $v_o(t)$  ลงในตารางที่ 1
5. ตั้งค่า  $K_p = 5$  ปรับค่าอินพุตพัลส์ เท่ากับ 0.5 Vp-p , 1Vp-p และ 2Vp-p บันทึกค่า  $v_o(t)$  ลงในตารางที่ 2
6. บันทึกค่าสัญญาณ  $v_o(t)$  เทียบกับ  $v_i(t)$  ที่  $K_p = 0.5$  ,  $V_i(t) = 2Vp-p$

## ตารางที่ 1

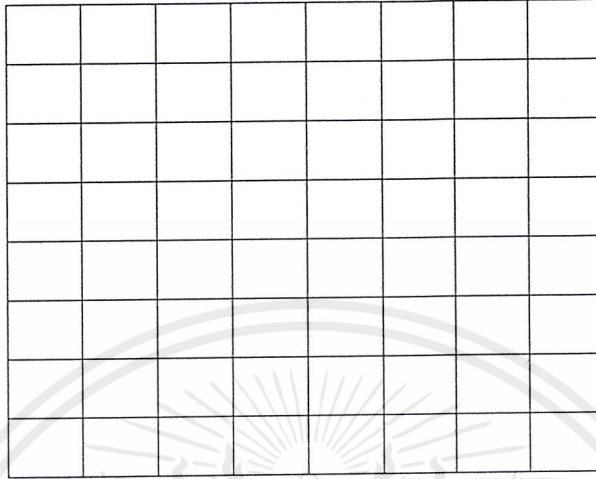
Proportional action factor $K_p$	1	5	10
$v_i(t)$ ( $\approx 100$ Hz)	1Vp-p	1Vp-p	1Vp-p
$v_o(t)$			

## ตารางที่ 2

$v_i(t)$ ( $\approx 100$ Hz)	0.5 Vp-p	1Vp-p	2Vp-p
Proportional action factor $K_p$	5	5	5
$v_o(t)$			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ  $v_o(t)$  เทียบกับ  $v_i(t)$  ที่ค่า  $K_p = 0.5$



$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



---



---

คำถามท้ายการทดลอง

1. ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตของ ตัวควบคุมแบบพี เป็นเช่นไรเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต
2. หากป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแรมป์เอาต์พุตจะเป็นเช่นไร
3. เมื่อตั้งค่าอินพุตคงที่แล้วเปลี่ยนค่า  $K_p$  ค่าต่าง ๆ ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตเป็นเช่นไร

## การทดลองที่ 2

### ตัวควบคุมแบบไอ ( I Controller )

#### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงลักษณะพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบไอ
2. เข้าใจถึงค่า Integration time ( $T_I$ )
3. เข้าใจลักษณะกราฟตอบสนองของตัวควบคุมแบบ ไอ

#### บทวิเคราะห์



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของ ตัวควบคุมแบบไอ

#### สมการของตัวควบคุมแบบไอ

$$v_o(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t v_i(t) dt + v_o(0) \quad (2.1)$$

$$V_o(s) = \frac{1}{T_I \cdot s} \cdot V_i(s) \quad (2.2)$$

$$V_o(s) = \frac{K_I}{s} \cdot V_i(s) \quad (2.3)$$

เมื่อค่า  $K_I = \frac{1}{T_I}$  เมื่อ  $T_I$  คือค่า Integrating Time Constant

### คุณสมบัติที่สำคัญของตัวควบคุมแบบไอ

1. หากอินพุตไม่เท่ากับ 0 จะเกิดการอินทิเกรตและเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตไปเรื่อย ๆ
2. หากอินพุตเท่ากับ 0 จะไม่เกิดการอินทิเกรตซึ่งทำให้อาต์พุตมีค่าคงที่ไปเรื่อย ๆ
3. เป็นวงจรถดเชยแบบล่าช้า เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่
4. เกณฑ์ทางไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอินฟินิตี้

พิจารณาสัญญาณเอาต์พุตจากอินพุตสัญญาณพัลส์ ( $\Delta V_i$ ) จากสมการที่ (1)

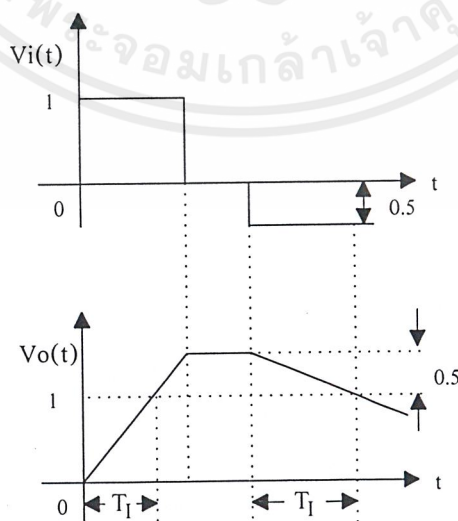
โดยที่  $\Delta V_o = V_o(t_2) - V_o(t_1)$ ,  $t_2 > t_1$

$$\begin{aligned}\Delta V_o &= \frac{1}{T_I} (\Delta V_i) t \\ &= K_I (\Delta V_i) t\end{aligned}\quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 เมื่อเวลาผ่านไปจนเวลา  $t = T_I$  จะได้ว่า  $\Delta V_o = \Delta V_i$  กล่าวคือ  $T_I$  คือเวลาที่ขนาดของเอาต์พุตเปลี่ยนไปจนมีขนาดเท่ากับขนาดของสัญญาณอินพุตพัลส์ และยังพิจารณาได้จากสัญญาณอินพุตพัลส์จะได้ผลตอบสนองเอาต์พุตเป็นแรมป์ โดยมีความชัน(slope)เท่ากับ

$$\text{slop} = \frac{\Delta V_i}{T_I}$$

### พิจารณาสัญญาณเอาต์พุต

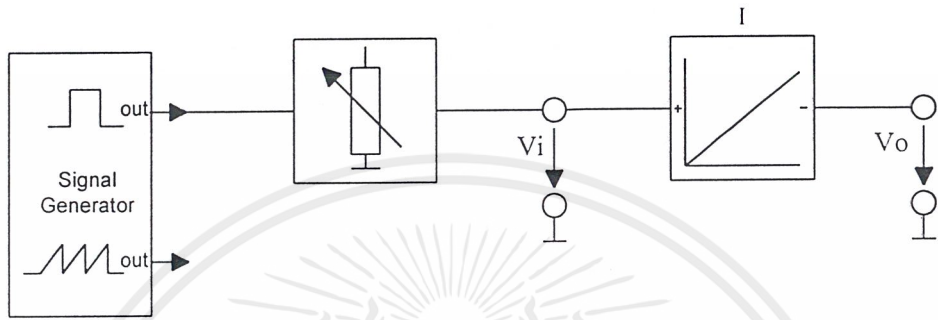


รูปที่ 2.2 กราฟตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอดี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



รูปที่ 2.3 การต่อวงจรทดลองของตัวควบคุมแบบไอ

### ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรคิงรูป
2. ป้อนค่าอินพุตพัลส์ เท่ากับ  $1V_{p-p}$  ความถี่ประมาณ  $100\text{ Hz}$
3. เลือก S2 ไปยังตำแหน่ง OFF ตั้งค่า  $T_I = 0.1\text{ ms}, 1\text{ ms}, 10\text{ ms}$
4. บันทึกค่า  $K_I$  ลงในตารางที่ 1
5. ตั้งค่า  $T_I = 0.1\text{ ms}$  ปรับค่าสัญญาณอินพุตพัลส์ เท่ากับ  $0.5 V_{p-p}, 1 V_{p-p}$  และ  $2 V_{p-p}$  บันทึกค่า  $v_o(t)$  ลงในตารางที่ 2
6. บันทึกค่า  $v_o(t)$  เทียบกับ  $v_i(t)$  ที่  $T_I = 0.1\text{ ms}, v_i(t) = 1 V_{p-p}$

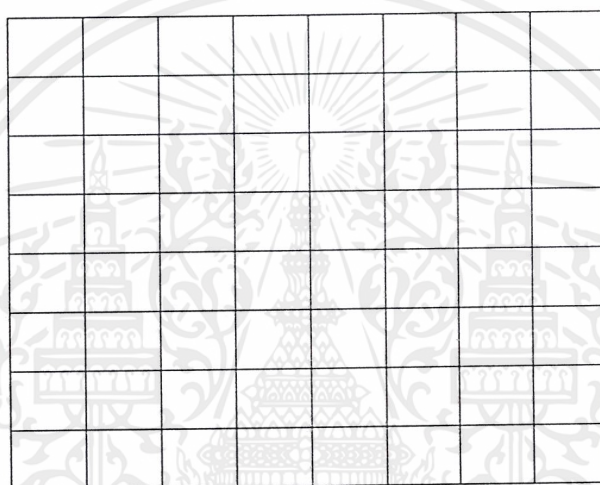
### ตารางที่ 1

Integration time $T_I$	0.1ms	1 ms	10 ms
$v_i(t)$ ( $\approx 100\text{ Hz}$ )	1Vp-p	1Vp-p	1Vp-p
$v_o(t)$			
$K_I$			

ตารางที่ 2

$v_i(t)$ ( $\approx 100$ Hz)	0.5Vp-p	1Vp-p	2Vp-p
Integration time $T_I$	0.1ms	0.1ms	0.1ms
$v_o(t)$			
$K_I$			

สัญญาณ  $v_o(t)$  เทียบกับ  $v_i(t)$  ที่  $T_I = 0.5$ ms



$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



---



---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คำถามท้ายการทดลอง

1. ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบไอ เมื่อเทียบกับอินพุต
2. เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นแรมป์ เอาต์พุตจะเป็นอย่างไร
3. เมื่อตั้งค่า  $v_i(t)$  คงที่แล้วปรับค่า  $T_I$  ที่ค่าต่าง ๆ ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นเช่นไร



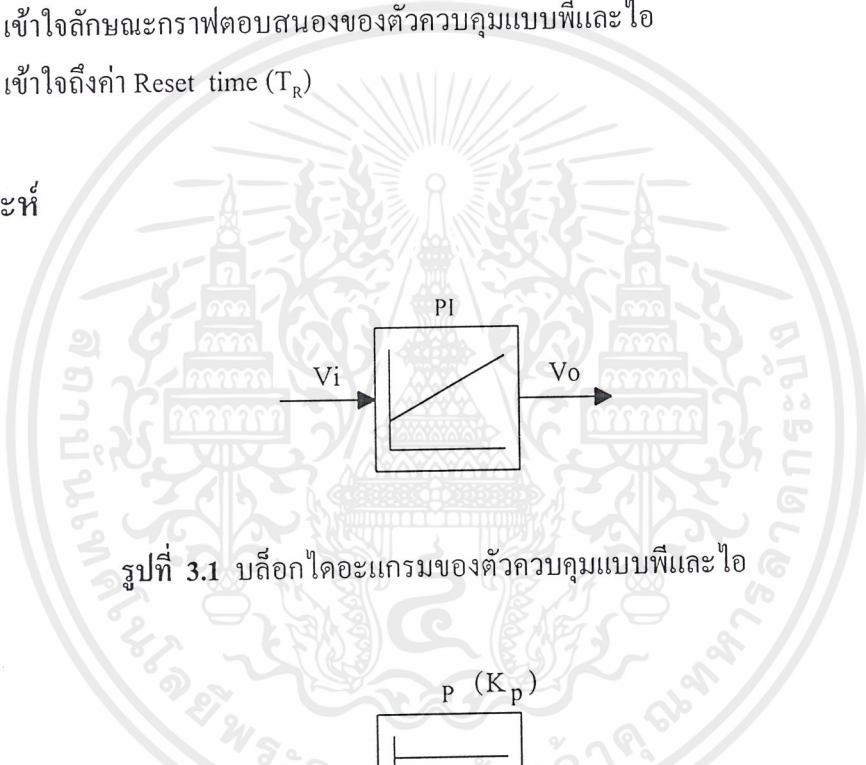
## การทดลองที่ 3

### ตัวควบคุมแบบพีและไอ (PI Controller)

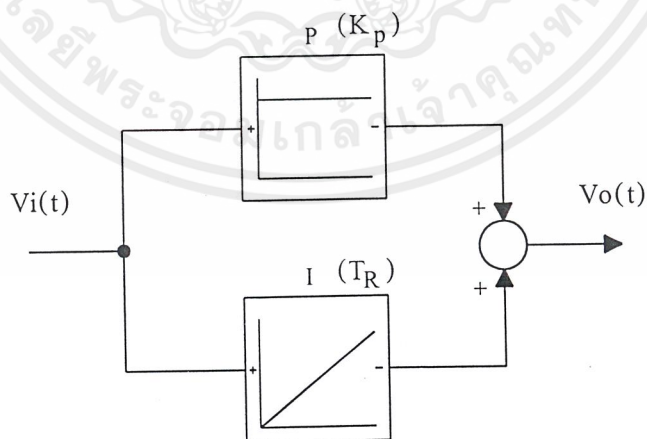
#### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบพีร่วมกับไอ
2. เข้าใจถึงการควบคุมเมื่อรวมพีและไอ
3. เข้าใจลักษณะกราฟตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีและไอ
4. เข้าใจถึงค่า Reset time ( $T_R$ )

#### บทวิเคราะห์



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีและไอ



รูปที่ 3.2 PI จากการต่อขนาน P และ I

กำหนดให้  $T_R$  แทนค่า Reset time ซึ่งก็คือ ค่า  $T_I$  ของตัวควบคุมแบบไอเดิมนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปสมการ

$$v_o(t) = K_p \cdot v_i(t) + \frac{1}{T_R} \int_0^t v_i(t) dt + v_o(0) \tag{3.1}$$

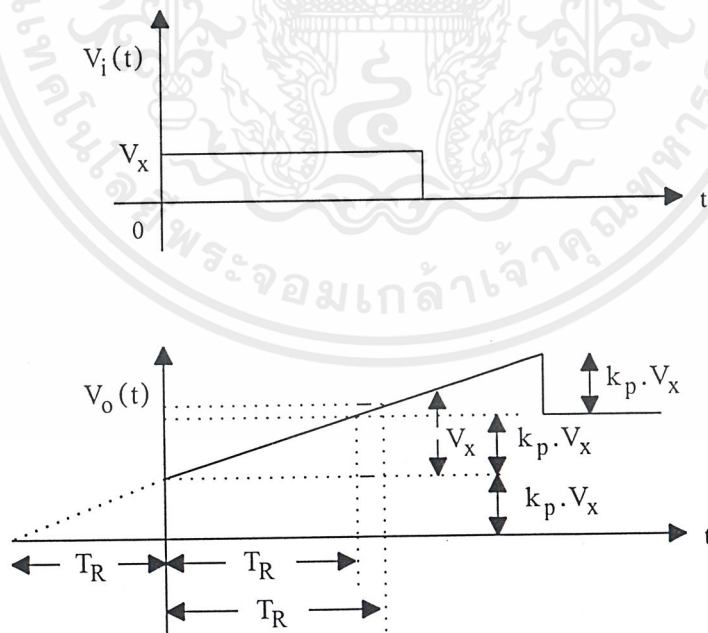
$$V_o(s) = K_p \cdot V_i(s) + \frac{1}{T_R \cdot s} \cdot V_i(s) \tag{3.2}$$

$$V_o(s) = \left[ K_p + \frac{1}{T_R \cdot s} \right] V_i(s) \tag{3.3}$$

$$R(s) = \frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{K_p \cdot T_R \cdot s + 1}{T_R \cdot s} = K_p \frac{s + (1/K_p \cdot T_R)}{s} \tag{3.4}$$

จากสมการที่ (4) จะเห็นว่าเราได้เกณฑ์ของตัวควบคุมคือ  $K_p$  ได้อินทิเกรต 1 ตัว และมีซีโร ที่  $-1/K_p \cdot T_R$  จะเห็นว่าการปรับค่าซีโรปรับค่อนข้างยากเพราะขึ้นอยู่กับค่า  $K_p$  และ  $T_R$

พิจารณาสัญญาณเอาต์พุต

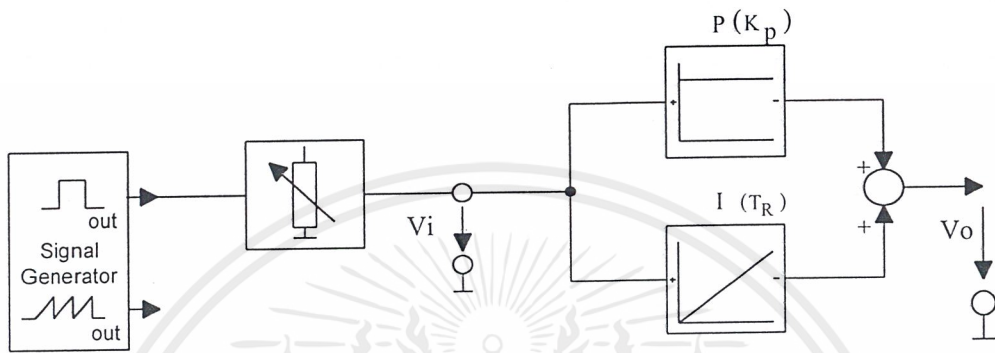


รูปที่ 3.3 กราฟตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอดี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



รูปที่ 3.4 การต่อวงจรทดลองของตัวควบคุมแบบพีไอ

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูปปรับค่าอินพุตพัลส์ 1Vp-p ตามที่ประมาณ 100 Hz
2. เลือก S1 และ S2 ไปยัง OFF ตั้งค่า  $K_p = 5$  แล้วปรับค่า  $T_i = 0.1\text{ms}$ , 1 ms และ 10 ms บันทึกค่าในตารางที่ 1
3. ตั้งค่า  $T_i = 0.1\text{ms}$  ปรับค่า  $K_p = 1, 5$  และ 10 บันทึกค่าในตารางที่ 2
4. บันทึกสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับอินพุตที่  $v_i(t) = 1\text{Vp-p}$ ,  $K_p = 1$ ,  $T_i = 0.1\text{ms}$

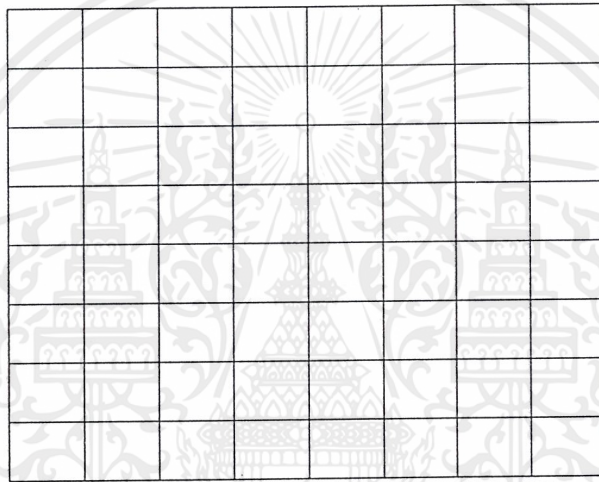
ตารางที่ 1

$K_p$	5	5	5	
$T_i$	0.1 ms	1 ms	10 ms	
$V_o(s)$				
$T_R$				

## ตารางที่ 2

$T_I$	0.1ms	0.1ms	0.1ms	
$K_p$	1	5	10	
$V_o(t)$				
$T_R$				

$v_i(t)$  เทียบกับ  $v_o(t)$  ที่  $K_p = 1, T_I = 0.1\text{ms}$



$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

## สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



---



---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คำถามท้ายการทดลอง

1. เมื่อตั้งค่า  $K_p$  คงที่ แล้วปรับค่า  $T_i$  ลักษณะกราฟจะเป็นเช่นไร
2. เมื่อตั้งค่า  $T_i$  คงที่ แล้วปรับค่า  $K_p$  ลักษณะกราฟจะเป็นเช่นไร
3. เปรียบเทียบลักษณะของความชันของสัญญาณในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 มีความต่างกันหรือไม่อย่างไร



## การทดลองที่ 4

### ตัวควบคุมแบบดี ( Derivative Controller)

#### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงลักษณะตัวควบคุมแบบดี
2. เข้าใจลักษณะกราฟเอาต์พุตต่ออินพุตพัลส์ และอินพุตแรมป์
3. เข้าใจถึงค่า Differential action time ( $T_D$ )

#### บทวิเคราะห์



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบดี

สมการ

$$v_o(t) = T_D \frac{d}{dt} v_i(t) \quad (4.1)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = T_D \cdot S \quad (4.2)$$

$T_D$  : Differential action time

คุณสมบัติ จะให้สัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงเท่านั้น นั่นคือถ้าอินพุตเป็นค่าคงที่ จะได้เอาต์พุตเป็น 0 ตามคุณสมบัติของดิฟเฟอเรนเชียลคั้งนั้นเราจึงไม่นิยมใช้ ตัวควบคุมแบบดีนี้ ตัวเดียวในการควบคุม

พิจารณาเอาต์พุตจากอินพุต แรมป์

$$\text{จากสมการที่ (1) ให้ } v_i(t) = V_x \cdot t \text{ เมื่อ } t \geq 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

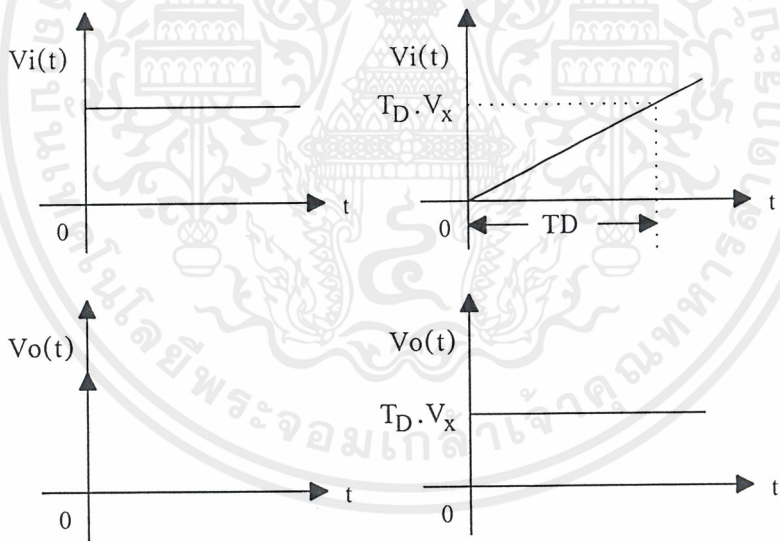
จะได้ 
$$v_o(t) = T_D \cdot V_x \tag{4.3}$$

จากสมการที่ (3) จะเห็นว่าจะได้เอาต์พุตเป็นพัลส์มีขนาดเท่ากับ  $T_D \cdot V_x$   
พิจารณาเอาต์พุตจากอินพุตพัลส์

จากสมการ (1) ให้  
จะได้ 
$$v_o(t) = T_D \cdot V_x \cdot \delta(t) \tag{4.4}$$

จากสมการที่ (4) จะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นอิมพัลส์ซึ่งมีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ  $T_D \cdot v_x$   
(โดยที่อิมพัลส์มีขนาดเป็นอินฟินิตี้และมีพื้นที่เป็น 1)

พิจารณาสัญญาณเอาต์พุต

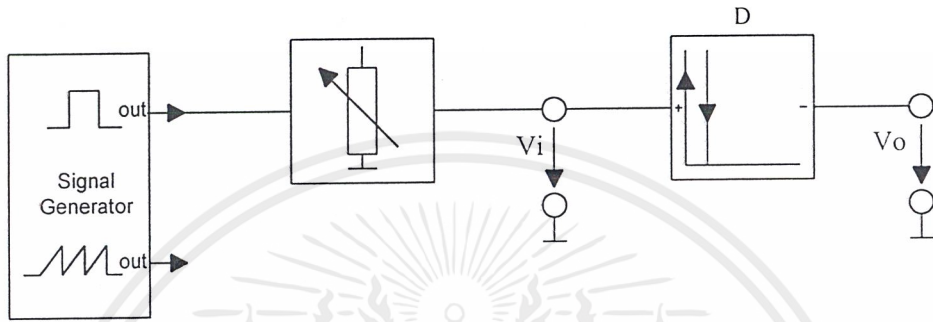


(ก) กราฟตอบสนองต่ออินพุตพัลส์ (ข) กราฟตอบสนองต่ออินพุตแรมป์

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลตอบสนองต่ออินพุตแบบพัลส์และอินพุตแบบแรมป์

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอซี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



รูปที่ 4.3 การต่อวงจรทดลองของตัวควบคุมแบบดี

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูป
2. ปรับอินพุตพัลส์ ขนาด 1Vp-p ตามที่ประมาณ 100 Hz
3. ปรับค่า S3 ไปยังตำแหน่ง OFF ตั้งค่า  $T_D = 0.1\text{ms}$  , 1 ms และ 10 ms บันทึกค่าลงในตารางที่ 1
4. ปรับอินพุตเป็นแรมป์ ขนาด 1Vp-p ตามที่ประมาณ 100 Hz
5. ตั้งค่า  $T_D = 0.1\text{ms}$  , 1 ms และ 10 ms บันทึกค่าในตารางที่ 1
6. บันทึกผลตอบสนองต่ออินพุตพัลส์และอินพุตแรมป์เทียบกับเอาต์พุต  $T_D = 0.1\text{ ms}$  ,  $v_i(t) = 1\text{ Vp-p}$

ตารางที่ 1

V pulse ( $\approx 100\text{Hz}$ )	1Vp-p	1Vp-p	1Vp-p	
Differential action time $T_D$	0.1ms	1 ms	10 ms	
$v_o(t)$				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ผลตอบสนองต่ออินพุตพัลส์ที่ค่า  $T_D = 0.1 \text{ ms}$


ผลตอบสนองต่ออินพุตแรมป์ที่ค่า  $T_D = 0.1 \text{ ms}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



---

### คำถามท้ายการทดลอง

1. ทำไมจึงไม่นิยมใช้ตัวควบคุมแบบตีเดี่ยว ๆ ในการควบคุม
2. ปรับค่า  $T_D$  ที่ค่า ต่าง ๆ ลักษณะกราฟตอบสนองเป็นอย่างไรต่ออินพุตพัลส์และแรมปี



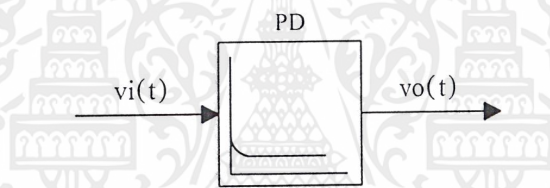
## การทดลองที่ 5

### ตัวควบคุมแบบพีและดี ( PD Controller )

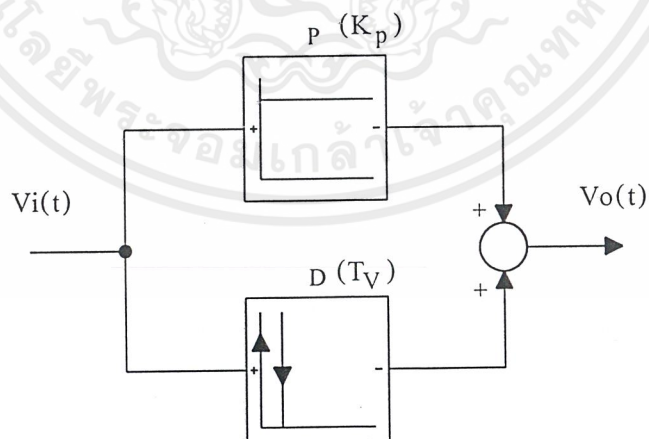
#### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงลักษณะพฤติกรรมเมื่อพีรวมกับดี
2. เข้าใจถึงลักษณะควบคุมเมื่อพีรวมกับดี
3. เข้าใจถึงลักษณะกราฟตอบสนองเอาต์พุตของพีและดี
4. เข้าใจถึงค่า Derivative action time ( $T_V$ )

#### บทวิเคราะห์



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีดี



รูปที่ 5.2 ตัวควบคุมแบบพีดีสร้างจากการต่อขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนด  $T_V$  แทนค่า Phase advance หรือ Present time constant ซึ่งก็คือค่า Derivential time constant เดิมนั่นเอง

สมการ 
$$v_o(t) = K_p \cdot v_i(t) + T_V \frac{d}{dt} v_i(t) \tag{5.1}$$

$$= K_p \cdot V_i(s) + T_V \cdot S V_i(s) \tag{5.2}$$

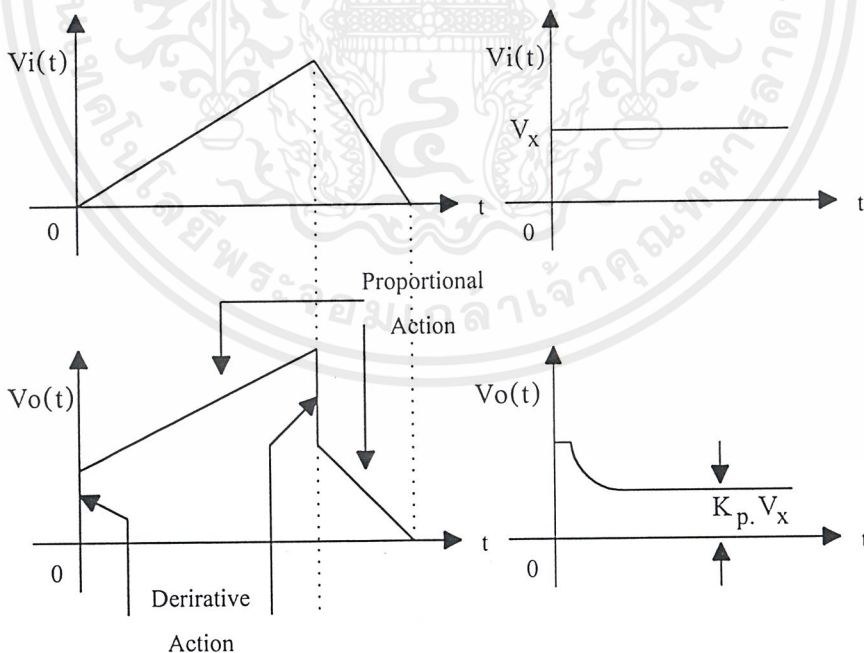
$$= [K_p + T_V \cdot S] \cdot V_i(s) \tag{5.3}$$

$$R(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = T_V \cdot S + K_p \tag{5.4}$$

$$R(s) = T_V (S + K_p / T_V)$$

จากสมการที่ (4) จะให้ซีโร 1 ตัว ที่  $-\frac{K_p}{T_V}$  และให้ค่า Factor เป็น  $T_V$  การเซตค่าซีโร จะขึ้นอยู่กับค่า  $-K_p$  และค่า  $T_V$  โดยจะให้เกณฑ์ในสถานะคงที่เป็น  $K_p$  (พิจารณาที่  $S \rightarrow 0$ )

**พิจารณาลักษณะเอาต์พุต**



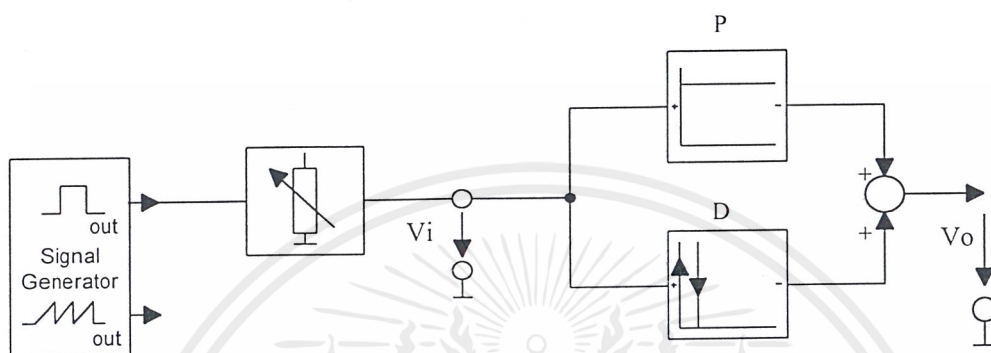
(ก) กราฟตอบสนองต่ออินพุตแรมป์ (ข) กราฟตอบสนองต่ออินพุตพัลส์

**รูปที่ 5.3** กราฟตอบสนองต่ออินพุตแรมป์และอินพุตพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอซี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



รูปที่ 5.4 การต่อวงจรการทดลองตัวควบคุมแบบพีดี

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูป
2. ป้อนอินพุตพัลส์ และ แรมป์ 1 Vp-p ความถี่ประมาณ 100Hz
3. เลือก S1 และ S3 ไปยัง OFF ตั้งค่า  $K_p = 5, T_D = 0.1ms, 1 ms$  และ  $10 ms$  บันทึกค่าในตารางที่ 1
4. ตั้งค่า  $T_D = 0.1ms$  ปรับค่า  $K_p = 1, 5$  และ  $10$  บันทึกค่าในตารางที่ 2
5. บันทึกสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับอินพุตพัลส์ที่  $K_p = 1 T_D = 0.1 ms$
6. บันทึกสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับอินพุตแรมป์ที่  $K_p = 1 T_D = 0.1 ms$

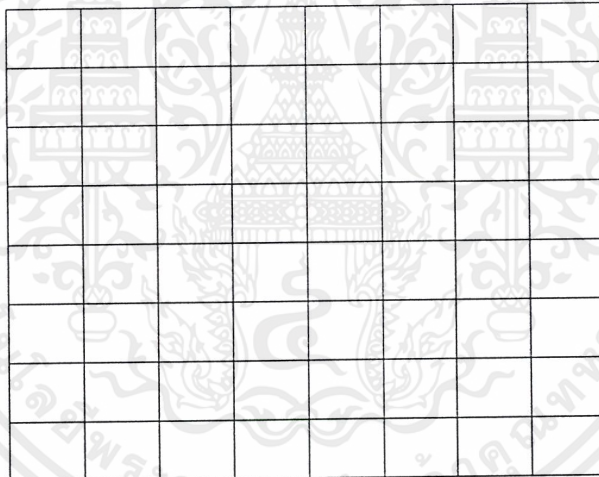
ตารางที่ 1 ( $V_i$  pulse)

$K_p$	5	5	5
$T_D$	0.1ms	1 ms	10 ms
$v_o(t)$			

## ตารางที่ 2 (Vi Ramp)

$T_D$	0.1ms	0.1ms	0.1ms
$K_p$	1	5	10
$v_o(t)$			

อินพุตพัลส์เทียบกับ  $V_o$  ที่  $K_p = 1$ ,  $T_D = 0.1ms$



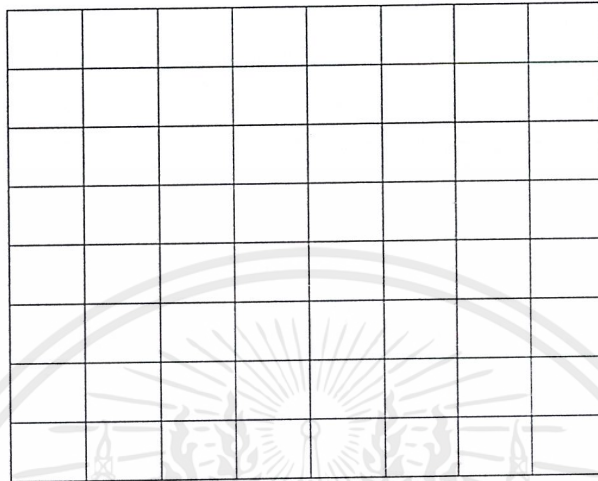
$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุตแรมป์เทียบกับ  $V_o$  ที่  $= 1$ ,  $T_D = 0.1$  ms



$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



---



---

คำถามท้ายการทดลอง

1. ป้อนอินพุตพัลส์เมื่อตั้งค่า  $K_p$  คงที่แล้วปรับค่า  $T_D$  ลักษณะกราฟตอบสนองเป็นเช่นไร
2. เมื่อตั้งค่า  $T_D$  คงที่แล้วปรับค่า  $K_p$  ลักษณะกราฟตอบสนองเป็นเช่นไร
3. ป้อนอินพุตแรมป์แล้วมีเงื่อนไขดังข้อ 1 กราฟตอบสนองเป็นเช่นไร
4. ถ้ามีเงื่อนไขดังข้อ 2 กราฟตอบสนองเอาต์พุตจะเป็นเช่นไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

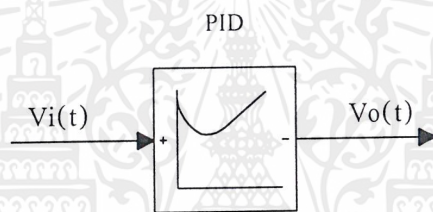
## การทดลองที่ 6

### ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

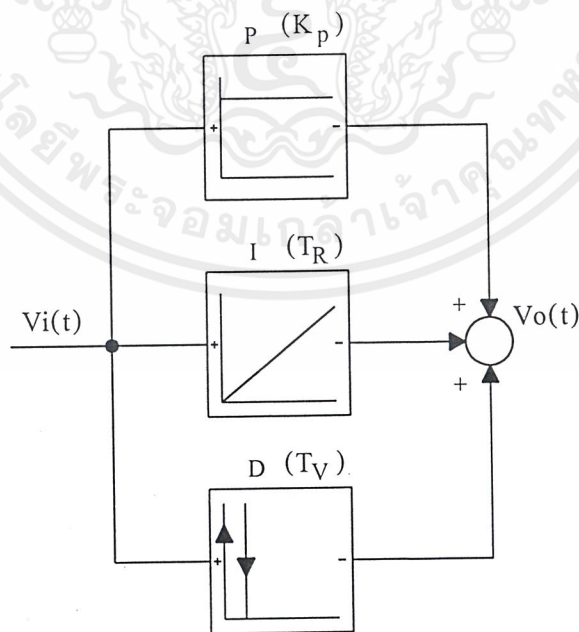
#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาค่าลักษณะพฤติกรรมตัวควบคุมแบบพีไอดี
2. เพื่อศึกษาลักษณะการควบคุมแบบพีไอดี
3. เพื่อศึกษากราฟตอบสนองเอาต์พุตต่ออินพุตพัลส์ และอินพุตเรมพ์

#### บทวิเคราะห์



รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 6.2 ตัวควบคุมพีไอดีจากการต่อขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ

$$v_o(t) = K_p \cdot v_i(t) + \frac{1}{T_R} \int_0^t v_i(t) dt + T_V \frac{d}{dt} v_i(t) + v_o(0) \quad (6.1)$$

$$V_o(s) = K_p \cdot V_i(s) + \frac{1}{T_R \cdot S} V_i(s) + T_V \cdot S V_i(s) \quad (6.2)$$

$$V_o(s) = \left[ K_p + \frac{1}{T_R \cdot S} + T_V \cdot S \right] \cdot V_i(s) \quad (6.3)$$

$$R(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = K_p + \frac{1}{T_R \cdot S} + T_V \cdot S$$

$$R(s) = \frac{K_p T_R S + 1 + T_R T_V S^2}{T_R \cdot S} = \frac{T_R T_V S^2 + K_p T_R S + 1}{T_R \cdot S} = T_V \frac{S^2 + (K_p / T_V) S + 1 / T_R T_V}{S} \quad (6.4)$$

พิจารณารากของเศษของสมการ (6.4) จะได้เป็น

$$R(s) = \frac{k(s - Z_1)(s - Z_2)}{S} \quad (6.5)$$

จากสมการ (6.4) เทียบรูปกับสมการ (6.5) จะหาค่าซีโร  $Z_1$  และ  $Z_2$  ได้จาก

$$Z_{1,2} = \frac{-(K_p / T_V) \pm \sqrt{(K_p / T_V)^2 - 4 / T_p T_V}}{2} \quad (6.6)$$

หรือ

$$Z_{1,2} = \frac{-K_p \pm \sqrt{K_p^2 - 4T_V / T_R}}{2T_V} \quad (6.7)$$

จากสมการ (6.7) พิจารณาได้ว่า

-หาก  $K_p^2 > 4 \frac{T_V}{T_R}$  : จะได้ Zero 2 ตัวเป็นค่าจริง

-หาก  $K_p^2 < 4 \frac{T_V}{T_R}$  : จะได้ซีโรเป็น complex conjugate ซึ่งจะให้ค่าของ real part คงที่ที่  $-K_p / 2T_V$

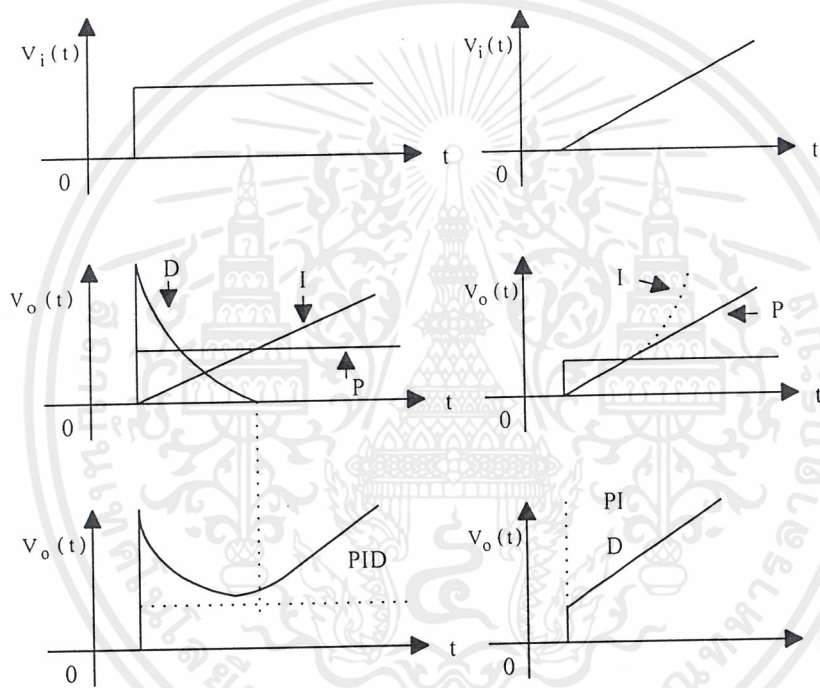
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ให้อินทิเกรตอีก 1 ตัวในฟอร์เวิร์คพาร์ท

เมื่อซีโรเท่ากับโพลมาต่อชนกันจะเกิดการ cancellation

ตัวควบคุมแบบพีไอดี สามารถแก้ค่าออฟเซต ของ proportional mode และลด overshoot ที่จะทำให้เกิดการ oscillation เนื่องจาก Integral mode และจะให้ผลตอบสนองได้รวดเร็วตามคุณสมบัติของ Derrivative mode

พิจารณาสัญญาณเอาต์พุต

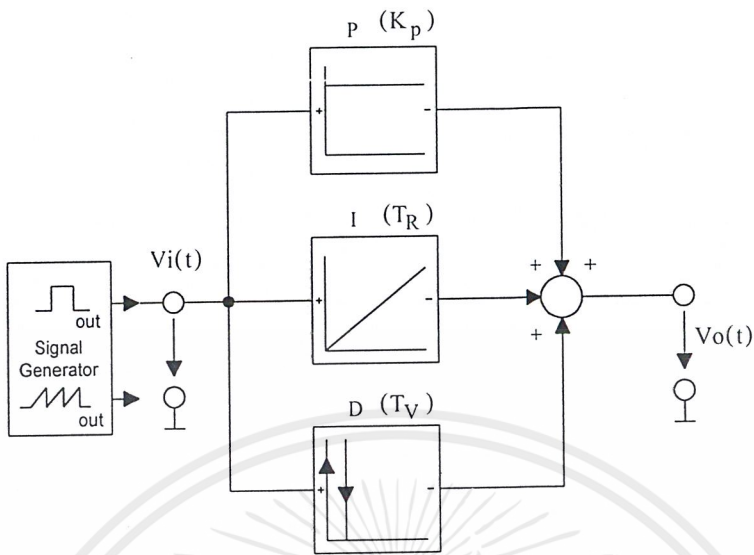


(ก) กราฟตอบสนองต่ออินพุตพัลส์ (ข) กราฟตอบสนองต่ออินพุตแรมป์

รูปที่ 6.3 กราฟตอบสนองต่ออินพุตพัลส์และอินพุตแรมป์

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอดี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



รูปที่ 6.4 การต่อวงจรการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดี

ลำดับการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูป
2. ป้อนอินพุตพัลส์ ขนาด 1 Vp-p ที่ความถี่ 100Hz
3. ตั้งค่า  $K_p = 1$ ,  $T_I = 0.1ms$  และ  $T_D = 0.1ms$  บันทึกสัญญาณ

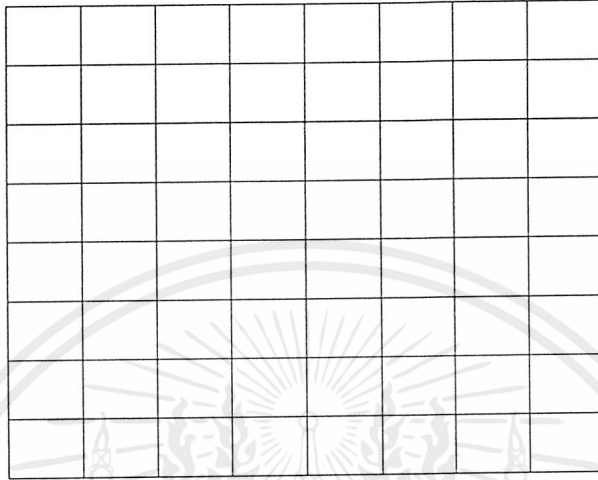

vo(t) :..... V/div

vi(t) :..... V/div

time :..... S/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ตั้งค่า  $K_p = 5$   $T_i = 0.1\text{ms}$  และ  $T_D = 0.1\text{ms}$  บันทึกค่า



$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



---



---

คำถามท้ายการทดลอง

1. ตัวควบคุมแบบพี มีข้อดีและข้อเสียอย่างไร
2. ตัวควบคุมแบบไอ มีข้อดีและข้อเสียอย่างไร
3. ตัวควบคุมแบบดี มีข้อดีและข้อเสียอย่างไร
4. ตัวควบคุมแบบพีไอดี มีข้อดีและข้อเสียอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

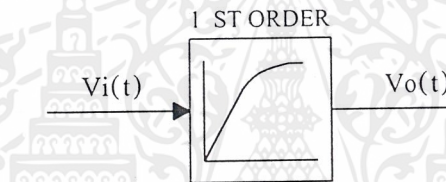
## การทดลองที่ 7

### ระบบอันดับหนึ่ง ( 1st order system)

#### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงระบบอันดับหนึ่ง
2. ศึกษาถึงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตพัลส์
3. เข้าใจถึงค่า Time Constant

#### บทวิเคราะห์



รูปที่ 7.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบอันดับหนึ่ง

#### ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + RSC} \quad (7.1)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + ST} \quad (7.2)$$

$T$  คือ ค่าเวลาที่โดย  $T$  ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานและค่าคาปาซิเตอร์ซึ่งก็คือ Time constant ซึ่งเราคิดที่ 63 % ของอินพุต

ถ้าอินพุตของระบบเป็นยูนิตสเต็ป  $U(t)$

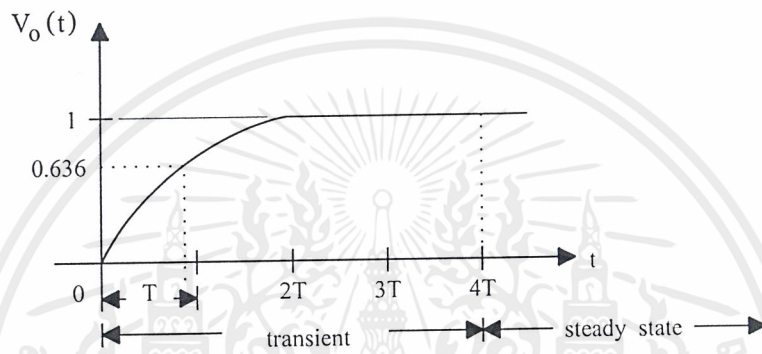
$$V_o(s) = \frac{1}{(TS + 1)} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{s} - \frac{T}{(TS + 1)} \quad (7.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

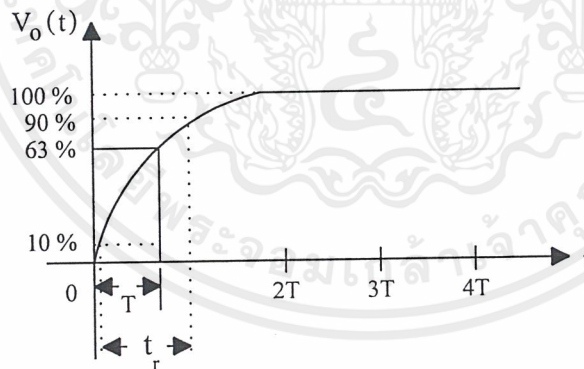
$$V_o(t) = 1 - e^{-\omega_p \cdot t} = 1 - e^{-t/T}; \quad T = \frac{1}{\omega_p} \quad (7.4)$$

วิเคราะห์สมการที่ (7.4)

$$\begin{aligned} t=0 & \quad ; \quad V_o(0) = 0 \\ t \rightarrow \infty & \quad ; \quad V_o(\infty) = 1 \\ t=T & \quad ; \quad V_o(T) = 0.636 \end{aligned}$$



(ก) ช่วงเวลาการไต่ขึ้น,  $t_r$  คือเวลาที่ไต่จาก 10% ถึง 90% ของ Final Value



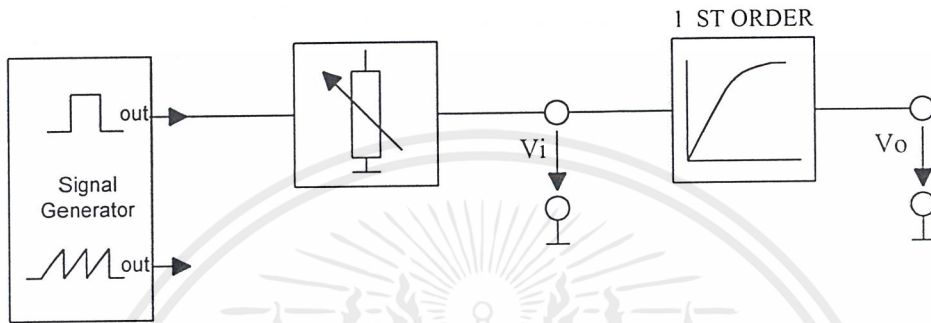
$$(ข) t_r = 2.2 T = \frac{2.2}{\omega_p}$$

รูปที่ 7.2 กราฟตอบสนองต่ออินพุตสเต็ปของระบบอันดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอดี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



รูปที่ 7.3 การต่อวงจรการทดลองระบบอันดับหนึ่ง

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูป
2. ป้อนอินพุตเป็นสัญญาณพัลส์ ที่ความถี่ 100 Hz ขนาด 1Vp-p
3. ตั้งค่า  $T = 0.1 \text{ ms}$ ,  $1 \text{ ms}$  และ  $10 \text{ ms}$  บันทึกค่าในตารางที่ 1
4. ตั้งค่า  $T$  ตามค่าในข้อ 3 แล้วลองเพิ่มความถี่เป็น 1 kHz สังเกตผลการเปลี่ยนแปลง

T	0.1 ms	1 ms	10 ms
$t_r$			
T(ค่าที่อ่านได้)			

5. บันทึกค่ากราฟตอบสนองต่ออินพุตพัลส์ที่  $T = 0.1 \text{ ms}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



---



---

คำถามท้ายการทดลอง

1. ถ้าตองป้อนอินพุตเป็นสัญญาณแรมป์กราฟตอบสนองจะเป็นอย่างไร
2. เมื่อปรับความถี่สูงขึ้น ผลตอบสนองที่ได้เป็นอย่างไร

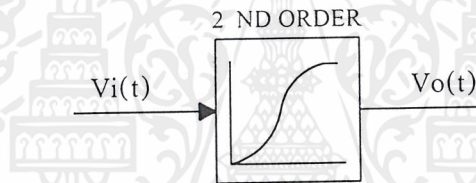
## ใบงานที่ 8

### ระบบอันดับสอง (Second Order)

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบอันดับสอง
2. เพื่อศึกษาถึงลักษณะกราฟตอบสนองในสถานะชั่วคราว ของระบบอันดับสอง
3. เพื่อศึกษาการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบอันดับสอง

#### บทวิเคราะห์



รูปที่ 8.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบอันดับสอง

#### สมการ

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{\left(\frac{\zeta}{\omega_0}\right)^2 + \frac{2D}{\omega_0} s + 1} \quad (8.1)$$

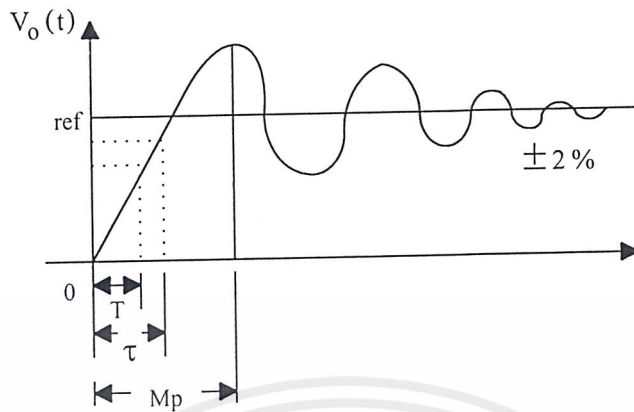
#### รากของสมการบนระนาบ S

$$s_1, s_2 = -\omega_0 D \pm j\omega_0 \sqrt{1-D^2} \quad (8.2)$$

#### การตอบสนองมี 4 อย่างดังนี้

- |               |         |
|---------------|---------|
| 1. Underdamp  | $D < 1$ |
| 2. Overdamp   | $D > 1$ |
| 3. Critically | $D = 1$ |
| 4. Oscilate   | $D = 0$ |

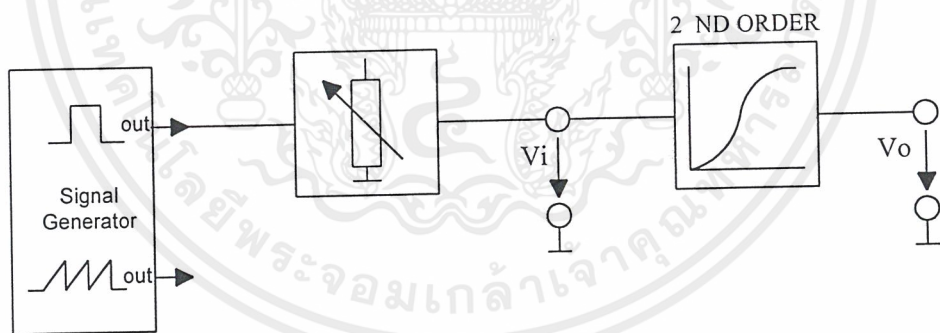
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.2 กราฟตอบสนองกรณีอินเคอร์แคมพ์ของระบบอันดับสอง

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอดี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



รูปที่ 8.3 การต่อวงจรการทดลองระบบอันดับสอง

### ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูป
2. ป้อนสัญญาณอินพุตพัลส์ ขนาด 1 Vp-p ความถี่ 100 Hz
3. ตั้งค่า  $D = 0.1, 0.2, 0.5, 0.7$  บันทึกค่าลงในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1

D	0.1	0.2	0.5	0.7
% mp				
% Over shoot				
T				
$t_r$				
$t_s$				

## 4. บันทึกค่าสัญญาณกรณี D = 0.2


$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



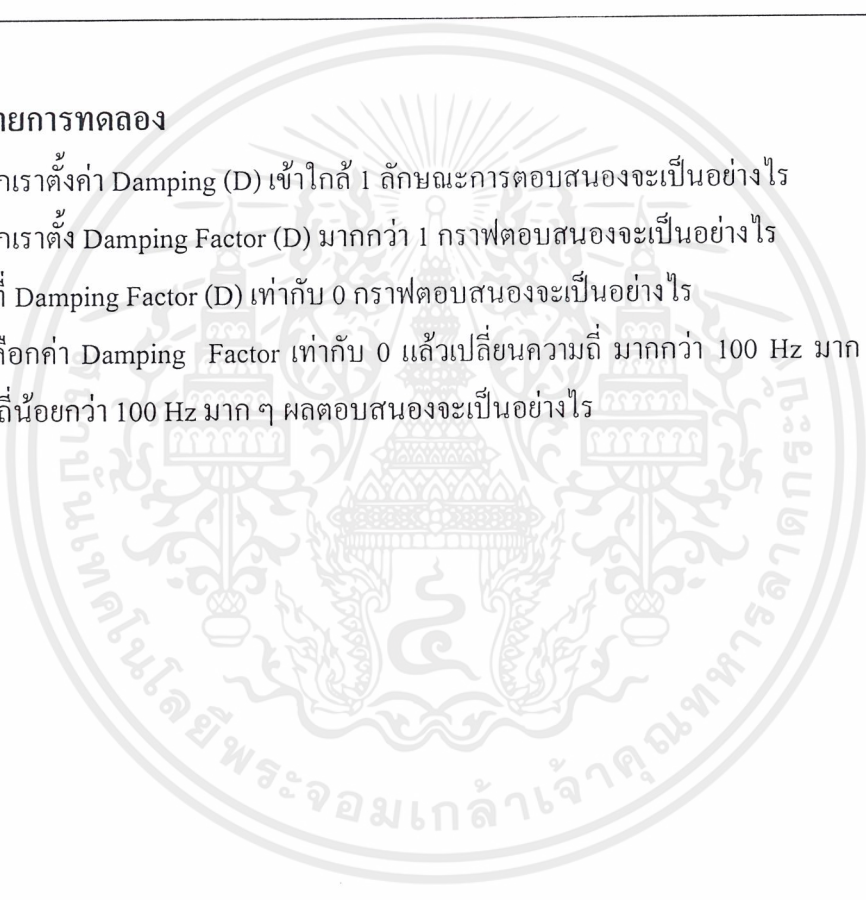
---



---

## คำถามท้ายการทดลอง

1. ถ้าหากเราตั้งค่า Damping (D) เข้าใกล้ 1 ลักษณะการตอบสนองจะเป็นอย่างไร
2. ถ้าหากเราตั้ง Damping Factor (D) มากกว่า 1 กราฟตอบสนองจะเป็นอย่างไร
3. กรณีที่ Damping Factor (D) เท่ากับ 0 กราฟตอบสนองจะเป็นอย่างไร
4. หากเลือกค่า Damping Factor เท่ากับ 0 แล้วเปลี่ยนความถี่ มากกว่า 100 Hz มาก ๆ และลดความถี่น้อยกว่า 100 Hz มาก ๆ ผลตอบสนองจะเป็นอย่างไร



## ใบงานที่ 9

### ผลตอบสนอง Step Response ของระบบ

#### วัตถุประสงค์

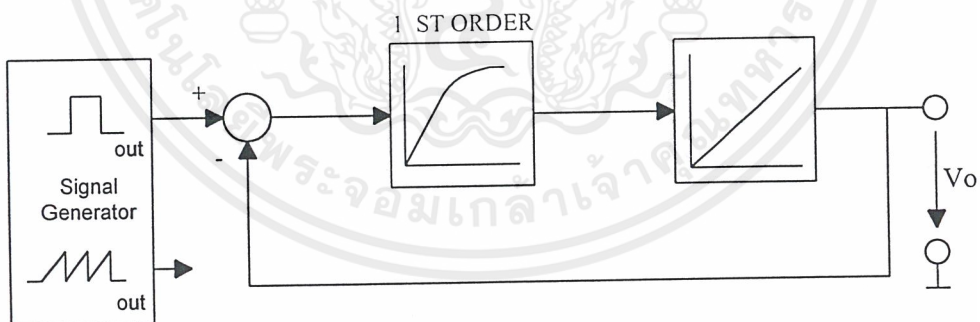
1. เพื่อการศึกษาถึงผลตอบสนองของระบบในลักษณะต่างๆ
2. ศึกษาการควบคุมและการชดเชยระบบ

#### บทวิเคราะห์

ระบบใดๆ อาจจะไม่เสถียร เราสามารถแก้ไข โดยการนำตัวควบคุมมาต่อชดเชยแก้ไขหรือควบคุมให้ระบบนั้นมีเสถียรภาพขึ้นได้

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอดี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



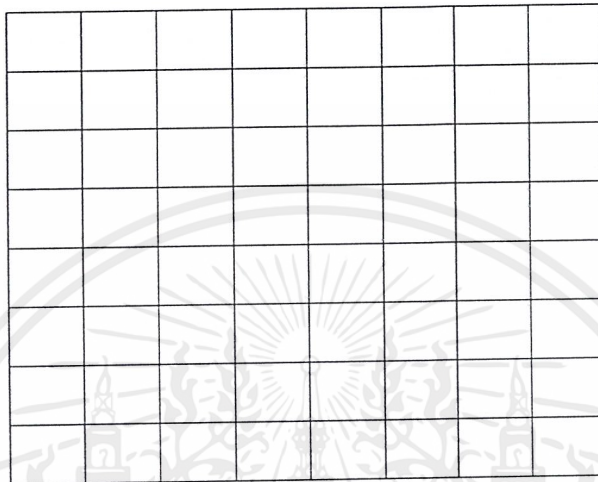
รูปที่ 9.1 การต่อวงจรการทดลองผลตอบสนองแบบสเต็ป

#### ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูป
2. ป้อนอินพุตพัลส์ขนาดความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือกค่า  $T = 0.1 \text{ ms}$  ,  $1 \text{ ms}$  ,  $10 \text{ ms}$  เลือกค่า  $T_1 = 0.1 \text{ ms}$  ,  $1 \text{ ms}$  ,  $10 \text{ ms}$  บันทึกผลตอบสนองที่  
 $T = 0.1 \text{ ms}$   $T_1 = 0.1 \text{ ns}$  และ  $T = 0.5 \text{ ns}$   $T_1 = 0.1 \text{ ms}$



$v_o(t) : \dots \text{ V/div}$

$v_i(t) : \dots \text{ V/div}$

time :  $\dots \text{ S/div}$

สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



---



---

คำถามท้ายการทดลอง

1. เมื่อตั้งค่า  $T$  คงที่เปลี่ยนค่า  $T_1$  ค่าต่างจะมีการเปลี่ยนแปลงกราฟตอบสนองอย่างไร
2. เมื่อตั้งค่า  $T_1$  คงที่แล้วเปลี่ยนค่า  $T$  จะมีผลเปลี่ยนแปลงกราฟตอบสนองอย่างไร

## ใบงานที่ 10

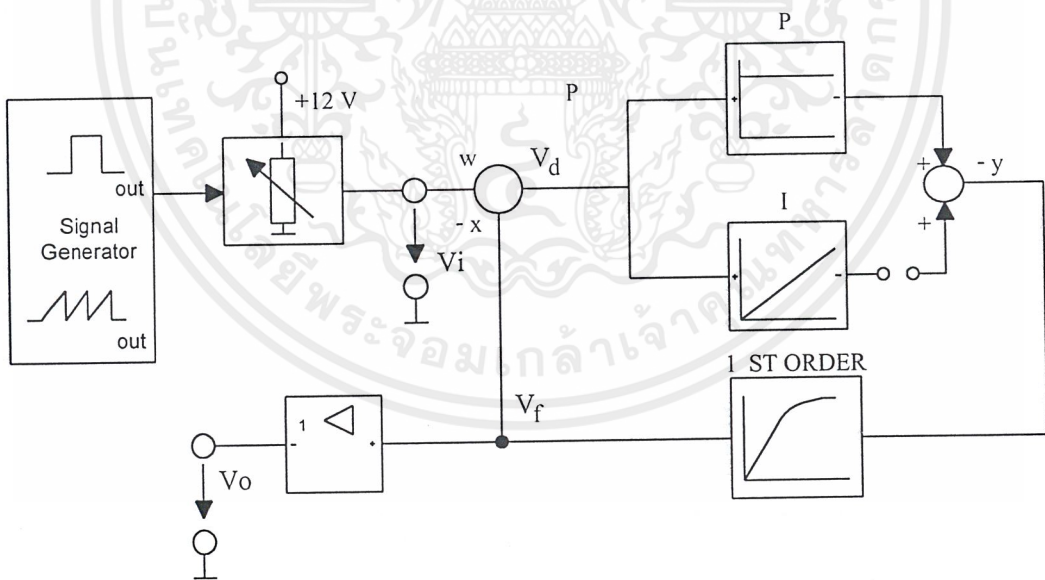
### การควบคุมระบบอันดับหนึ่งโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีและพีไอ

#### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงพฤติกรรมของพีและพีไอ เมื่อควบคุมระบบอันดับหนึ่งที่ค่า  $T$  ต่าง ๆ
2. ศึกษาให้เข้าใจถึงลักษณะการควบคุมแบบวงจรเปิดและลักษณะของค่าผิดพลาด
3. เปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวควบคุมแบบพีอย่างเดียวและพีไอเมื่อควบคุมระบบอันดับหนึ่ง

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บอร์ดพีไอดี
2. ออสซิลโลสโคป
3. สายต่อวงจร



รูปที่ 10.1 วงจรทดลองการควบคุมระบบอันดับหนึ่งโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีและแบบพีไอ

## ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อดวงจรมัดรูป
2. ป้อนแรงดันอินพุต ขนาด 2 V เลือกค่า  $K_p$  ที่ค่าต่างๆ ได้แก่ 0.5 , 1 , 5
3. เลือกค่า  $T_I = 0.1$  ms และค่า  $T = 0.1$  ms บันทึกค่าลงในตารางที่ 1

## ตารางที่ 1

ชนิดของตัวควบคุม	P	PI	P	PI
$K_p$	0.5	1	5	10
$T_I$	0.1 ms	0.1 ms	0.5 ms	0.5 ms
$V_f$				
Steady state error				

4. ป้อนอินพุตเป็นสัญญาณพัลส์ความถี่ 100 Hz ขนาด 1 Vp-p

## ตารางที่ 2

ชนิดของตัวควบคุม	P	PI	P	PI
$K_p$	0.5	1	5	10
$T_I$	0.1 ms	0.1 ms	0.5 ms	0.5 ms
$K_p$ (อ่านจากกราฟ)				
$T_I$ (อ่านจากกราฟ)				

5. บันทึกสัญญาณความถี่ตัวควบคุมแบบพี ที่ค่า  $K_p = 0.5$   $T_I = 0.1$  ms


$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

6. บันทึกสัญญาณที่ตัวควบคุมแบบพีไอ ค่า  $K_p = 1$  ,  $T_i = 0.1$  ms


$v_o(t)$  :..... V/div

$v_i(t)$  :..... V/div

time :..... S/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

---



---



---



---



---



---

## คำถามท้ายการทดลอง

1. ข้อแตกต่างของการใช้ตัวควบคุมแบบ P ตัวเดียว กับการใช้ P ร่วมกับ I เป็นอย่างไร
2. เมื่อเปลี่ยนค่า  $K_p$  ค่าต่างๆ และ  $T_i$  ค่าต่างๆ ผลจะเป็นอย่างไร
3. เมื่อเลือกค่า  $K_p$  และ  $T_i$  คงที่ แล้วลองเปลี่ยนค่า  $T$  ของระบบอันดับหนึ่งผลจะเป็นอย่างไร

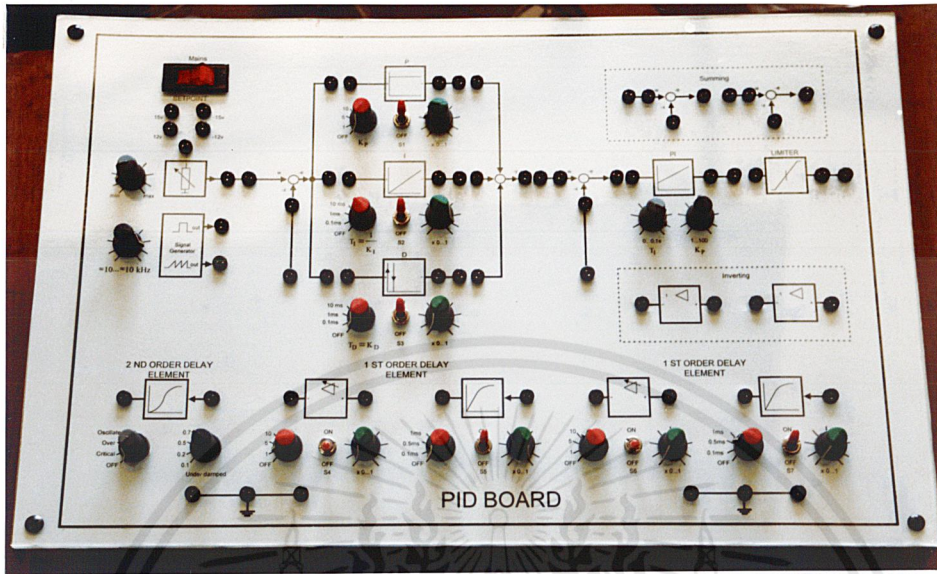




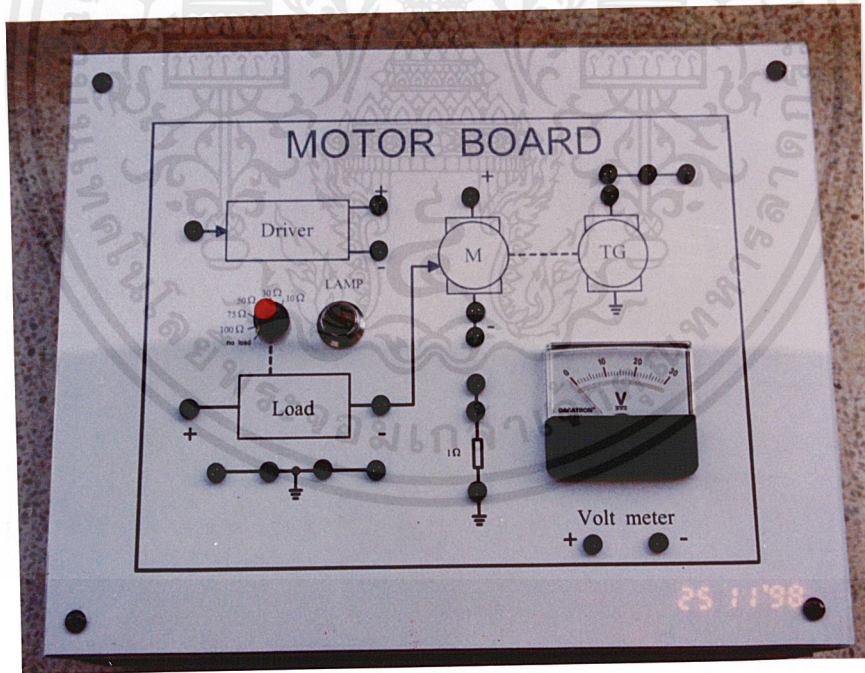
ภาคผนวก ข.

ส่วนประกอบของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

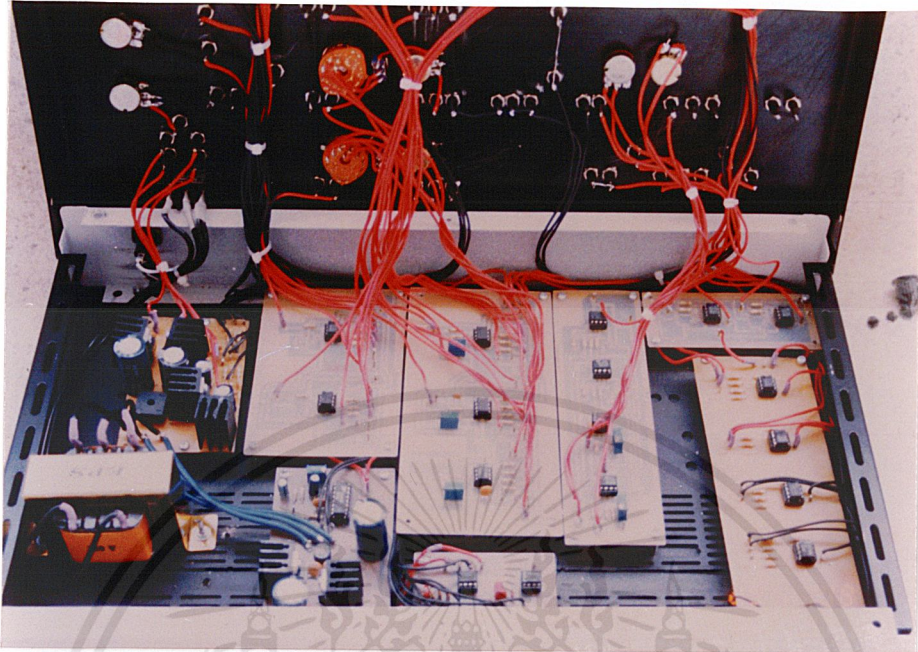


รูปที่ ข. 1 บอร์ดพีไอซี

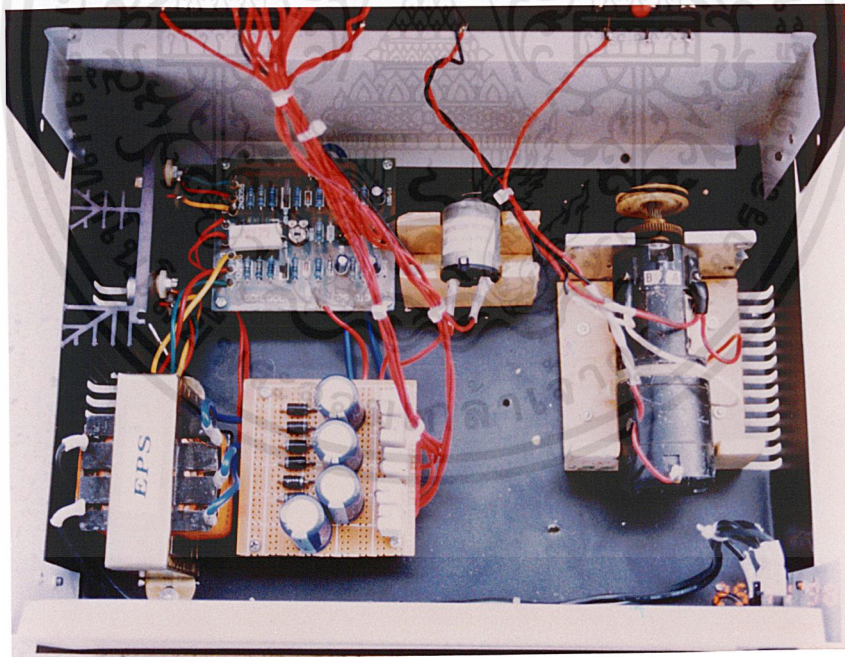


รูปที่ ข. 2 บอร์ดมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข. 3 ลักษณะภายในของบอร์ดพีไอดี



รูปที่ ข. 4 ลักษณะภายในของบอร์ดมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.  
รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## XR-2206

Monolithic  
Function Generator

June 1997-3

### FEATURES

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

### APPLICATIONS

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

### GENERAL DESCRIPTION

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

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

### ORDERING INFORMATION

Part No.	Package	Operating Temperature Range
XR-2206M	16 Lead 300 Mil CDIP	-55°C to +125°C
XR-2206P	16 Lead 300 Mil PDIP	-40°C to +85°C
XR-2206CP	16 Lead 300 Mil PDIP	0°C to +70°C
XR-2206D	16 Lead 300 Mil JEDEC SOIC	0°C to +70°C

©1972

EXAR Corporation, 48720 Kato Road, Fremont, CA 94538 ♦ (510) 668-7000 ♦ (510) 668-7017

1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

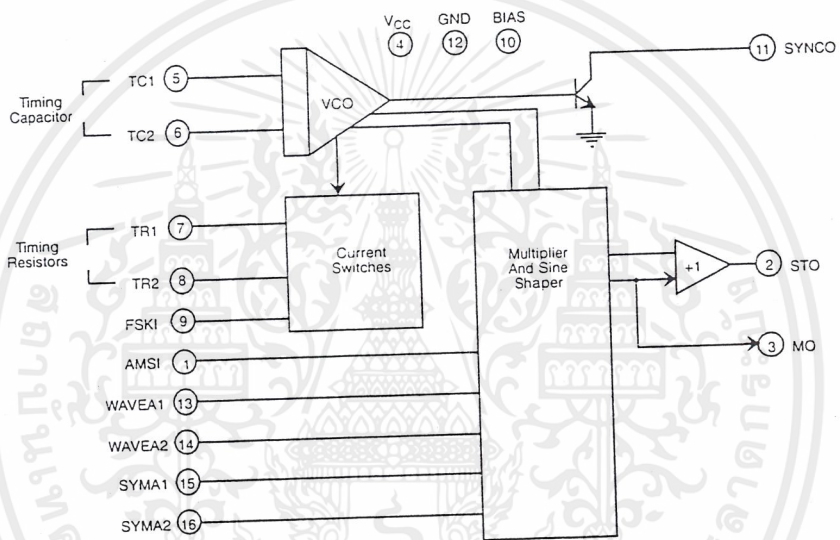


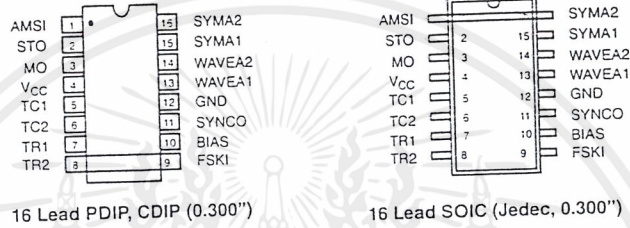
Figure 1. XR-2206 Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



XR-2206



PIN DESCRIPTION

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## XR-2206



## DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

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

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

## Notes

<sup>1</sup> Output amplitude is directly proportional to the resistance,  $R_3$ , on Pin 3. See Figure 3.

<sup>2</sup> For maximum amplitude stability,  $R_3$  should be a positive temperature coefficient resistor.

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



XR-2206

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (CONT'D)

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

Notes

- <sup>1</sup> Output amplitude is directly proportional to the resistance, R<sub>3</sub>, on Pin 3. See Figure 3.
  - <sup>2</sup> For maximum amplitude stability, R<sub>3</sub> should be a positive temperature coefficient resistor.
- Bold face parameters are covered by production test and guaranteed over operating temperature range.*

Specifications are subject to change without notice

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Power Supply .....	26V	Total Timing Current .....	6mA
Power Dissipation .....	750mW	Storage Temperature .....	-65°C to +150°C
Derate Above 25°C .....	5mW/°C		

SYSTEM DESCRIPTION

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

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

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



XR-2206

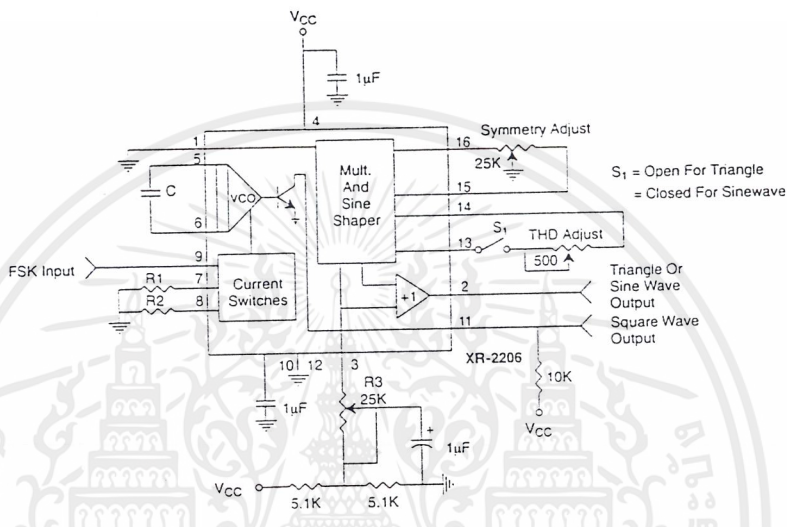


Figure 2. Basic Test Circuit

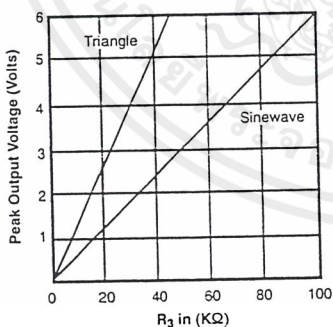


Figure 3. Output Amplitude as a Function of the Resistor, R3, at Pin 3

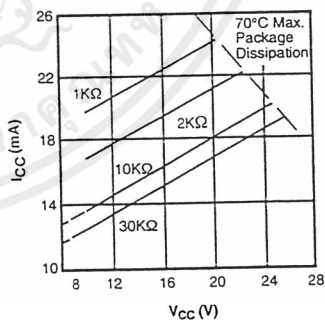


Figure 4. Supply Current vs Supply Voltage, Timing, R



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

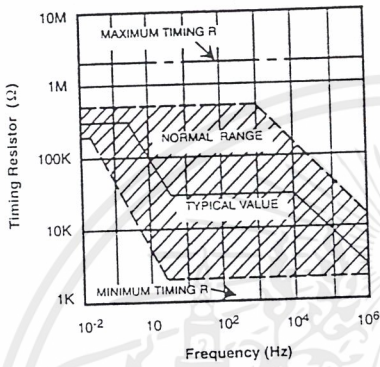


Figure 5. R versus Oscillation Frequency.

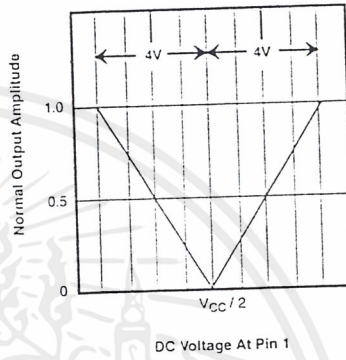


Figure 6. Normalized Output Amplitude versus DC Bias at AM Input (Pin 1)

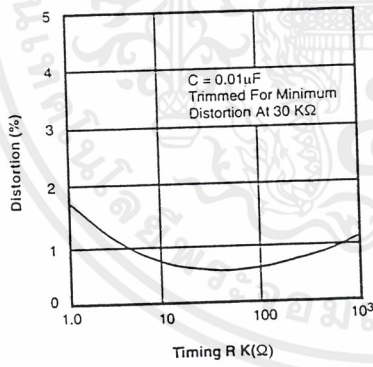


Figure 7. Trimmed Distortion versus Timing Resistor.

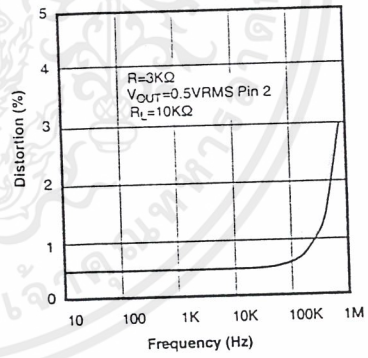


Figure 8. Sine Wave Distortion versus Operating Frequency with Timing Capacitors Varied.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

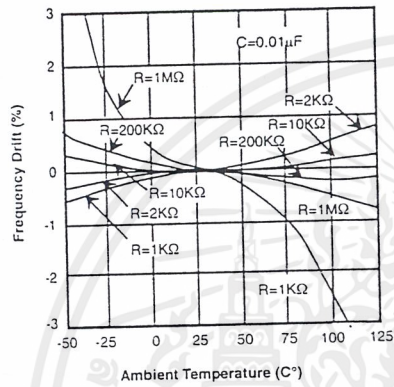


Figure 9. Frequency Drift versus Temperature.

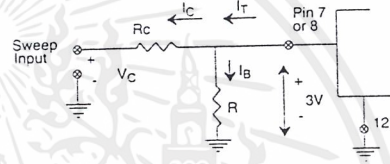


Figure 10. Circuit Connection for Frequency Sweep.

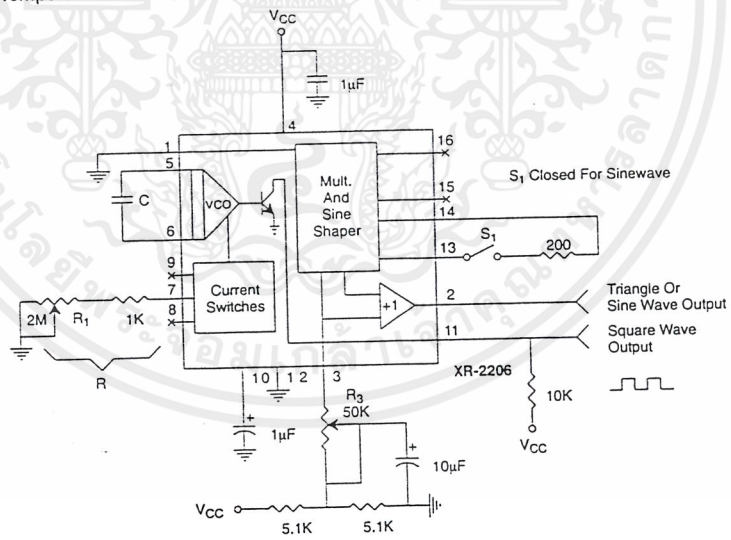


Figure 11. Circuit for Sine Wave Generation without External Adjustment. (See Figure 3 for Choice of R<sub>3</sub>)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

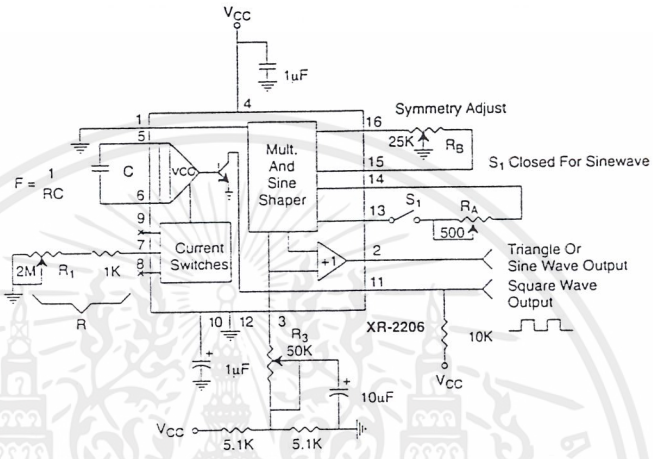


Figure 12. Circuit for Sine Wave Generation with Minimum Harmonic Distortion. (R<sub>3</sub> Determines Output Swing - See Figure 3)

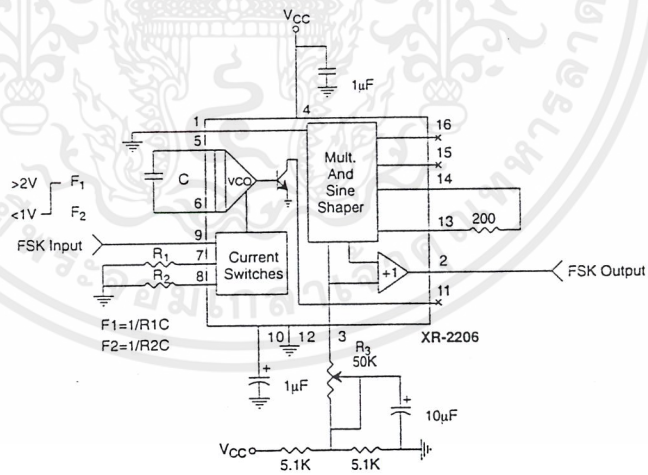


Figure 13. Sinusoidal FSK Generator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# XR-2206

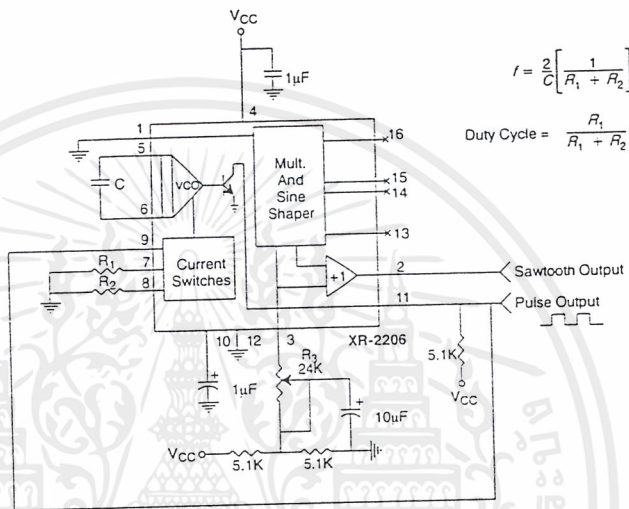


Figure 14. Circuit for Pulse and Ramp Generation.

### Frequency-Shift Keying

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

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

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

### Output DC Level Control

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

### APPLICATIONS INFORMATION

#### Sine Wave Generation

##### Without External Adjustment

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

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






### With External Adjustment:

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

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

### Triangle Wave Generation

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

### FSK Generation

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

### Pulse and Ramp Generation

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

## PRINCIPLES OF OPERATION

### Description of Controls

#### Frequency of Operation:

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

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

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

#### Frequency Sweep and Modulation:

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

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

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

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

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

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

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



# XR-2206



### Output Amplitude:

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

### Amplitude Modulation:

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

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

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

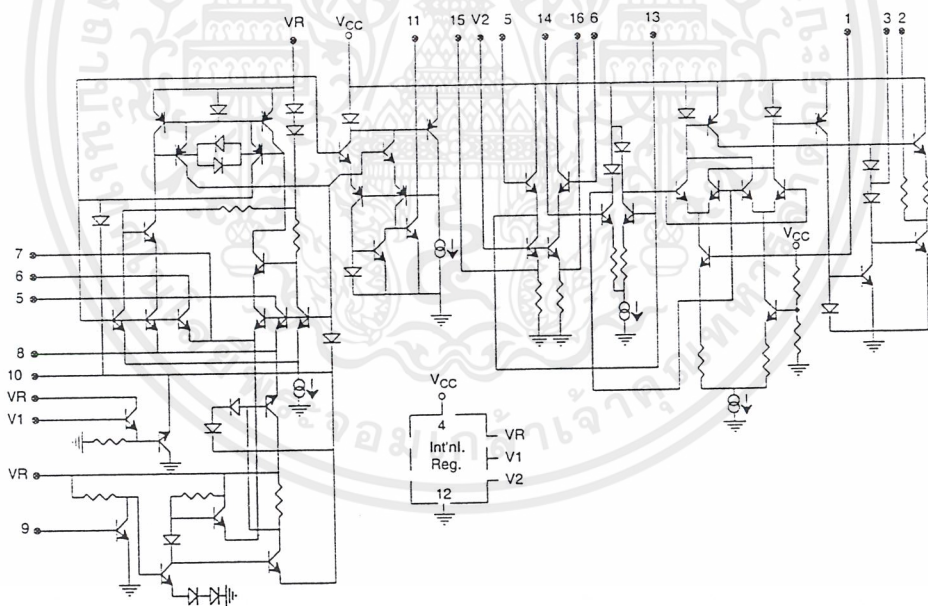


Figure 15. Equivalent Schematic Diagram



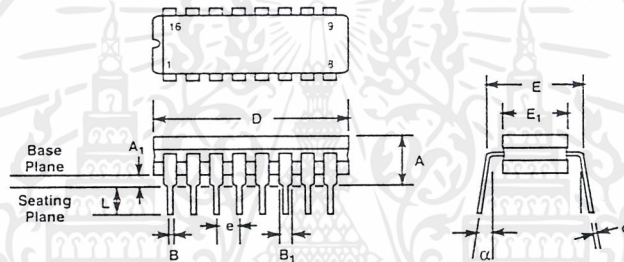
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXAR

XR-2206

16 LEAD CERAMIC DUAL-IN-LINE  
(300 MIL CDIP)

Rev. 1.00



SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.100	0.200	2.54	5.08
A <sub>1</sub>	0.015	0.060	0.38	1.52
B	0.014	0.026	0.36	0.66
B <sub>1</sub>	0.045	0.065	1.14	1.65
c	0.008	0.018	0.20	0.46
D	0.740	0.840	18.80	21.34
E <sub>1</sub>	0.250	0.310	6.35	7.87
E	0.300 BSC		7.62 BSC	
e	0.100 BSC		2.54 BSC	
L	0.125	0.200	3.18	5.08
α	0°	15°	0°	15°

Note: The control dimension is the inch column

TQM

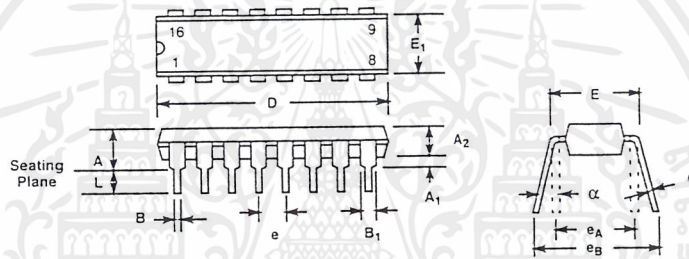
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

EXAR

16 LEAD PLASTIC DUAL-IN-LINE  
(300 MIL PDIP)

Rev. 1.00



SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.145	0.210	3.68	5.33
A <sub>1</sub>	0.015	0.070	0.38	1.78
A <sub>2</sub>	0.115	0.195	2.92	4.95
B	0.014	0.024	0.36	0.56
B <sub>1</sub>	0.030	0.070	0.76	1.78
C	0.008	0.014	0.20	0.38
D	0.745	0.840	18.92	21.34
E	0.300	0.325	7.62	8.26
E <sub>1</sub>	0.240	0.280	6.10	7.11
e	0.100 BSC		2.54 BSC	
e <sub>A</sub>	0.300 BSC		7.62 BSC	
e <sub>B</sub>	0.310	0.430	7.87	10.92
L	0.115	0.160	2.92	4.06
α	0°	15°	0°	15°

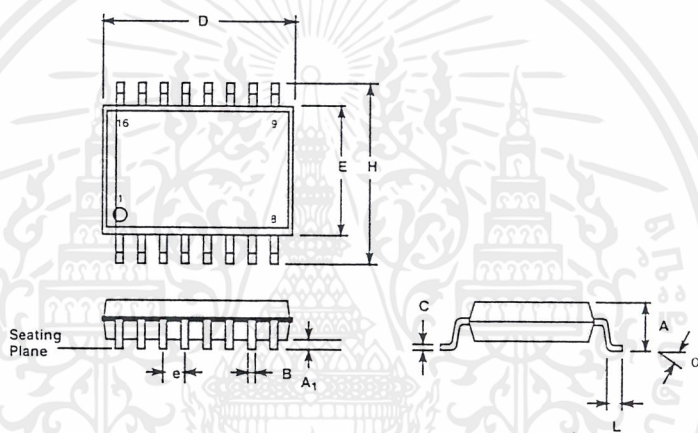
Note: The control dimension is the inch column

TOM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**16 LEAD SMALL OUTLINE  
(300 MIL JEDEC SOIC)**

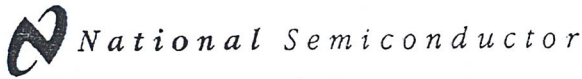
Rev. 1.00



SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.093	0.104	2.35	2.65
A <sub>1</sub>	0.004	0.012	0.10	0.30
B	0.013	0.020	0.33	0.51
C	0.009	0.013	0.23	0.32
D	0.398	0.413	10.10	10.50
E	0.291	0.299	7.40	7.60
e	0.050 BSC		1.27 BSC	
H	0.394	0.419	10.00	10.65
L	0.016	0.050	0.40	1.27
α	0° 8°		0° 8°	

Note: The control dimension is the millimeter column

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



November 1994

LM741 Operational Amplifier

## LM741 Operational Amplifier

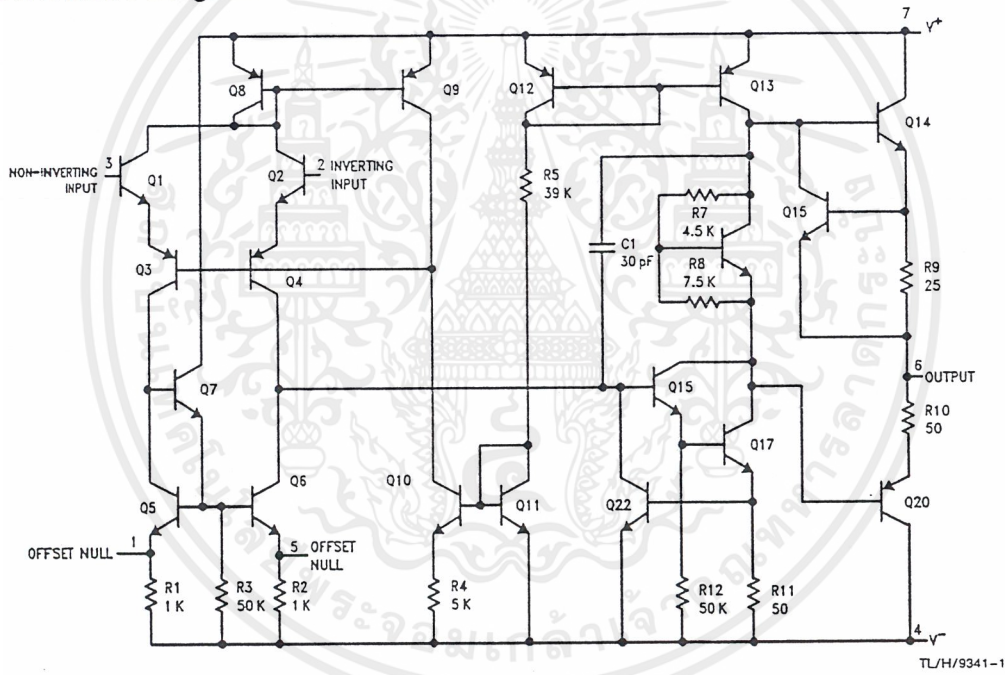
### General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications. The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and

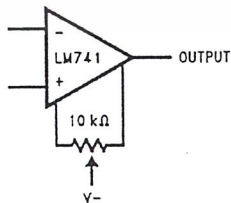
output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

### Schematic Diagram



Offset Nulling Circuit



TL/H/9341-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.  
(Note 5)

	LM741A	LM741E	LM741	LM741C
Supply Voltage	±22V	±22V	±22V	±18V
Power Dissipation (Note 1)	500 mW	500 mW	500 mW	500 mW
Differential Input Voltage	±30V	±30V	±30V	±30V
Input Voltage (Note 2)	±15V	±15V	±15V	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range	-55°C to +125°C	0°C to +70°C	-55°C to +125°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C	100°C	150°C	100°C
Soldering Information				
N-Package (10 seconds)	260°C	260°C	260°C	260°C
J- or H-Package (10 seconds)	300°C	300°C	300°C	300°C
M-Package				
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.				
ESD Tolerance (Note 6)	400V	400V	400V	400V

## Electrical Characteristics (Note 3)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0		2.0	6.0	mV mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV mV
				15							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Average Input Offset Voltage Drift				15							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	±10				±15			±15		mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30		20	200		20	200	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70		85	500			300	nA
Average Input Offset Current Drift				0.5							nA/°C
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80		80	500		80	500	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210			1.5			0.8	$\mu\text{A}$
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		M $\Omega$
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	0.5									M $\Omega$
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							±12	±13		V
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				±12	±13					V
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	50				50	200		20	200	V/mV V/mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	32							15		V/mV V/mV
	$V_S = \pm 5\text{V}$ , $V_O = \pm 2\text{V}$	10				25					V/mV

Electrical Characteristics (Note 3) (Continued)											
Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20V$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$\pm 16$									V V
	$V_S = \pm 15V$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$				$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		V V
Output Short Circuit Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	10 10	25	35 40		25			25		mA mA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12V$ $R_S \leq 50\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12V$	80	95		70	90		70	90		dB dB
Supply Voltage Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $V_S = \pm 20V$ to $V_S = \pm 5V$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	86	96		77	96		77	96		dB dB
	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain		0.25 6.0	0.8 20		0.3 5			0.3 5		$\mu\text{s}$ %
Bandwidth (Note 4)	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.437	1.5								MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain	0.3	0.7			0.5		0.5			V/ $\mu\text{s}$
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$					1.7	2.8		1.7	2.8	mA
Power Consumption	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_S = \pm 20V$ $V_S = \pm 15V$		80	150		50	85		50	85	mW mW
	LM741A $V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			165 135							mW mW
LM741E	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			150 150							mW mW
LM741	$V_S = \pm 15V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$					60 45	100 75				mW mW

Note 1: For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on thermal resistance, and  $T_j$  max. (listed under "Absolute Maximum Ratings").  $T_j = T_A + (\theta_{jA} P_D)$ .

Thermal Resistance	Cerdip (J)	DIP (N)	HO8 (H)	SO-8 (M)
$\theta_{jA}$ (Junction to Ambient)	100°C/W	100°C/W	170°C/W	195°C/W
$\theta_{jC}$ (Junction to Case)	N/A	N/A	25°C/W	N/A

Note 2: For supply voltages less than  $\pm 15V$ , the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Note 3: Unless otherwise specified, these specifications apply for  $V_S = \pm 15V$ ,  $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$  (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to  $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$ .

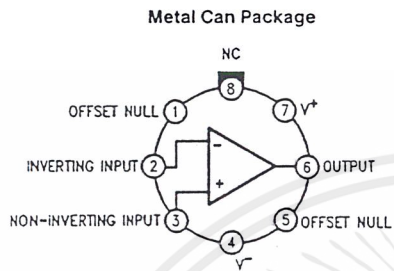
Note 4: Calculated value from: BW (MHz) = 0.35/Rise Time( $\mu\text{s}$ ).

Note 5: For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.

Note 6: Human body model, 1.5 k $\Omega$  in series with 100 pF.

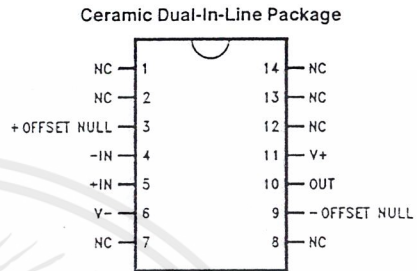
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connection Diagrams



TL/H/9341-2

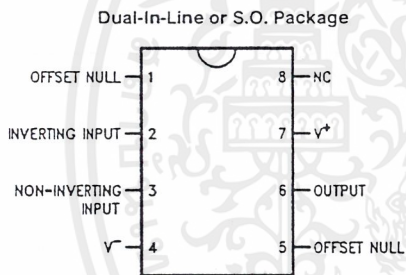
Order Number LM741H, LM741H/883\*,  
LM741AH/883 or LM741CH  
See NS Package Number H08C



TL/H/9341-5

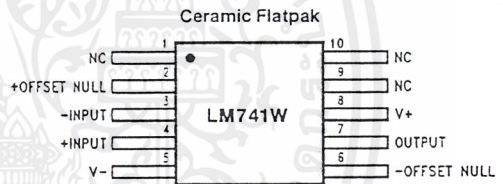
Order Number LM741J-14/883\*, LM741AJ-14/883\*\*  
See NS Package Number J14A

\*also available per JM38510/10101  
\*\*also available per JM38510/10102



TL/H/9341-3

Order Number LM741J, LM741J/883,  
LM741CM, LM741CN or LM741EN  
See NS Package Number J08A, M08A or N08E



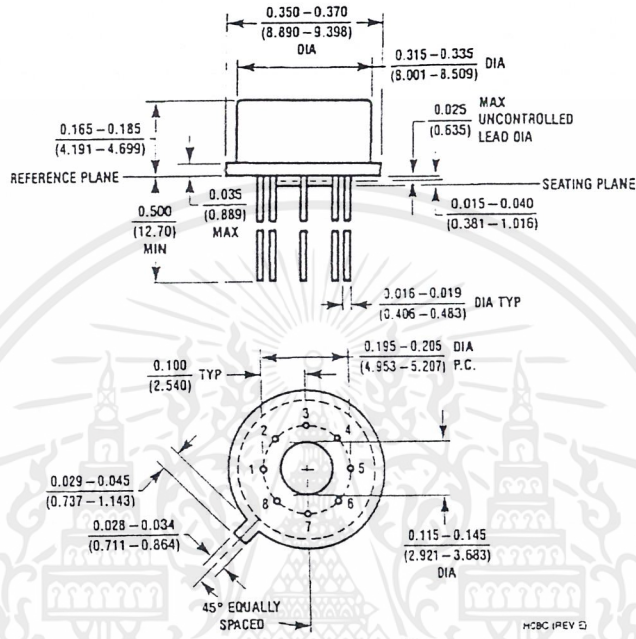
TL/H/9341-6

Order Number LM741W/883  
See NS Package Number W10A

\*LM741H is available per JM38510/10101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

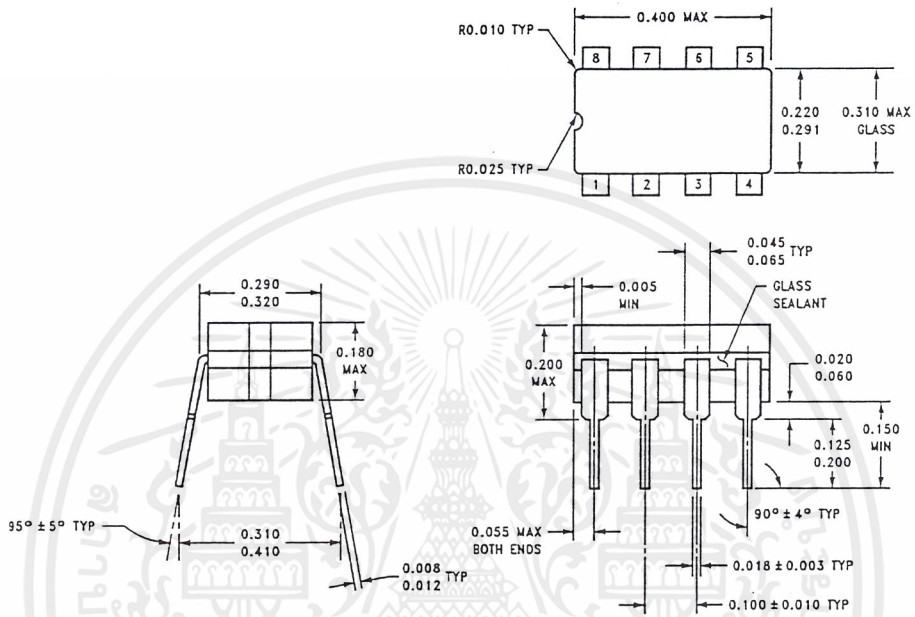
Physical Dimensions inches (millimeters)



Metal Can Package (H)  
Order Number LM741H, LM741H/883, LM741AH/883, LM741CH or LM741EH  
NS Package Number H08C

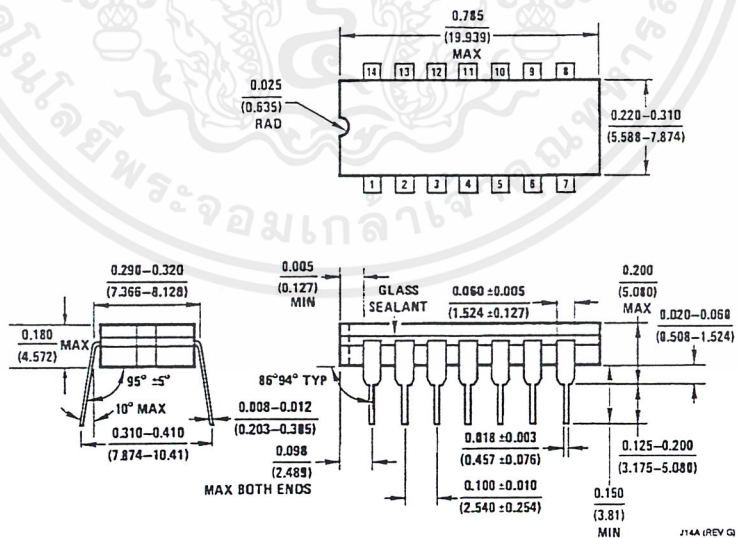
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Physical Dimensions** inches (millimeters) (Continued)



**Ceramic Dual-In-Line Package (J)**  
**Order Number LM741CJ or LM741J/883**  
**NS Package Number J08A**

J08A (REV K)



**Ceramic Dual-In-Line Package (J)**  
**Order Number LM741J-14/883 or LM741AJ-14/883**  
**NS Package Number J14A**

J14A (REV G)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

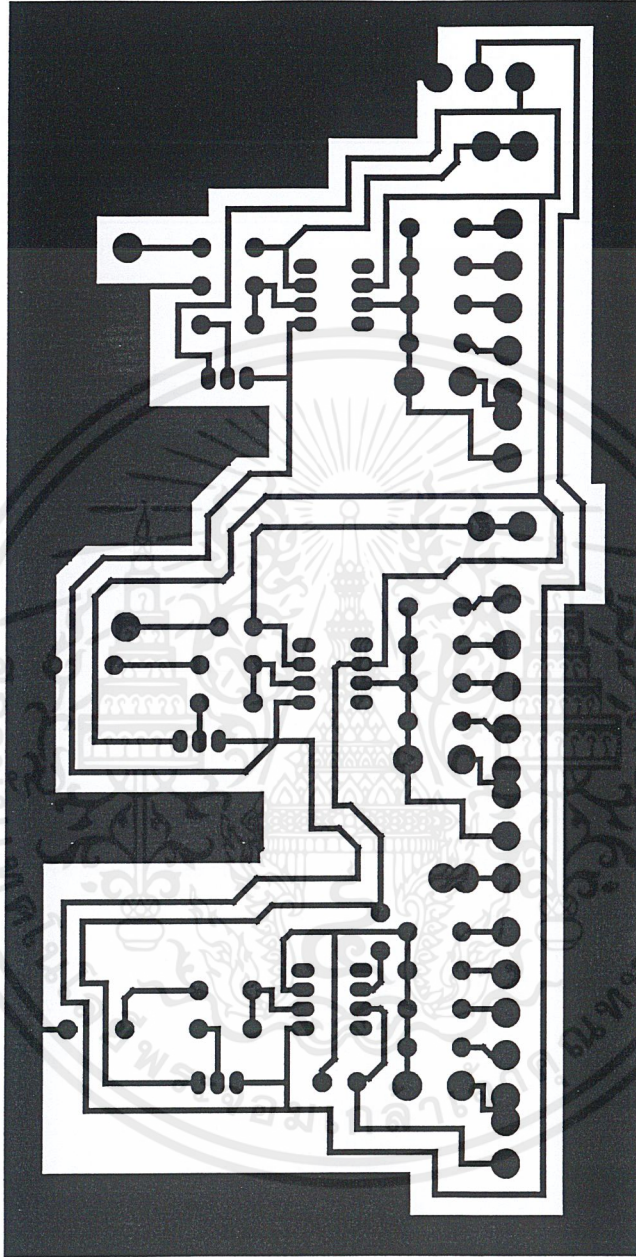






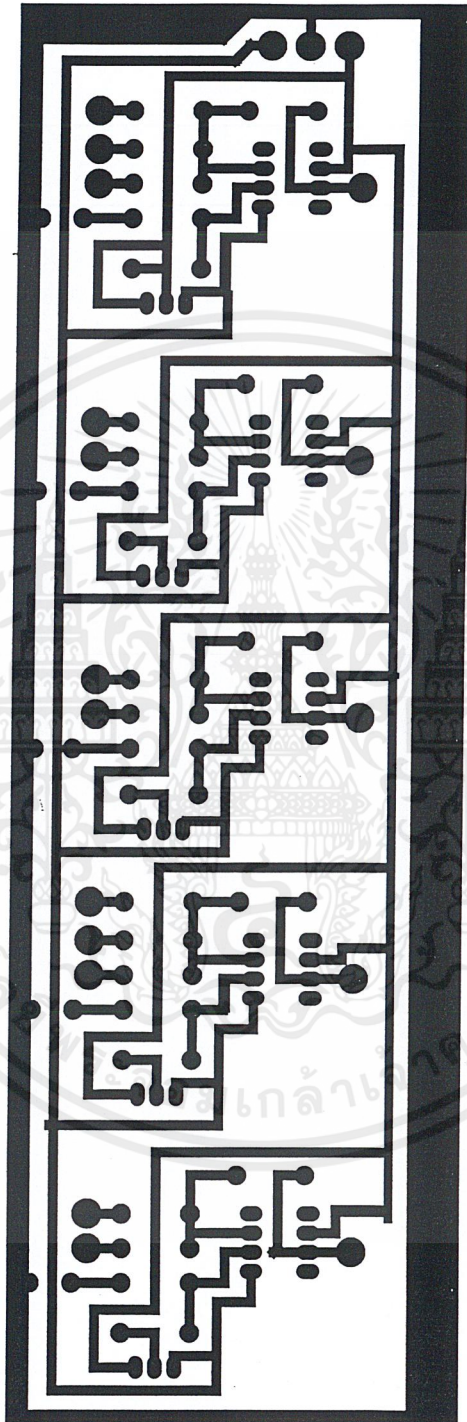
ภาคผนวก ง.  
ลายวงจรที่ใช้ในโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



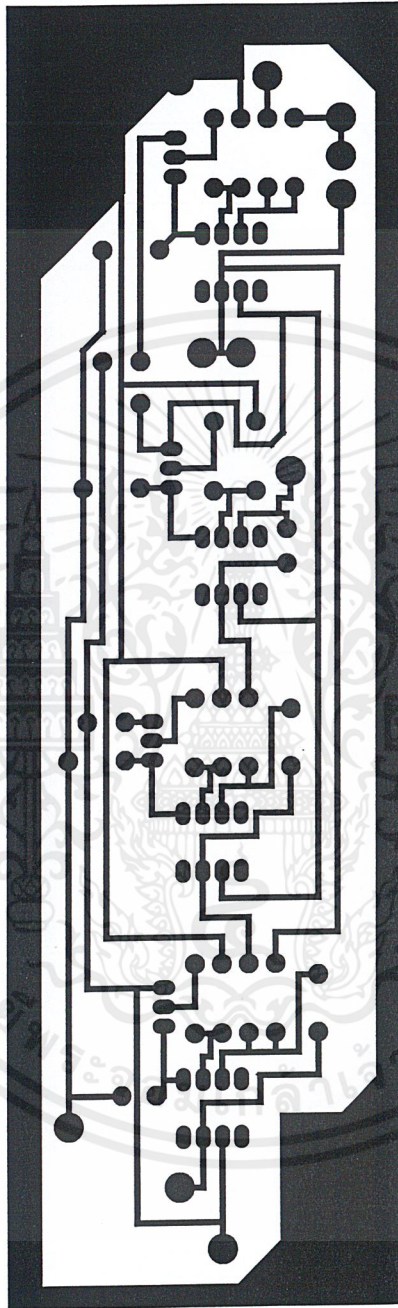
รูปที่ ง.1 ลายวงจรพิมพ์ของวงจรพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



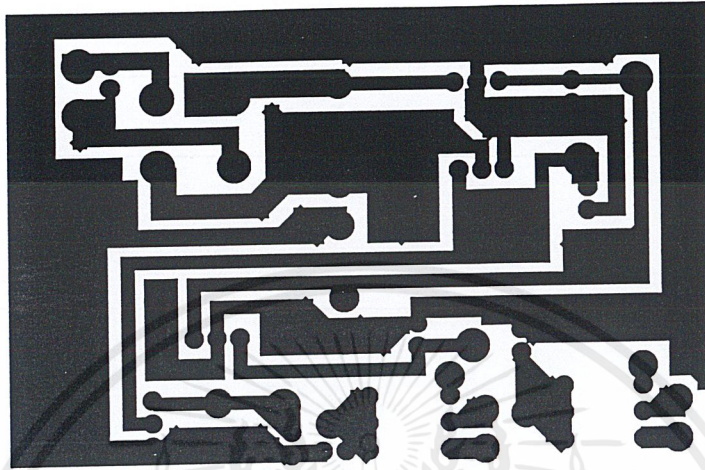
รูปที่ ง.2 ลายวงจรพิมพ์ของวงจรรวมสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

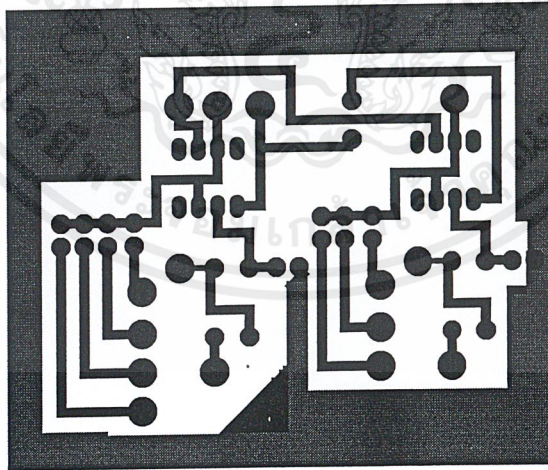


รูปที่ ง.3 ลายวงจรพิมพ์ของวงจรรพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

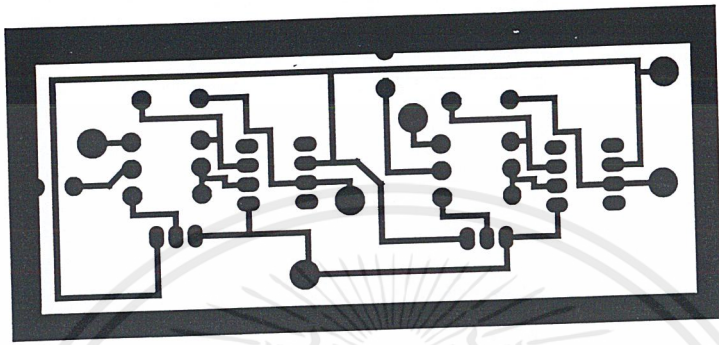


รูปที่ ง.4 ลายวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายไฟ  $\pm 15V, \pm 12V$  ของระบบอันดับหนึ่ง

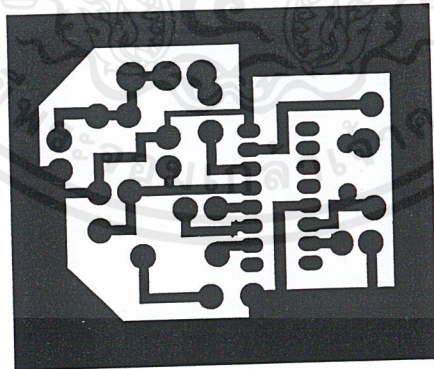


รูปที่ ง.5 ลายวงจรพิมพ์ของวงจรระบบอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

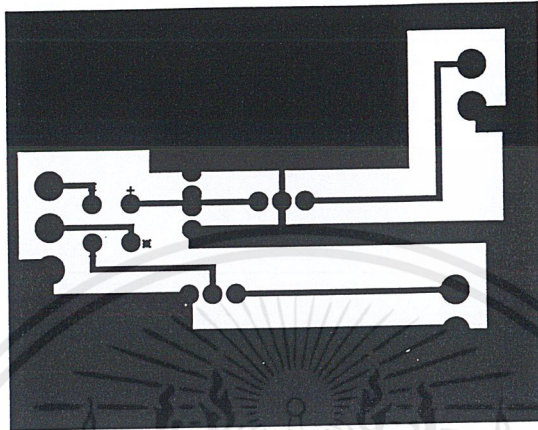


รูปที่ ๓.๖ ลายวงจรพิมพ์ของวงจรขยายกลับเฟสสัญญาณ



รูปที่ ๓.๗ ลายวงจรพิมพ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

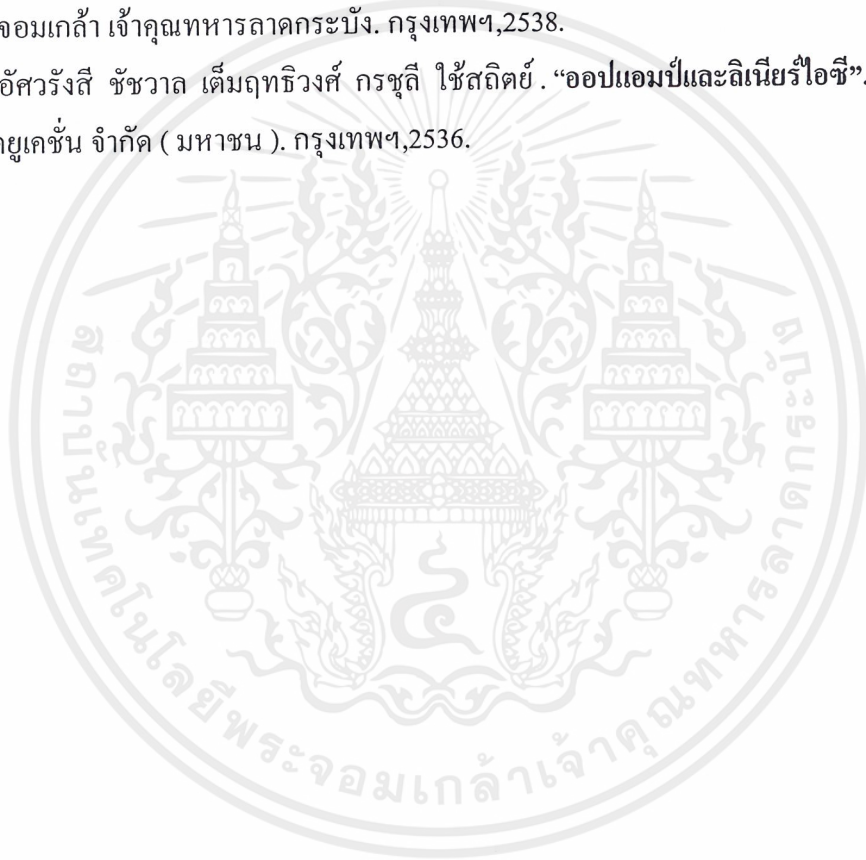


รูปที่ ๓.8 ลายวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายไฟ  $\pm 15V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- โยชิน เปรมปราณีรัชต์. “วิเคราะห์และออกแบบการควบคุมมอเตอร์”. คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ, 2539.
- กิตติ ถิระเชษฐ. “การวิเคราะห์ระบบควบคุมเชิงเส้น”. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ, 2538.
- วิโรจน์ อัสวรังสี ชัชวาล เต็มฤทธิวงศ์ กรชุตี ฐิติชัย. “อปแอมป์และลิเนียร์ไอซี”. บริษัท  
ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ, 2536.



## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายรัชภูมิ กิบุญ
วัน เดือน ปีเกิด	20 สิงหาคม 2520
สถานที่เกิด	จ. เพชรบูรณ์
ภูมิลำเนาเดิม	8/2 ซ. สันติราษฎร์ไพบุลย์ ถ. บูรกรรมโกวิท ต. ในเมือง อ. เมือง จ. เพชรบูรณ์ 67000
ที่อยู่ปัจจุบัน	8/2 ซ. สันติราษฎร์ไพบุลย์ ถ. บูรกรรมโกวิท ต. ในเมือง อ. เมือง จ. เพชรบูรณ์ 67000
โทรศัพท์	056-722290
<b>ประวัติการศึกษา</b>	
ประถมศึกษา	โรงเรียนอนุบาลเมืองเพชรบูรณ์
มัธยมศึกษาตอนต้น	ศูนย์การศึกษานอกโรงเรียนจังหวัดเพชรบูรณ์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคเพชรบูรณ์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคเพชรบูรณ์
ปริญญาตรี	สาขาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
คติพจน์	จงทำความฝันให้เป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

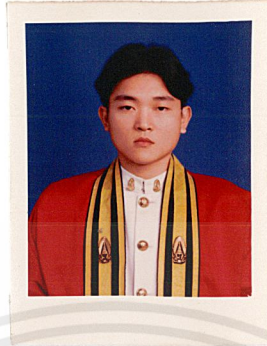
## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายสันติ ศรีตระกูล
วัน เดือน ปีเกิด	27 กรกฎาคม 2517
สถานที่เกิด	จ. อุตรธานี
ภูมิลำเนาเดิม	289 หมู่ 3 ต.หนองขอนกว้าง อ.เมือง จ.อุตรธานี 41000
ที่อยู่ปัจจุบัน	289 หมู่ 3 ต.หนองขอนกว้าง อ.เมือง จ.อุตรธานี 41000
โทรศัพท์	042-243896
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนอนุบาลอุตรธานี
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนอุตรพิชัยรัษฎ์วิทยาคม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคอุตรธานี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคอุตรธานี
ปริญญาตรี	สาขาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
กิตติคุณ	รู้อะไรไม่รู้รู้วิชา รู้รักษาตัวรอดเป็นยอดดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

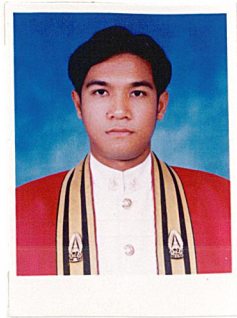
## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายสุชาติ หัตถ์สุวรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	18 พฤศจิกายน 2519
สถานที่เกิด	จ. กรุงเทพมหานคร
ภูมิลำเนาเดิม	220 / 24 ซ.ตากสิน ถ.สมเด็จพระเจ้าตากสิน ต. บางยี่เรือ อ. ชนบุรี จ. กรุงเทพมหานคร 10600
ที่อยู่ปัจจุบัน	220 / 24 ซ.ตากสิน ถ.สมเด็จพระเจ้าตากสิน ต. บางยี่เรือ อ. ชนบุรี จ. กรุงเทพมหานคร 10600
โทรศัพท์	4652987
<b>ประวัติการศึกษา</b>	
ประถมศึกษา	โรงเรียนวัด โพนินมิตร
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนวัดอินทาราม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวส.)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตนนทบุรี
ปริญญาตรี	สาขาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
กติพจน์	ของสูงหมายปองต้องจิต ถ้าไม่คิดหมายปอง จะได้หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายอภิชัย เรืองพริ้ม
วัน เดือน ปีเกิด	22 สิงหาคม 2519
สถานที่เกิด	จ. พัทลุง
ภูมิลำเนาเดิม	373 หมู่ 3 ต.ห่านโพธิ์ อ.เขาชัยสน จ.พัทลุง 93130
ที่อยู่ปัจจุบัน	373 หมู่ 3 ต.ห่านโพธิ์ อ.เขาชัยสน จ.พัทลุง 93130
โทรศัพท์	-
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนเทศบาลบ้านคูหาสวรรค์
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนพัทลุง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคพัทลุง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงซีเมนต์ไทยอนุสรณ์
ปริญญาตรี	สาขาเทคโนโลยีการวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
คตินจน์	จงอย่าทำสิ่งที่ถูกใจ จงทำในสิ่งที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้