

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวควบคุมอ้างอิงโมเดลแบบปรับตัวเองได้

DESIGN OF MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL



T104123



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104123
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552

b. 12103032
i.

ปริญญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
DING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABNG

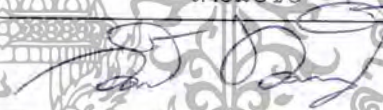

2008
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท การออกแบบตัวควบคุมอ้างอิง โมเดลแบบปรับตัวเองได้
DESIGN OF MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL

นักศึกษาผู้จัดทำ นายเลอสันต์ จันคำ รหัสนักศึกษา 49015388
นายสุรวุฒิ พุทธิระสุ รหัสนักศึกษา 49015399
นายพิศณุกานต์ วงษ์สุวรรณ รหัสนักศึกษา 49015382

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2551

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท		ลายมือชื่อ
รศ.ดร. วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ. อาจินต์	น่วมสำราญ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมอ้างอิงโมเดลแบบปรับตัวเองได้		
	DESIGN OF MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายเลอสันต์	จันคำ	รหัสนักศึกษา 49015388
	นายสุรารุณี	พุทธรระสุ	รหัสนักศึกษา 49015399
	นายพิศณุกานต์	วงษ์สุวรรณ	รหัสนักศึกษา 49015382
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
	รศ. อาจินต์	น่วมสำราญ	
ปีการศึกษา	2551		

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมอ้างอิงโมเดลแบบปรับตัวเองได้เพื่อควบคุมมุมที่เปลี่ยนไปของกระบวนการพืดลมและแผ่นเพลท ในการทดลองได้เปรียบเทียบวิธีการออกแบบตัวควบคุมอ้างอิงแบบปรับตัวเองได้ กับวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีทางเดินราก ทฤษฎีที่นำมาทำการออกแบบตัวควบคุมอ้างอิงโมเดลแบบปรับตัวเองได้โดยใช้ทฤษฎีของ MIT ตัวควบคุมอ้างอิงแบบปรับตัวเองได้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้อัตโนมัติ การทดลองนี้ใช้โปรแกรม Simulink ใน Matlab เป็นเครื่องมือในการจำลองและทดลองควบคุมกระบวนการจริงและมีไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ใ้รับส่งสัญญาณ A/D กับ D/A จากการ์ด Adventech

Thesis Title Design Of Model Reference Adaptive Control

Authors Mr. Lerson Chanka
 Mr. Surawut Puttarasu
 Mr. Pitsanugan Vongsuvan

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Vittaya Tipsuwanporn
 Assoc.Prof. Arjin Numsomran

Year 2008

ABSTRACT

This thesis presents a design of model reference adaptive control (MRAC) Such control system process to control the angle position of the plate according to the set point position manipulated by the fan. This lab a compare method of MARC and PID controller use algorithm of root locus method and MRAC controller use algorithm of MIT. The best character of MRAC is adjust automatic parameter of controller. Our approach applied Simulink in Matlab to design the transfer function PID and MRAC controller and use microcontroller Arm7 for send and receive signal A/D ,D/A from card Adventech.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาและความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร รองศาสตราจารย์ อาจินต์ น่วมสำราญ ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมาอีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปการณและเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่ได้สั่งสอนให้วิชาความรู้และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปริญญาบัตรจนสามารถเสร็จบรรลุลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ น้องๆ เพื่อนๆ พี่ๆ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษากับคณะวิจัยด้วยดีตลอดมา

และที่ลืมเสียไม่ได้คือ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาอันเป็นที่รักยิ่งที่สนับสนุนและเป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ III และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปริยญาณีพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของของปริยญาณีพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของของปริยญาณีพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุม.....	3
2.1 Fan & Plate.....	3
2.2 Simulink.....	3
2.2.1 การจำลองระบบพลศาสตร์ ด้วยโปรแกรม Simulink.....	4
2.2.2 หลักการของสัญญาณและการไหลของตรรก (Signal and Logic Flow).....	4
2.2.3 การเชื่อมต่อบล็อก.....	5
2.2.4 กลุ่มของบล็อกที่ใช้งานบ่อยในเบื้องต้น.....	6
2.2.4.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และแหล่งทิ้งสัญญาณ (Sinks).....	6
2.2.4.2 ระบบต่อเนื่อง (Continuous) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete).....	7
2.2.4.3 การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations).....	7
2.2.4.4 ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities).....	8
2.2.4.5 ตาราง (Lookup Tables).....	8
2.2.4.6 ฟังก์ชันที่กำหนดโดยผู้ใช้ (User-defined Functions).....	9
2.2.4.7 ทางเดินสัญญาณ (Signal Routing).....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4.8 การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา Parameters Configuration.....	10
2.2.5 การสร้างแบบจำลองระบบควบคุม	11
2.2.6 การสร้างแบบจำลองกระบวนการ.....	14
2.2.7 การสร้างแบบจำลองตัวควบคุม	18
2.2.8 การใช้ตัวแปรใน MATLAB ทำงานร่วมกับ Simulink.....	19
2.2.9 การจำลองการทำงานของระบบควบคุม	20
2.2.10 การกำหนดพารามิเตอร์ในการป้อนสัญญาณอินพุต	20
2.2.11 การกำหนดพารามิเตอร์ในการป้อนสัญญาณเอาต์พุต.....	21
2.2.12 การกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน	22
2.2.12.1 Start time	22
2.2.12.2 Stop time.....	23
2.2.12.3 Solver Option	23
2.2.12.4 Max step size และ Min step size	23
2.3 PID.....	30
2.3.1 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมพีไอดี	30
2.3.2 กริยาการควบคุมแบบป้อนกลับ	32
2.3.2.1 กริยาการควบคุมแบบ ON-OFF	32
2.3.2.2 กริยาการควบคุมแบบ Proportional (P).....	33
2.3.2.3 กริยาการควบคุมแบบ Integral (I).....	34
2.3.2.4 กริยาการควบคุมแบบ Derivative (D).....	35
2.3.2.5 กริยาการควบคุมแบบ Proportional- Integral (PI).....	36
2.3.2.6 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD).....	37
2.3.2.7 กริยาการควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID).....	37
2.4 Model reference adaptive control (MRAC).....	38
บทที่ 3 การจำลองระบบควบคุม MRAC.....	47
3.1 Open Loop Model	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 PID Control	48
3.2.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID โดยวิธีทางเดินของราก	48
3.3 MRAC	53
3.4 PID & VRAC Control	54
บทที่ 4 การสร้างระบบควบคุม MRAC	55
4.1 ฮาร์ดแวร์	55
4.1.1 ARM 7	55
4.1.1.1 การติดต่อและการควบคุมการทำงานของพอร์ตอนุกรมประตงค์	56
4.1.1.2 การติดต่อและการเขียนโปรแกรมสั่งงานของวงจรแปลง แอนะล็อกเป็นดิจิทัล(A/D)	57
4.1.1.3 การติดต่อและการเขียนโปรแกรมสั่งงานของวงจรแปลง ดิจิทัลเป็นอนาล็อก (D/A)	58
4.1.1.4 การติดต่อและการเขียนโปรแกรมสั่งงานอุปกรณ์ I ² C	59
4.1.1.5 เขียนโปรแกรมติดต่อกับ REAL TIME CLOCK	59
4.1.1.6 คำสั่งควบคุมโมดูลตัวแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD interface)	62
4.1.1.7 โครงสร้างบอร์ด ET-BASE ARM7024 (ADuC7024)	63
4.1.2 Card Interface	64
4.1.3 Fan & Plate	65
4.1.3.1 โครงสร้างกระบวนการพัดลมและแผ่นเพลท	65
4.1.3.2 มอเตอร์และพัดลม	66
4.1.3.3 ชุดขับมอเตอร์	66
4.1.3.4 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงของแผ่นเพลท	67
4.1.3.5 พาวเวอร์ซัพพลาย และวงจร Signal Conditioning	68
4.2. ซอร์ฟแวร์	69
4.2.1 โปรแกรม Keil uVision 3	69
4.2.2 Matlab & Simulink	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.1 การติดตั้งโปรแกรมเมื่อต้องการใช้งาน	
Real Time Windows Target	72
4.2.2.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ใน Simulink สำหรับ	
Real Time Workshop.....	73
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	75
5.1 Modelling	77
5.2 PID Control	78
5.3 MRAC	79
บทที่ 6 บทสรุป.....	82
6.1 สรุป.....	82
6.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	82
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก	84

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ตารางแสดงการปรับระดับของสัญญาณ MV.....	75
5.2 ตารางแสดงการปรับระดับของสัญญาณ PV.....	76



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการพัลลวมและแผ่นเพลท.....	3
2.2 แสดงองค์ประกอบภายในของ Simulink Libraries ที่ปรากฏใน Simulink V. 7	5
2.3 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อกันของบล็อก.....	5
2.4 แสดงบล็อกต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อกแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และแหล่ง สัญญาณ (Sinks)	6
2.5 แสดงบล็อกต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อกของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System)	7
2.6 แสดงบล็อกต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)	8
2.7-ก แสดง กลุ่ม Lookup Tables และกลุ่ม Signal Routing).....	19
2.7-ข แสดงกลุ่มบล็อก Discontinuities และกลุ่ม User-defined Functions.....	10
2.8 แสดงหน้าต่างที่ใช้ในการกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Configuration Parameters) ...	11
2.9 หน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลอง.....	11
2.10 การเลือกบล็อกที่ต้องการจาก Simulink Library Browser.....	12
2.11 บล็อกของระบบตัวอย่าง	13
2.12 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างบล็อก	13
2.13 แบบจำลองทางกลในรูปแบบของสมการ Differential Equation	15
2.14 ไดอะบล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Transfer Function	16
2.15 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบของ Transfer Function	16
2.16 ไดอะบล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก State –Space	17
2.17 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบ State –Space	18
2.18 ไดอะบล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Step.....	21
2.19 ไดอะบล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์สำหรับบล็อก Scope.....	22
2.20 ไดอะบล็อกที่ใช้สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน	22
2.21 ผลตอบสนองแบบรูปเปิดของระบบควบคุม	24
2.22 ผลตอบสนองแบบรูปปิดของระบบควบคุม	25
2.23 ผลตอบสนองแบบรูปปิดเมื่อรวมตัวควบคุมของระบบควบคุม.....	26
2.24 บล็อกไดอะแกรมแสดงค่าเกณฑ์ต่างๆ	27
2.25-ก ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อกำหนดจำนวนแกนในบล็อก Scope เท่ากับ 3	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.25-ข ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อกำหนดจำนวนแกนในบล็อก Scope เท่ากับ 15	28
2.25-ค ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อกำหนดจำนวนแกนในบล็อก Scope เท่ากับ 30	28
2.26 บล็อกไดอะแกรมการรวมสัญญาณเพื่อแสดงผลที่กราฟเดียว	29
2.27 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อใช้บล็อก Mux เพื่อรวมสัญญาณ	29
2.28 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยทั่วไป	31
2.29 แสดงกริยาการควบคุมแบบ ON-OFF	32
2.30 แสดงคุณสมบัติของกริยาการควบคุมแบบ Proportional	34
2.31 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Integral	35
2.32 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Derivative	36
2.33 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบPI (Direct action)	36
2.34 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PD	37
2.35 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PI (Direct action)	38
2.36 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ปรับตัวได้	39
2.37 โครงสร้างระบบปรับตัวเองมีรูปแบบคล้ายกับระบบปรับตัวทางอ้อม	40
2.38 โครงสร้างของ MRAC ที่นิยมกันมากที่สุด	40
2.39 บล็อกตัวควบคุมแบบ PID	43
2.40 บล็อกไดอะแกรม MRAC	45
2.41 แสดงการนำข้อมูลมาจำลองใน simulink	46
3.1 แสดงการจำลองแพล้นแบบลูปเปิด	47
3.2 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบลูปเปิด	47
3.3 กราฟแสดงผลตอบสนองของกระบวนการแบบลูปเปิดเมื่อจ่ายอินพุทแบบ Unit Step	48
3.4 ผลตอบสนองของกระบวนการลูปเปิดเมื่อจ่ายอินพุทแบบ Unit Step	49
3.5 การหาค่าทางเดินของราก	50
3.6 แสดงการจำลองระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID โดยวิธีทางเดินของราก	51
3.7 กราฟแสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PID โดยวิธีทางเดินของราก	51
3.8 แสดงการจำลองระบบควบคุมแบบ PID	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.9 กราฟแสดงผลตอบสนองของการควบคุมแบบ PID	52
3.10 แสดงการจำลองระบบควบคุม MRAC	53
3.11 กราฟแสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ MRAC ที่ $\text{gamma} = 0.0005$	53
3.12 กราฟแสดงการหาค่าพารามิเตอร์การหาค่าตัวควบคุมแบบ PID	54
3.13 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ MRAC & PID	54
4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมโครงสร้างระบบ	55
4.2 บอร์ด ARM7	55
4.3 แสดงการจัดขาของ ADuC7024	56
4.4 แสดงรูปสัญญาณเมื่อทำงานอยู่ในโหมด Fully Difference	57
4.5 Pseudo Differential and Single-Ended Modes	57
4.6 การแปลงสัญญาณ ADC เมื่อทำงานอยู่ในโหมด Differential	58
4.7 วงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาล็อก (D/A)	58
4.8 ลักษณะวงจรการต่อสายและรายละเอียดขาสัญญาณต่างๆ	59
4.9 แสดงแอดเดรสของ Register ต่างๆ ใน DS1307	60
4.10 Timing Diagram การส่งข้อมูล	61
4.11 โหมดการเขียนข้อมูล	61
4.12 การอ่านข้อมูล	62
4.13 Schematic ของการต่อจอแสดงผล LCD กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ADuC7024	62
4.14 บอร์ด ET-BASE ARM7024(ADuC7024)	63
4.15 การ์ด PCI 1711	64
4.16 คอนเน็กเตอร์สำหรับการ์ด PCI 1711	64
4.17 แสดงโครงสร้างกระบวนการพัฒมและแผ่นเพลท	65
4.18 แสดงมอเตอร์และใบพัด	66
4.19 แสดงบอร์ดขับมอเตอร์และวงจร	66
4.20 แสดงโพเทนชิโอมิเตอร์	67
4.21 พาวเวอร์ซัพพลาย 12 Vdc	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.22 วงจรขยายสัญญาณ PV เข้าตัวควบคุม	68
4.23 วงจรลดทอนสัญญาณ MV เข้าสู่ไคร์มอเตอร์	68
4.24 แสดงบอร์ด Signal Conditioning.....	69
4.25 การเปิดโปรแกรม u Vision3	70
4.26 การสร้างไฟล์โปรเจกและเลือก ARM7 เบอร์ ADuC7024.....	70
4.27 การเขียน source code และเพิ่มเข้าไปใน source file.....	71
4.28 การสร้างโปรเจกและ HEX ไฟล์สำหรับ PROM	71
4.29 Hardware Implementation	73
4.30 RTW System Target File	74
5.1 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบเปิด.....	77
5.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบเปิด.....	77
5.3 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดี.....	78
5.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ค่า $K_p = 0.7$; $K_D = 0.25$; $K_I = 0.5$;	78
5.5 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบ MRAC.....	79
5.6 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ MRAC ที่ $\text{gramma} = 0.0005$	80
5.7 แสดงพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ MRAC	80
5.8 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ MRAC ที่ $\text{gramma} = 0.0005$ เมื่อมีสิ่งรบกวนภายนอก.....	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปริญญานิพนธ์

การควบคุมกระบวนการที่พบมากในอุตสาหกรรมจะมีรูปแบบแตกต่างกันตามลักษณะงาน ดังนั้นการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมซึ่งปกติแล้วจะเป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) จะต้องอาศัยผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ในการทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสม เพื่อแก้ไขปัญหอปริญญานิพนธ์นี้จึงนำเสนอตัวควบคุมแบบปรับตัวเองได้ ซึ่งตัวควบคุมแบบนี้มีข้อดีตรงที่ว่ามันจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมเอง โดยอัตโนมัติตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้

สำหรับการศึกษาและวิจัยกระบวนการพัฒนาและแผ่นเพลท ได้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างชุดทดลองกระบวนการพัฒนาและแผ่นเพลท การออกแบบตัวควบคุมและการนำตัวควบคุมที่ออกแบบแล้วมาควบคุมกระบวนการจริง จากนั้นทำการเปรียบเทียบว่าค่าที่ได้จากการจำลองกระบวนการจาก โปรแกรม MATLAB และค่าที่ได้จากกระบวนการจริงมีค่าเท่ากันหรือไม่วิธีการหาสมการคุณลักษณะนั้นก็มียุคด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีก็จะมีวิธีการที่แตกต่างกันออกไปแต่ละวิธีก็จะใช้ได้กับบางกระบวนการเท่านั้น ฉะนั้นวิธีการเลือกใช้วิธีการหาสมการคุณลักษณะที่เหมาะสมที่สุดก็คือการนำแต่ละวิธีมาใช้ในการหาแล้วดูว่านำไปใช้งานได้จริงหรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาถึง โครงสร้างและคุณลักษณะของกระบวนการพัฒนาและแผ่นเพลท
2. เพื่อศึกษาถึง โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้กับกระบวนการพัฒนาและแผ่นเพลท
3. เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อกระบวนการของ Controller แบบ PID และ MRAC
4. เพื่อนำทฤษฎีการควบคุมแบบ MRAC มาควบคุมกระบวนการขอบเขตการศึกษา

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ออกแบบและสร้างกระบวนการพัฒนาและแผ่นเพลท
2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ของตัว Actuator
3. ศึกษาโครงสร้างของกระบวนการพัฒนาและแผ่นเพลทและหาแบบจำลอง
4. ออกแบบตัวควบคุมแบบ PID
5. ออกแบบตัวควบคุมแบบ MRAC โดยใช้กฎของ MIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาตัวควบคุมแบบ PID และ MRAC
2. ออกแบบตัวควบคุมแบบ PID โดยใช้เทคนิค MRAC
3. ออกแบบและสร้างกระบวนการพัลลวมและแผ่นเพลท
4. เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 เพื่อทำหน้าที่เป็น Actuator
5. จำลองระบบควบคุมโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB
6. ทำการทดลอง บันทึกผลและสรุปผลการทดลองของตัวควบคุมแบบ PID และ MRAC

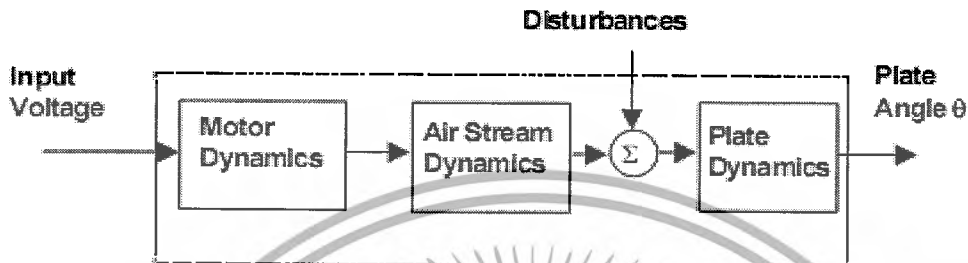


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุม

2.1 Fan & Plate



ภาพที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการพัดลมและแผ่นเพลท

จากภาพที่ 2.1 เป็นบล็อกไดอะแกรมของกระบวนการพัดลมและแผ่นเพลทเมื่อมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาจ่ายให้กับมอเตอร์ มอเตอร์พัดลมก็จะหมุนสร้างระดับแรงลมไปดันแผ่นเพลทเพื่อควบคุมแผ่นเพลทตามองศาที่กำหนด กระบวนการนี้สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีระบบเป็นอันดับสอง โดยพิจารณาจากกราฟจากโปรแกรม Simulink โดยจ่ายอินพุตแบบ Unit Step

2.2 Simulink

Simulink เป็นโปรแกรมที่เป็นส่วนหนึ่งที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท The Mathworks โดยเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ลักษณะการโปรแกรมในรูปแบบของ Block Diagram เป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งมักจะพบปัญหาในการหา Closed Form Solution หรือการหาคำตอบที่เทียบกับเวลาในช่วงเวลาใด ๆ และเนื่องด้วยระบบทางวิศวกรรมโดยส่วนใหญ่จะสามารถอธิบายด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์เช่นกัน ดังนั้น Simulink จะเข้ามามีบทบาทในการทำให้การจำลองการตอบสนองของระบบมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น

สำหรับองค์ประกอบของโปรแกรม นั้นไม่ว่าจะจะเป็นวงจรทางตรรกศาสตร์ไปจนถึงระบบควบคุมสำหรับระบบพลศาสตร์ที่ซับซ้อนจะสามารถสร้างแบบจำลองได้ โดยอาศัยเพียง Building Blocks พื้นฐานที่มีมาให้จาก Simulink Libraries นอกเหนือจากนั้นยังมีเครื่องมือในส่วนอื่น ๆ ที่ในปัจจุบันได้เพิ่มเติมเข้ามาให้การใช้งานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น Fuzzy Logic Toolbox, Neural Network Toolbox, Digital Signal Processing (DSP) หรืออื่น ๆ ซึ่งในปัจจุบันพบว่าเครื่องมือต่าง ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเอนำไปใช้ประโยชน์ดานการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

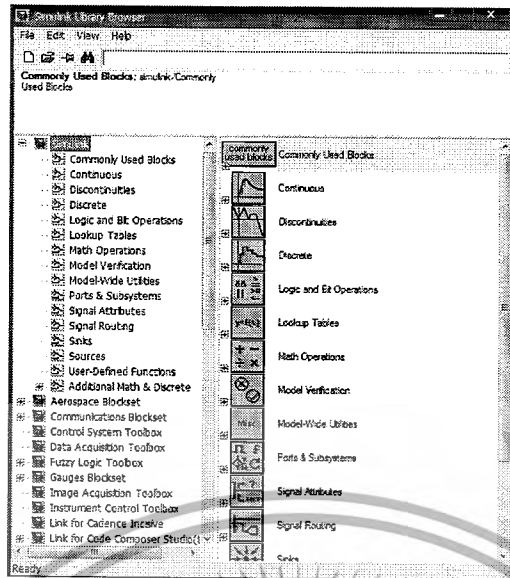
ที่มีให้สามารถทำให้การจำลองหรือวิเคราะห์การทำงานของระบบนั้นสามารถทำได้ตั้งแต่ระบบที่มีความง่ายจนถึงระบบที่มีความซับซ้อนอย่างมาก โดยไม่ต้องมีการเขียน โปรแกรมเพิ่มเติมแต่อย่างใด

2.2.1 การจำลองระบบทางพลศาสตร์ (Dynamic System Simulation) ด้วยที่ใช้โปรแกรม Simulink

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีส่วนช่วยให้การแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ได้ใช้ประโยชน์จากคณิตศาสตร์อย่างเต็มรูปแบบในการจำลองระบบทางพลศาสตร์ใด ๆ โดยไม่ต้องอาศัยการศึกษาหรือทดลองจากระบบทางกายภาพจริง โดยการจำลองการทำงานของระบบพลศาสตร์ (Dynamic System Simulation) ดังกล่าวนั้นได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพในการทำงานทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานทางด้านการออกแบบระบบ (System Design) และงานการออกแบบระบบควบคุม (Controller System Design) ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองปัญหาช่วยประหยัดทั้งงบประมาณและเวลา (Prototype) ของระบบทางกายภาพที่สนใจ ซึ่งในอดีตจะต้องสูญเสียให้กับการสร้างระบบต้นแบบ

2.2.2 หลักการของสัญญาณและการไหลของตรรก (Signal and Logic Flow)

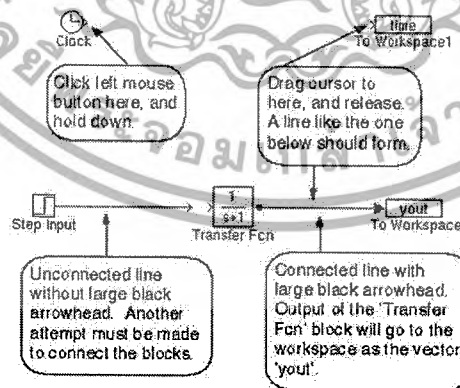
ในโปรแกรม Simulink นั้นการจำลองปัญหาของระบบจะต้องอาศัยหลักการสร้างแผนภูมิ (Simulation Diagram) เพื่อการกำเนิดการรับหรือส่งผ่านสัญญาณหรือข้อมูลที่ตรงตามทราบในแผนภูมิที่ถูกสร้างขึ้นข้อมูลจากบล็อกประเภทต่าง ๆ จะถูกส่งผ่านไปสู่อบล็อกอื่น ๆ โดยผ่านเส้นนำสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างบล็อกนั้น ๆ สัญญาณสามารถที่จะถูกสร้างและส่งไปสู่อบล็อกอื่น ๆ ทั้งแบบสถิตและแบบแปรผัน ข้อมูลสามารถป้อนให้แก่ฟังก์ชันเพื่อการกระทำทางตรรกศาสตร์หรือทางคณิตศาสตร์ข้อมูลสามารถที่จะถูกส่งไปสู่อแหล่งทิ้งข้อมูล (Sink) ซึ่งสามารถที่จะแสดงให้เห็นในลักษณะของ Oscilloscope หรือ Display หรือแม้กระทั่งการเก็บในรูปแบบของไฟล์คอมพิวเตอร์ (Save to Files) สิ่งที่ต้องพึงระวังในการจำลองปัญหานั้นข้อมูลต่าง ๆ จะถูกดำเนินการรับและส่งในลักษณะเป็นช่วงเวลา (Discrete Times) เท่านั้น ดังนั้น Step Time หรือ Simulation Time Step หรือ Integration Time Step ที่กำหนดเพื่อการจำลองปัญหานั้นจะเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยต้องมีการเลือกใช้ Step Time ที่เหมาะสมนั้นจะถูกกำหนดโดยระบบย่อยที่มีการตอบสนองเร็วที่สุดในแผนภูมิที่กำหนดขึ้น



ภาพที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบภายในของ Simulink Libraries ที่ปรากฏใน Simulink V. 7

2.2.3 การเชื่อมต่อบล็อก

ในการเชื่อมต่อบล็อกบน Simulation Diagram นั้นให้กดเมาส์ปุ่มซ้ายที่ Output ของบล็อกหนึ่งแล้วค้างปุ่มเอาไว้โดยการเคอร์เซอร์ของเมาส์จะเปลี่ยนรูปเป็นของเครื่องหมายบวก หลังจากนั้นลากเมาส์ (Drag) (จะเห็นเส้นประเกิดขึ้นและวิ่งตามเครื่องหมายบวกดังกล่าว) จากบล็อกหนึ่งไปสู่ Input ของบล็อกที่ต้องการจะเชื่อมต่อกันเมื่อกลายเมาส์ปุ่มซ้ายที่ Input ของอีกบล็อกหนึ่งแล้วเส้นประจะเปลี่ยนเป็นเส้นทึบแสดงถึงการเชื่อมต่อกันของบล็อกทั้งสอง ภาพที่ 2.3 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อกันของบล็อก



ภาพที่ 2.3 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อกันของบล็อก

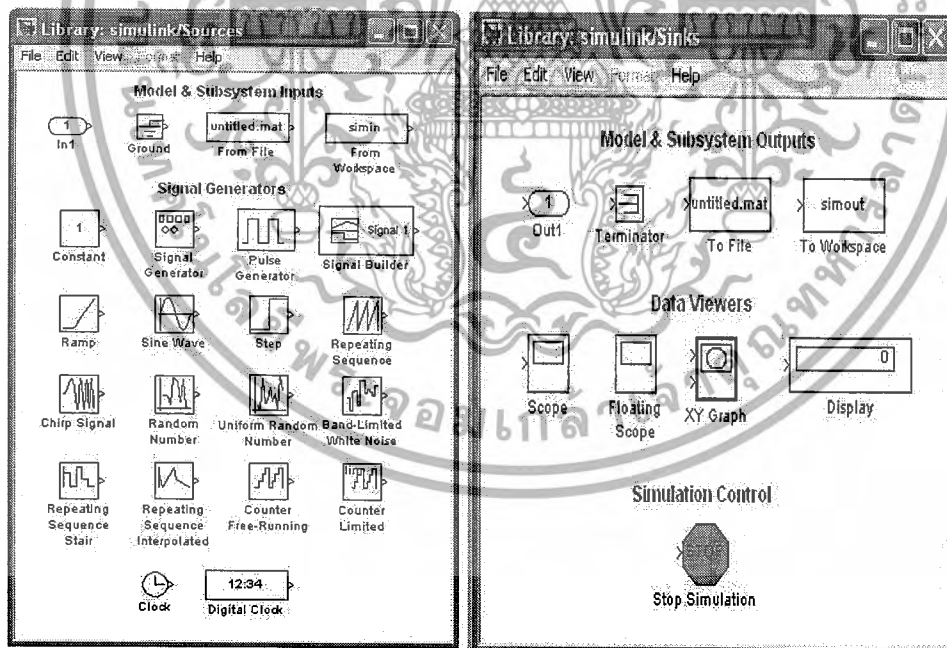
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 กลุ่มของบล็อกที่ใช้งานบ่อยในเบื้องต้น

2.2.4.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และแหล่งทิ้งสัญญาณ (Sinks)

กลุ่มบล็อกแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) ที่กำหนดมาให้มีนั้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณที่มักใช้บ่อยที่สุดในการวิเคราะห์ระบบทางพลศาสตร์ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ (Constant) เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่น (Sinusoidal Wave) แหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Step หรืออื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ทำหน้าที่เสมือน Signal Generator ทางกายภาพที่ใช้ในการทดลองทางวิศวกรรมอื่น ๆ หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่มักจะใช้บ่อยครั้งเพื่อจับเวลาของการจำลองปัญหาหรืออื่น ๆ กลุ่มบล็อกแหล่งทิ้งสัญญาณ (Sinks) เป็นกลุ่มบล็อกที่มัก จะใช้ในการเก็บสัญญาณที่ต้องการมากกว่าการทิ้งสัญญาณอย่างที่ชื่อกำหนด

โดยทั่วไปแล้วบล็อกที่จะใช้บ่อยคือบล็อกของ Scope ประเภทต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในจุดใด ๆ ของระบบที่กำลังถูกจำลองในขณะที่กำลังทำการจำลองหรือบล็อกที่เก็บสัญญาณ (To Workspace) เพื่อใช้ในการดำเนินการอื่น ๆ ที่พื้นที่ทำงานของ MATLAB ภาพที่ 2.4 แสดงบล็อกต่าง ๆ ของทั้งแหล่งกำเนิดและแหล่งสัญญาณของ Simulink V. 6

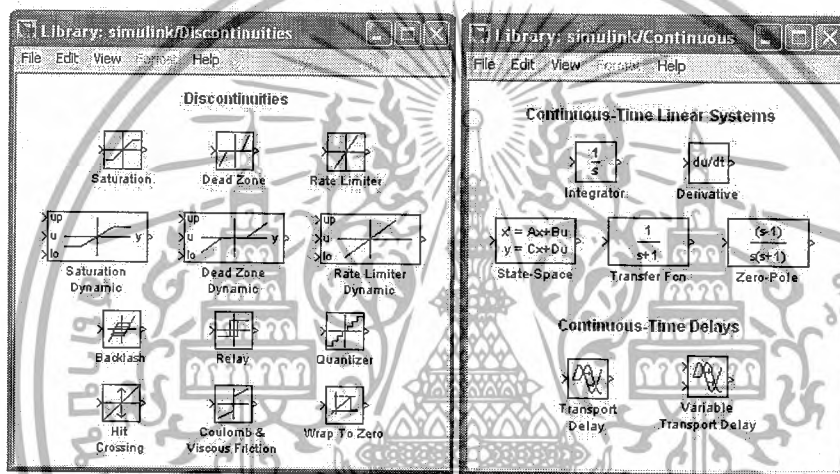


ภาพที่ 2.4 แสดงบล็อกต่าง ๆ ภายในกลุ่มบล็อกของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และแหล่งของสัญญาณ (Sinks)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.2 ระบบต่อเนื่อง (Continuous) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete)

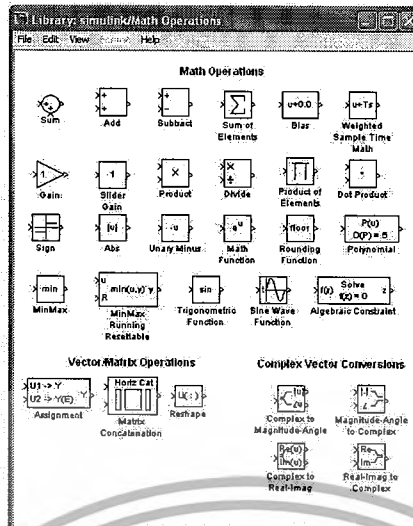
กลุ่มบล็อกของจะมีทั้งระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาบ่อย ระบบพลศาสตร์ทุกระบบสามารถที่จะถูกวิเคราะห์ในลักษณะของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ซึ่งไม่ว่าระบบจะถูกจำลองในลักษณะใดโปรแกรม Simulink นั้นสามารถตอบสนองต่อลักษณะรูปแบบของระบบได้ในหลายลักษณะ เช่น Transfer Function หรือ Integration Blocks หรือ Delay Blocks หรืออื่น ๆ ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะบล็อกที่ใช้ในการกำหนดระบบใน ลักษณะต่าง ๆ ของทั้งระบบต่อเนื่อง Continuous System หรือระบบที่ไม่ต่อเนื่อง Discrete System ของ Simulink V. 6



ภาพที่ 2.5 แสดงบล็อกต่าง ๆ ภายในกลุ่มบล็อกของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System)

2.2.4.3 การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)

กลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาบ่อยกลุ่มบล็อกนี้จะประกอบไปด้วยบล็อกย่อย ๆ ที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการต่าง ๆ ทางคณิตศาสตร์ เช่น การนำสัญญาณมาบวกกัน (Sum) การคูณสัญญาณด้วยค่าคงที่ (Gain) หรืออื่น ๆ ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ของ Simulink V. 6



ภาพที่ 2.6 แสดง บล็อกต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อกการดำเนินการ ทางคณิตศาสตร์(Math Operations)

2.2.4.4 ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities)

ข้อได้เปรียบอีกข้อหนึ่งของโปรแกรม Simulink คือความสามารถในการจำลองระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear System Simulation) ซึ่งในการหาคำตอบด้วยมือหรือการหาคlosed Form Solution โดยทั่วไปจะเป็นการยากฟังก์ชันหรือลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นที่พบบ่อยคือ Saturation, Signum, Limited Slew Rate, Switch หรืออื่น ๆ ภาพที่ 2.7-ก แสดงกลุ่มบล็อก Discontinuities ซึ่งจะแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งสามารถใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ทางวิศวกรรมได้หลายเหตุการณ์ เช่น การใช้ Saturation บล็อกมักจะใช้แทนข้อจำกัดทางกายภาพ เช่น ข้อจำกัดของแรงดันทางเข้ามอเตอร์ หรือระดับแรงดันสูงสุดในระบบไฮดรอลิกส์บล็อก Switches เป็นอีกบล็อกหนึ่งที่ใช้บ่อยจะเป็นบล็อกที่ใช้ในการจำลองปัญหา IF-THEN เช่น เดียวกับที่พบในการเขียนโปรแกรม โดยทั่วไปบล็อก Slew Rates ใช้ในการจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าทางกายภาพ เช่น ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น

2.2.4.5 ตาราง (Lookup Tables)

บล็อกที่แสดงตารางต่าง ๆ เป็นอีกบล็อกหนึ่งที่มีประโยชน์มากสำหรับใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ในบางครั้งไม่สามารถกำหนดได้เป็นสมการหรือได้มาจากการที่เราทดลองเช่นค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อความเร็วของรถยนต์ ซึ่งมักจะได้จากการทดลองหรืออื่น ๆ ภาพที่ 2.7-ข แสดงกลุ่มบล็อก Discontinuities ซึ่งแสดงความไม่เป็นเชิงเส้น และกลุ่มบล็อก Lookup Tables

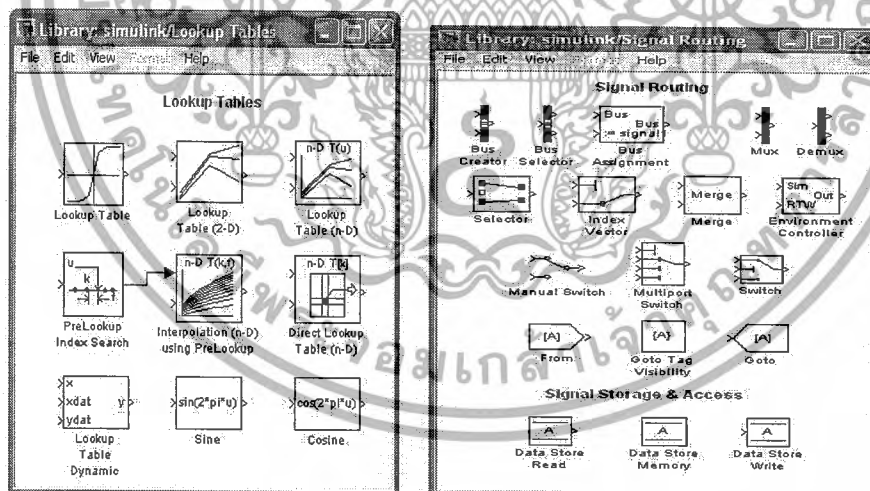
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.6 ฟังก์ชันที่กำหนดโดยผู้ใช้ (User-defined Functions)

ฟังก์ชันที่เขียนขึ้นมาโดยใช้ MATLAB โปรแกรม (m-file) หรือเขียนจากภาษา C หรือ Fortran สามารถที่จะนำมาใช้ร่วมกับ โปรแกรม Simulink โดยใช้บล็อกในหมวด User-defined Functions โปรแกรมไฟล์ที่เขียนด้วยภาษา C หรือด้วยโปรแกรม m-file นั้นเมื่อถูกเรียกใช้บล็อกที่เกี่ยวข้องจะถูก Executed ทุก Step Size ของการจำลองปัญหา ซึ่งจะมีผลทำให้การจำลองปัญหา มีความล่าช้าแต่สะดวกในการเขียนโปรแกรม S-Functions จะเป็น Dynamic Linked Libraries (DLL) ซึ่งสามารถเขียนด้วยภาษา C เช่น เดียวกันและเมื่อผ่านการ Compiled แล้วจะเป็นไฟล์ที่ชื่อเรียกว่า MEX-file ซึ่งจะมีต่อผลทำให้การจำลองปัญหา มีความรวดเร็วมากขึ้นภาพที่ 2.7-ข แสดงกลุ่มบล็อก User-defined Functions เช่นกัน

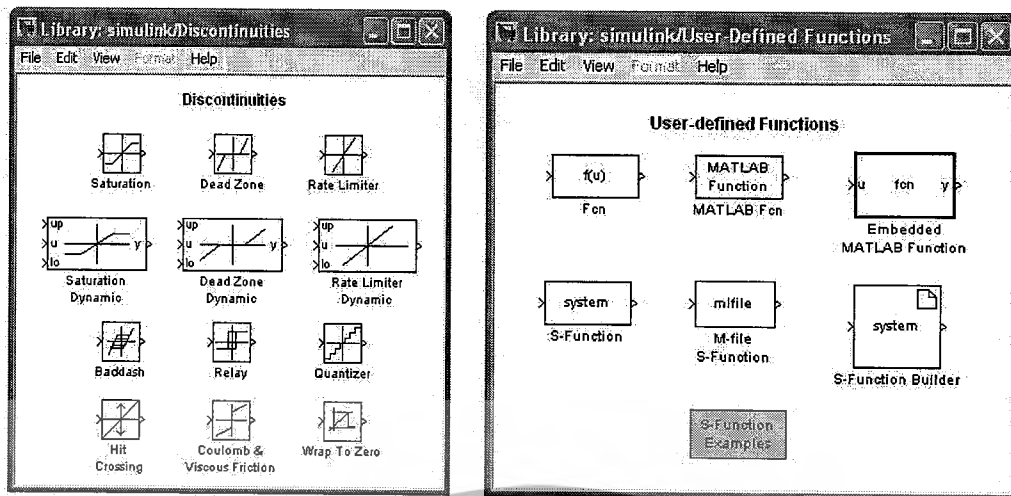
2.2.4.7 ทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)

ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อนบางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องมีการรับ - ส่ง สัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งการใช้เส้นเชื่อมอาจจะไม่สะดวกในการทำงานซึ่งบล็อกในชุดนี้เป็นประเภท GOTO บล็อกหรือ FROM บล็อกหรือ บล็อกประเภท Multiplexing จะมีประโยชน์ในการจัดระเบียบของแผนภูมิให้มีระเบียบมากขึ้นภาพที่ 2.7-ก แสดงกลุ่มบล็อก Signal Routing



ภาพที่ 2.7-ก แสดง กลุ่ม Lookup Tables และกลุ่ม Signal Routing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

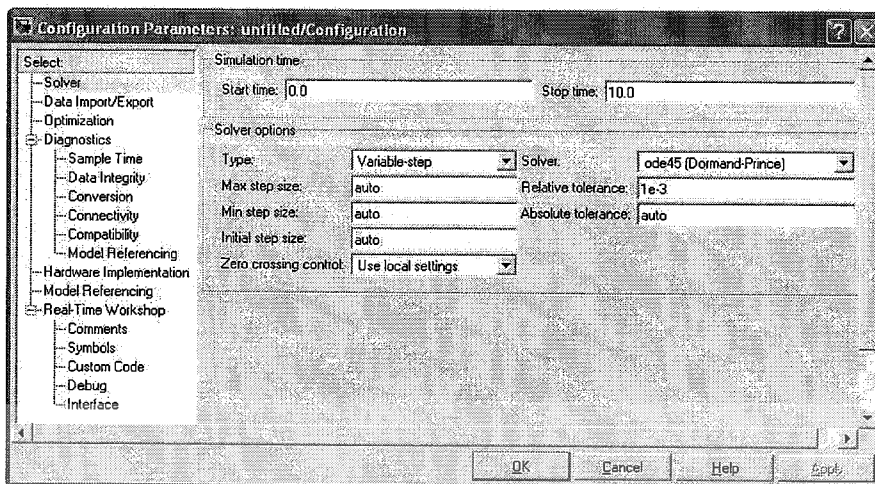


ภาพที่ 2.7-ข แสดงกลุ่มบล็อก Discontinuities และกลุ่ม User-defined Functions

2.2.4.8 การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)

จำลองปัญหาบนคอมพิวเตอร์ นั้นจะต้องอาศัยเทคนิคของการเขียนระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการแก้ปัญหาและหาคำตอบต่าง ๆ ของสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับโปรแกรม Simulink นั้น ระบบในรูปแบบต่าง ๆ สามารถที่จะจำลองทั้งในแบบของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ขึ้นอยู่กับลักษณะองค์ประกอบของระบบย่อย การจำลองสามารถที่จะถูกกำหนดให้เริ่มหรือหยุดที่ช่วงเวลาหรือส่วนหนึ่งของเวลาได้ตามกำหนด ข้อสังเกตที่ต้องพึงระวังคือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหากับระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองปัญหา หรือระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจจะไม่ตรงกัน เช่น คอมพิวเตอร์อาจจะใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจเพียง 1 วินาทีเป็นต้นในการจำลองแบบปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภทที่ Step Size มีค่าไม่คงที่นั้น (Variable Step Size) ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภท Step Size คงที่ (Fixed Step Size) เป็นวิธีที่มักจะนิยมใช้ในการจำลองปัญหา ทั้งนี้เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลาหรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ Step Size ที่ใช้ในการจำลองปัญหาจะต้องมีการกำหนดและจะมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบทางพลศาสตร์ที่สนใจ เช่น ในระบบทางความร้อน Step Size อาจอยู่ประมาณ 2-3 วินาทีในขณะที่ระบบควบคุมมอเตอร์อาจจำเป็นที่จะต้องใช้ Step Size ที่มีค่าน้อยถึง 0.002-0.003 วินาทีโดยทั่วไปกฎที่ใช้ในการเลือก Step Size จะอยู่ที่ประมาณ อย่างน้อย 4-20 เท่าของระบบที่มีการตอบสนองที่เร็วที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 แสดงหน้าต่างที่ใช้ในการกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Configuration Parameters)

2.2.5. การสร้างแบบจำลองระบบควบคุม

การสร้างแบบจำลองของระบบควบคุมใน Simulink นั้นต้องทำการสร้างหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองขึ้นมาก่อนซึ่งขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองระบบควบคุมทำได้ดังนี้

- คลิกที่ปุ่ม  ใน Simulink Library Browser หรือคลิกที่เมนู File --> New --> Model จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาแสดงได้ดัง ภาพที่ 2.9 ซึ่งหน้าต่างนี้จะใช้สำหรับการวางบล็อกที่เลือกมาจาก Simulink Library Browser



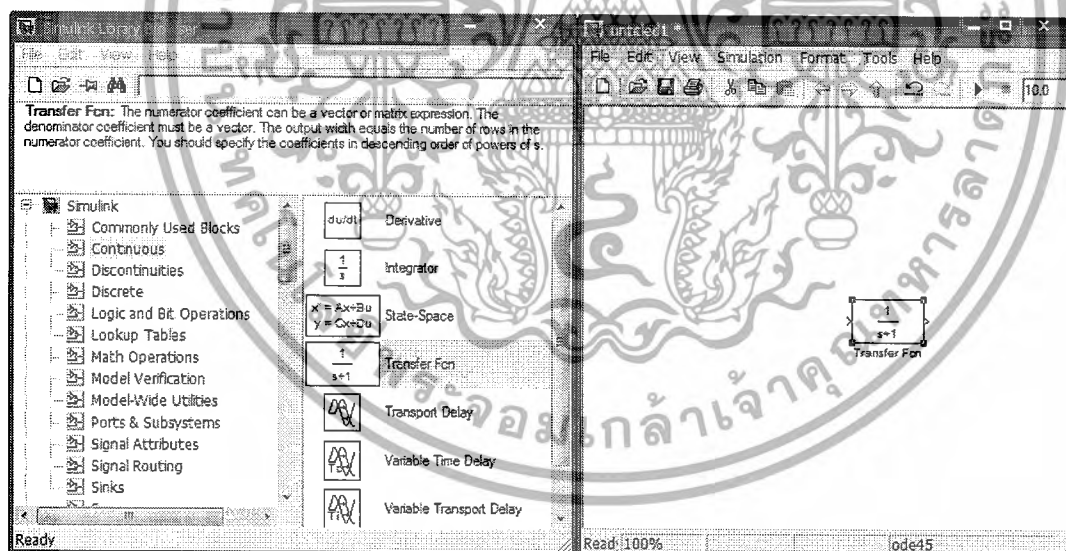
ภาพที่ 2.9 หน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนบนของหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองจะเป็นเมนูบาร์สำหรับคำสั่งต่างๆดังนี้

1. เมนู File เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการจัดการทามด้วยเพิ่มข้อมูลทั้งหมด เช่น การปิดไฟล์การเซฟไฟล์และการกำหนดคุณลักษณะของ โปรแกรม Simulink
2. เมนู Edit เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการแก้ไขแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา
3. เมนู View เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการแสดงเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้บนหน้าจอแบบจำลอง
4. เมนู Simulation เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการจัดการการจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ทำการสร้างขึ้นมา
5. เมนู Format เป็นคำสั่งเกี่ยวกับรูปแบบการแสดงผลบนหน้าจอจำลอง
6. เมนู Tools เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการเลือกใช้เครื่องมือต่างๆ
7. เมนู Help เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการขอความช่วยเหลือ

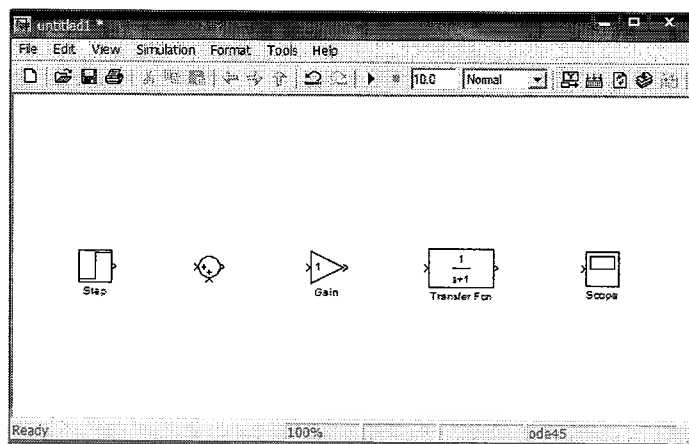
- เมื่อทำการสร้างหน้าต่างที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองแล้วทำบล็อกใน Simulink Library Browser มาวางในหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองได้ โดยการคลิกบล็อกที่ต้องการค้างไว้จากนั้นทำการลากมาไว้ในหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลอง จากนั้นปล่อยปุ่มจะปรากฏบล็อกที่ต้องการบนหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองแสดงได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การเลือกบล็อกที่ต้องการจาก Simulink Library Browser

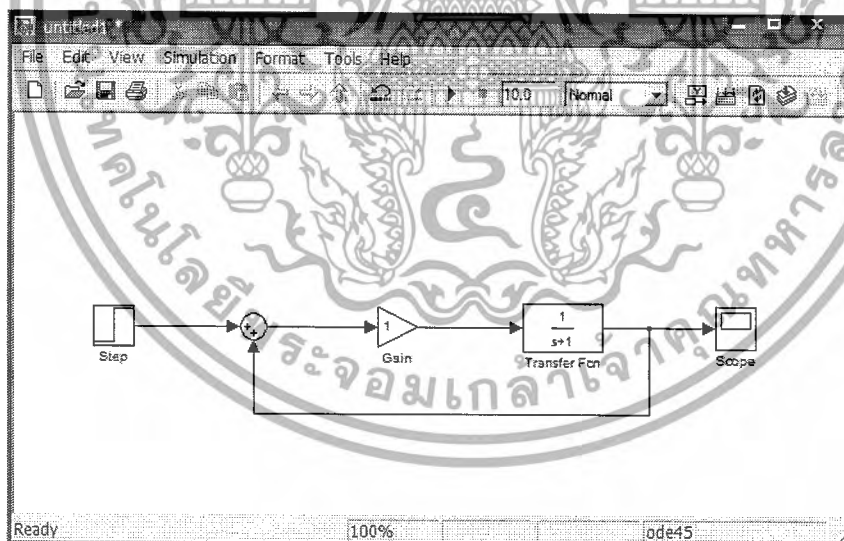
- เมื่อได้บล็อกที่ต้องการแล้วเราสามารถนำบล็อกอื่น ๆ มาวางบนหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองได้เช่นกันต่อไปจะแสดงบล็อกของระบบตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 บล็อกของระบบตัวอย่าง

- ภาพที่ 2.11 สังเกตได้ว่าแต่ละบล็อกจะมีช่องสัญญาณเข้าและช่องสัญญาณออกที่ไว้ให้สำหรับลากเส้นสัญญาณเชื่อมต่อระหว่างบล็อกต่าง ๆ เข้าด้วยกันนั้นเป็นการลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อกต่าง ๆ นั้นทำได้โดยเลื่อนเมาส์ให้ไปที่จุดต่อสัญญาณของบล็อกที่ต้องการตัวชี้ของเมาส์จะเปลี่ยนเป็นเครื่องหมายกากบาทจากนั้นคลิกค้างไว้แล้วจึงลากตัวชี้ไปที่จุดต่อสัญญาณของบล็อกที่ต้องการแสดงได้ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างบล็อก

- การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของบล็อกสามารถทำได้ โดยดับเบิ้ลคลิกที่บล็อกซึ่งจะทำให้แสดงไดอะล็อกสำหรับให้ใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 การสร้างแบบจำลองกระบวนการ

จากตัวอย่างจะได้แสดงถึงวิธีการสร้างแบบจำลองของระบบควบคุมใน Simulink โดยการสร้างแบบจำลองของกระบวนการใน Simulink นั้นสามารถแบ่งเป็น 3 วิธีด้วยกันคือ

1. การสร้างแบบจำลองกระบวนการจากสมการ Differential Equation
2. การสร้างแบบจำลองกระบวนการจาก ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน
3. การสร้างแบบจำลองระบบควบคุมจากสมการ State-Space

ซึ่งตัวอย่างในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการในแต่ละแบบ นั้นสามารถแสดงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองของระบบทางกล

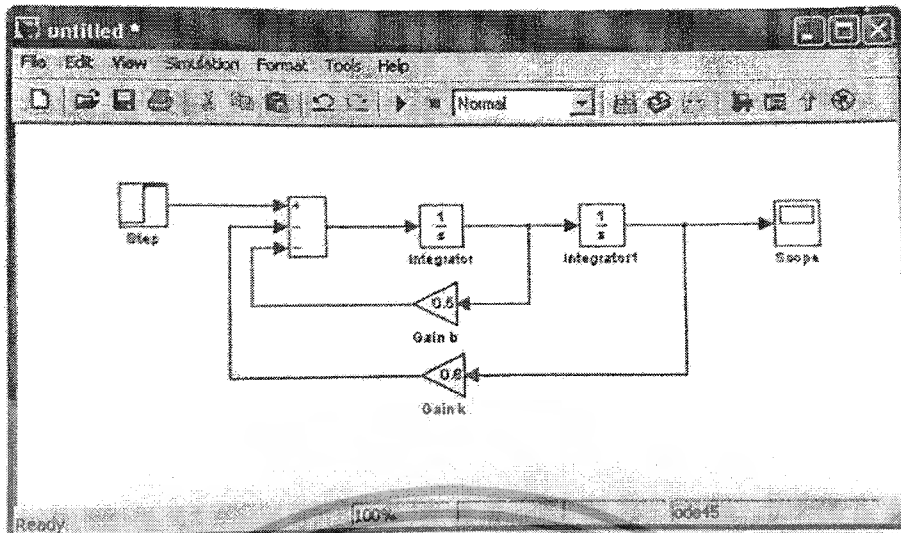


โดยกำหนดให้ $m=1$, $b=0.5$ และ $k=0.8$

สมการ Differential Equation ของระบบ

$$m \frac{d^2y}{dt} + b \frac{dy}{dt} + ky = u \quad 0.5 \frac{d^2y}{dt} + 0.8 \frac{dy}{dt} + ky = u$$

การสร้างแบบจำลองของระบบกระบวนการทางกลจากสมการ Differential Equation นั้น จะใช้บล็อก Integrator และบล็อก Gain แทนระบบโดยการใส่ค่าลงไป ในบล็อก Gain นั้นสามารถทำได้โดยดับเบิ้ลคลิกที่บล็อกแล้วก็ทำการใส่ค่าลงไป ในแบบจำลองระบบทางกลแสดงได้ดัง ภาพที่ 2.12 จะสังเกตจากได้ว่าสร้างแบบจำลองของระบบจากสมการ Differential Equation นั้นค่อนข้างที่จะยุ่งยากแต่มีข้อดีคือสามารถวินิจฉัยผลตอบสนองในแต่ละสเตปได้โดยตรง



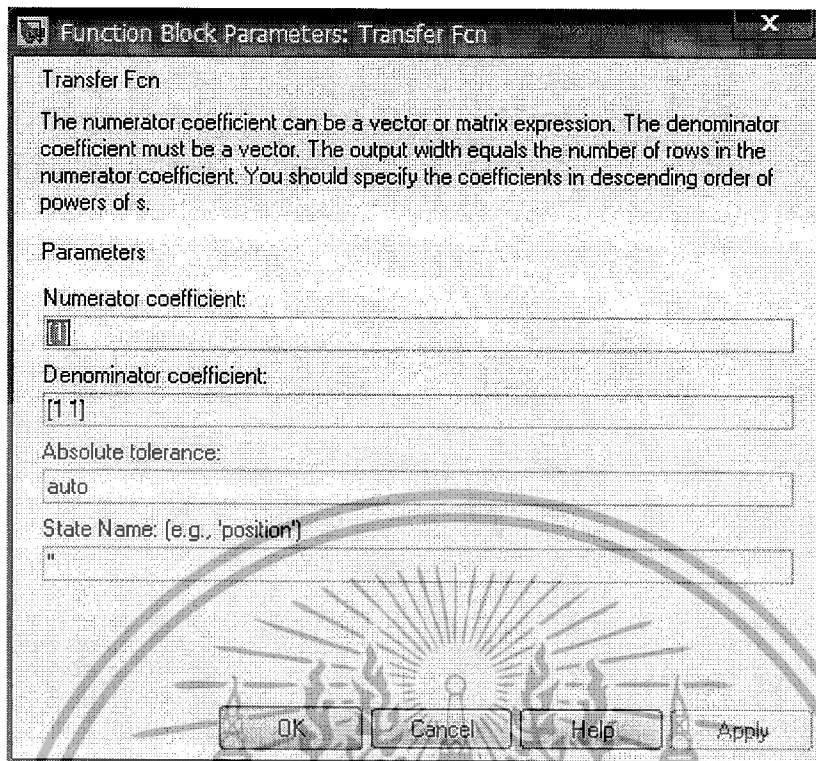
ภาพที่ 2.13 แบบจำลองทางกลในรูปแบบของสมการ Differential Equation

สมการ Laplace Transform ของระบบ

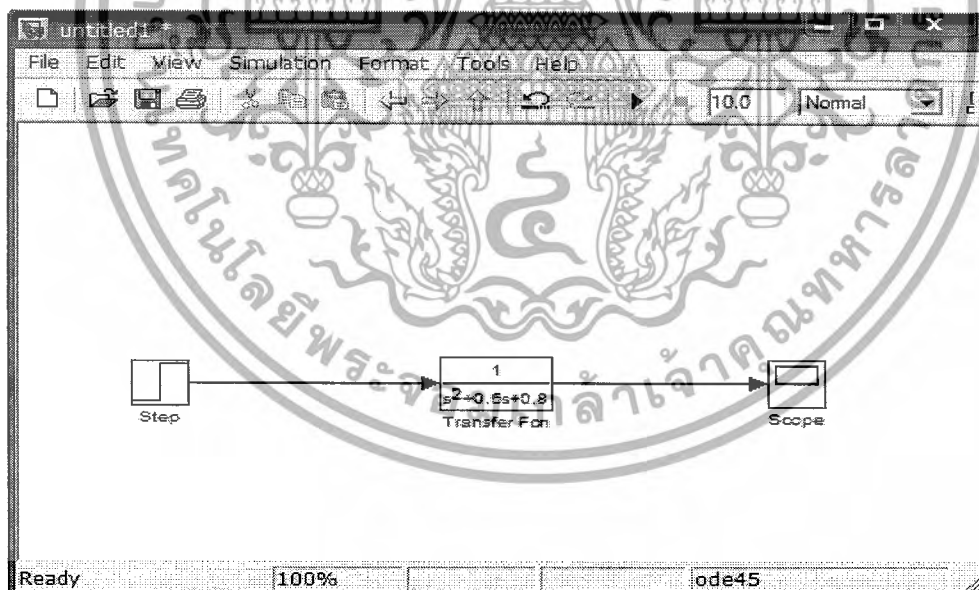
$$\frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k} \quad \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{1}{s^2 + 0.5s + 0.8}$$

การสร้างแบบจำลองของระบบที่แสดงอยู่ในภาพที่ 2.13 Transfer Function นั้นจะใช้บล็อก Transfer Function แสดงแทนระบบกระบวนการใส่ค่าโพลีโนเมียลลงในส่วนของ numerator และ denominator นั้นทำได้โดยดับเบิลคลิกที่บล็อกซึ่งจะปรากฏไดอะล็อกที่ให้ใส่ค่าขึ้นมาแสดงได้ดังภาพที่ 2.13 โดยการใส่ลงไปนั้นจะมีเงื่อนไขอยู่ว่าส่วน Numerator นั้นต้องมีลำดับที่น้อยกว่าส่วนของ Denominator ซึ่งสังเกตได้ว่าการสร้างแบบจำลองของระบบจาก Transfer Function นั้นจะทำให้การวัดผลตอบสนองได้ที่ส่วนเอาต์พุตของระบบเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.14 ไดอะล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Transfer Function



ภาพที่ 2.15 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบของ Transfer Function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมการ State Space ของระบบ

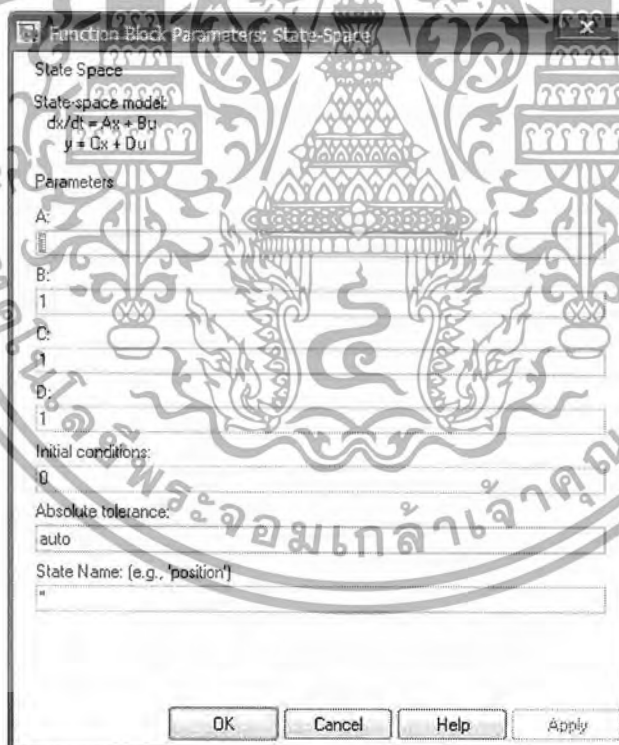
$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k & -b/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix} u$$

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.8 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

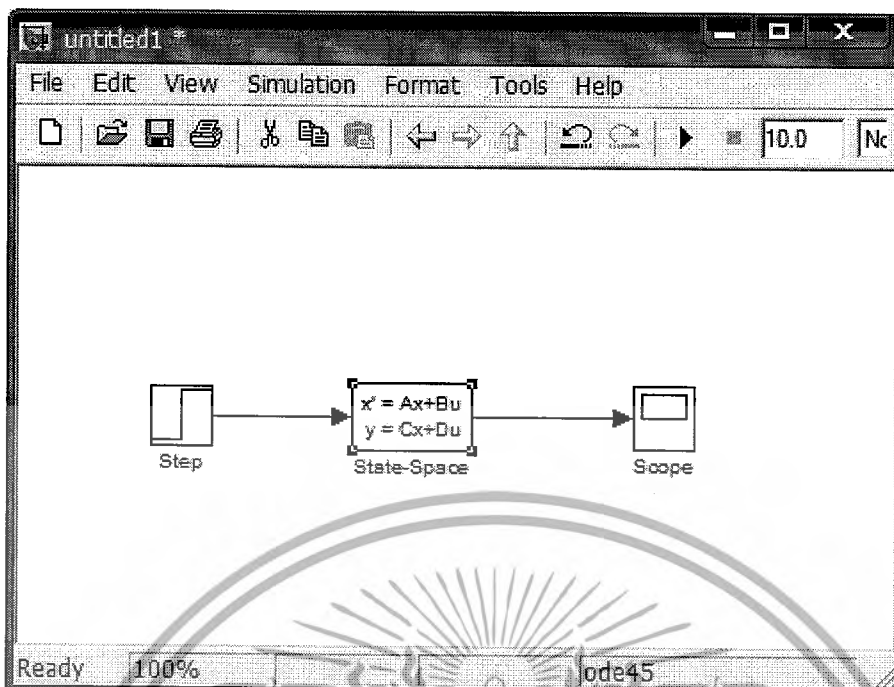
การสร้างแบบจำลองของระบบที่แสดงอยู่ในรูป State-Space นั้นจะใช้บล็อก State-Space แสดงแทนระบบการใส่ค่าพารามิเตอร์ทำได้โดยดับเบิลคลิกที่บล็อก ซึ่งจะปรากฏไดอะล็อกที่ให้ใส่ค่าขึ้นมาแสดงได้ดังภาพที่ 2.15 โดยการใส่นั้นจะใส่นั้นจะต้องใส่ค่าตามรูปแบบสมการของ State-Space เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลองของระบบจากสมการ Laplace Transform คือแบบจำลองของระบบ ที่สร้างจากสมการ State-Space สามารถวัดผลตอบสนองได้ที่จุดเอาต์พุตของระบบเท่านั้น



ภาพที่ 2.16 ไดอะล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก State – Space

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลไปเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

104123



ภาพที่ 2.17 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบ State-Space

จากตัวอย่างจะเห็นว่า การสร้างแบบจำลองกระบวนการ นั้นสามารถสร้างได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีนั้นก็จะมีข้อดีและข้อเสียตามความเหมาะสมในการทำแบบจำลองที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับ การนำไปประยุกต์ใช้งานว่าต้องการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบที่จุดใหม่บ้าง เช่น ต้องการวิเคราะห์ห้ผลการตอบสนองที่เอาท์พุทหรือต้องการวิเคราะห์ห้ผลการตอบสนองที่ สเตทอื่น ๆ ด้วย

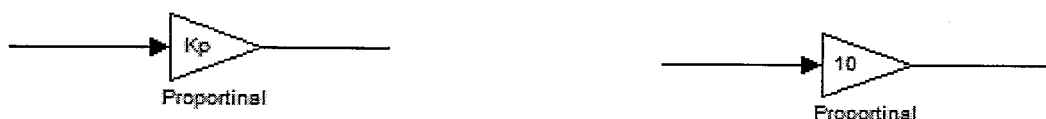
2.2.7 การสร้างแบบจำลองตัวควบคุม

การสร้างแบบจำลองตัวควบคุม โปรแกรม Simulink นั้นสามารถทำได้โดยทำให้ตัวควบคุมนั้นอยู่ในรูปแบบทราנסเฟอร์ฟังก์ชันและใช้บล็อก Transfer Function แสดงแทนตัวควบคุมจากนั้นก็นำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใส่ในบล็อก

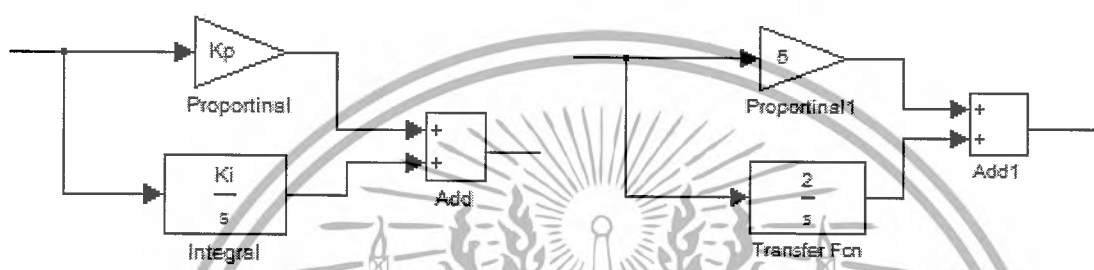
ตัวอย่างการสร้างแบบควบคุมแบบ P, PI, PID

โดยกำหนดให้ตัวควบคุมแบบ P มีค่า $K_p = 10$ ตัวควบคุมแบบ PI มีค่า $K_p = 5$, $K_I = 2$ และตัวควบคุมแบบ PID มีค่า $K_p = 2$, $K_I = 3$, $K_D = 4$

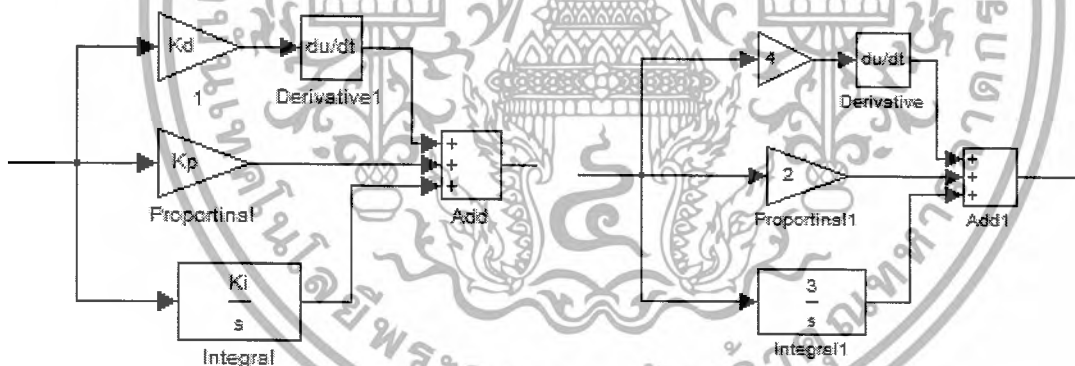
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวควบคุมแบบ P



ตัวควบคุมแบบ PI



ตัวควบคุมแบบ PID

2.2.8 การใช้ตัวแปรใน MATLAB ทำงานร่วมกับ Simulink

ตัวแปรทำการสร้างขึ้นในส่วน Command Windows ของ MATLAB หรือตัวแปรที่ทำการสร้างขึ้นใน Script ที่มีนามสกุลเป็น .m โดยปกติแล้วจะอยู่ในหน้าต่าง Workspace ของโปรแกรม MATLAB โดยโปรแกรม MATLAB จะทำการจำตัวแปรต่าง ๆ นี้ไว้จนกว่าจะใช้คำสั่ง Clear หรือออกจากโปรแกรมตัวแปรที่อยู่ในหน้าต่าง Worksce นั้นสามารถนำมาใช้งานภายในส่วนโปรแกรม Simulink ได้โดยการใช้งานก็เพียงแต่นำชื่อตัวแปรไปใส่ในบล็อกที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการนำตัวแปรใน Workspace มาใช้งานภายในบล็อก Transfer Function กำหนดตัวแปร $num = [1 \ 10]$; และ $den = [1 \ 9 \ 45 \ 87 \ 50]$; ในหน้าต่าง Command Windows ของ MATLAB

```
>> num =[1 10];
>> den =[1 9 45 87 50];
```

กำหนดตัวแปร num และ den ให้กับส่วน Numerator และ Denominator ในส่วนบล็อก Transfer Function ตามลำดับไปหลังจากนั้นบล็อก Transfer Function จะปรากฏตัวแปรในส่วน Numerator และ Denominator เป็น $num(s)$ และ $den(s)$ ตามลำดับ

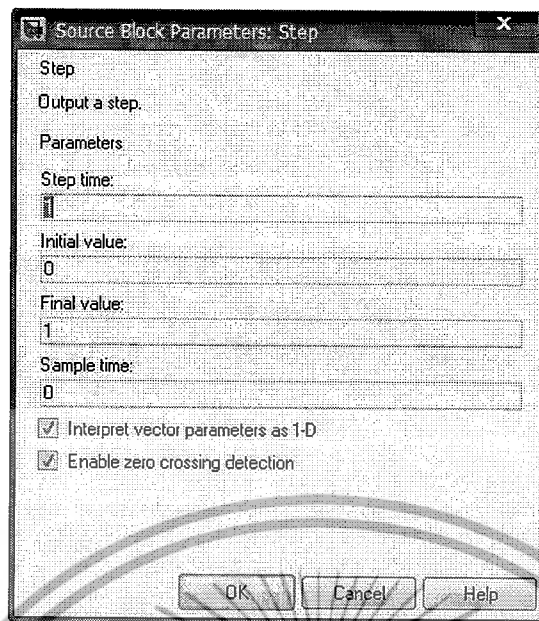


2.2.9 การจำลองการทำงานระบบควบคุม

แบบจำลองระบบควบคุมที่สร้างใน Simulink นั้นสามารถจำลองการทำงานของระบบเพื่อดูผลการตอบสนองได้ โดยก่อนการจำลองการทำงานต้องทำการกำหนดพารามิเตอร์ของบล็อกในการป้อนสัญญาณอินพุตพารามิเตอร์และสัญญาณเอาต์พุตพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานจะต้องให้เหมาะสมก่อน

2.2.10 การกำหนดพารามิเตอร์ในการป้อนสัญญาณอินพุต

สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับแบบจำลองระบบควบคุมนั้นจะอยู่ใน Library Simulink ซึ่งอยู่ในส่วน Source โดยสัญญาณอินพุตที่ใช้ในทางวิศวกรรม ระบบควบคุมส่วนมากจะประกอบด้วยสัญญาณอินพุตแบบ Step, Sine, Ramp, และ Constant ซึ่งส่วนใหญ่แล้วสัญญาณแบบ Step จะถูกใช้เพื่อทดสอบผลตอบสนองของระบบมากที่สุด ดังนั้นในที่นี้จึงจะขออธิบายเพียงการกำหนดพารามิเตอร์ของบล็อกสัญญาณอินพุตแบบ Step เท่านั้น ไดอะแกรมที่ใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Step แสดงได้ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 โดอะต็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Step

ส่วนประกอบที่สำคัญในการกำหนดพารามิเตอร์บล็อก Step อธิบายได้ดังนี้

1. Step time คือเวลาที่สัญญาณ Step จะเริ่มเปลี่ยนจากค่า Initial Value ไปสู่ค่า Final Value
2. Initial Value คือค่าเริ่มต้นของสัญญาณ Step
3. Final Value คือค่าสุดท้ายของสัญญาณ Step

2.2.11 การกำหนดพารามิเตอร์ในการป้อนสัญญาณเอาต์พุต

การดูผลตอบสนองของแบบจำลองระบบควบคุมทำได้โดยดับเบิลคลิกที่บล็อก Scope โดยในบล็อก Scope นั้นจะมีปุ่มให้เลือกเพื่อดูผลตอบสนองของระบบต่าง ๆ นอกจากนั้นยังสามารถกำหนดจำนวนสัญญาณที่จะแสดงบนบล็อก อธิบายได้ดังนี้



ใช้สำหรับการเพิ่มรูปภาพในบล็อก Scope



ใช้สำหรับการซูม แกน x และ แกน y



ใช้สำหรับการซูม แกน x



ใช้สำหรับการซูม แกน y



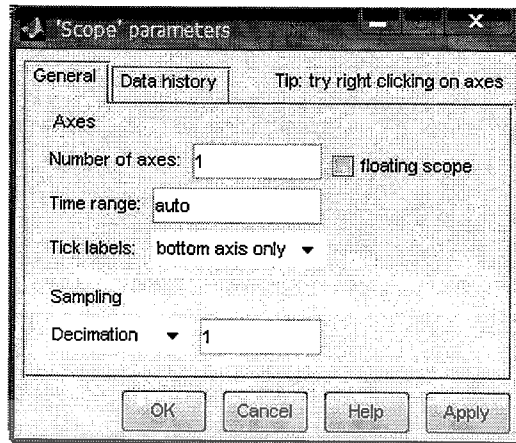
ใช้สำหรับการซูมแบบ Auto



ใช้สำหรับกำหนดพารามิเตอร์ให้กับบล็อก Scope เมื่อคลิกปุ่มนี้จะปรากฏโดอะต็อก

แสดงดังภาพที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.19 ไดอะล็อกใส่พารามิเตอร์สำหรับบล็อก Scope

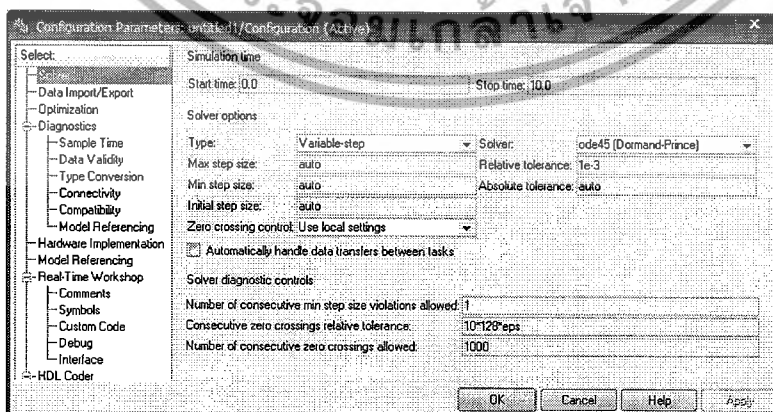
2.2.12 การกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน

การกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุม ทำได้โดยทำการคลิกที่คำว่า Simulation ตรงเมนูบาร์ของหน้าต่างที่ใช้สร้างแบบจำลองต่าง ๆ โดยคลิกที่คำว่า Simulation parameter หลังจากนั้นจะปรากฏไดอะล็อกสำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการจำลองระบบการทำงานขึ้นมาแสดงได้ดังภาพที่ 2.19

ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดที่ใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานระบบที่ใช้ในการควบคุมสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.2.12.1 Start time

คือ เวลาที่เริ่มต้น (หน่วยเป็นวินาที) ของการจำลองการทำงานของระบบควบคุม ส่วนมากแล้วค่านี้จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์



ภาพที่ 2.20 ไดอะล็อกที่ใช้สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.12.2 Stop time




คือ เวลาสิ้นสุด (หน่วยเป็นวินาที) ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุมค่านี้ต้องกำหนดให้เหมาะสมกับระบบควบคุมที่จำลองการทำงาน

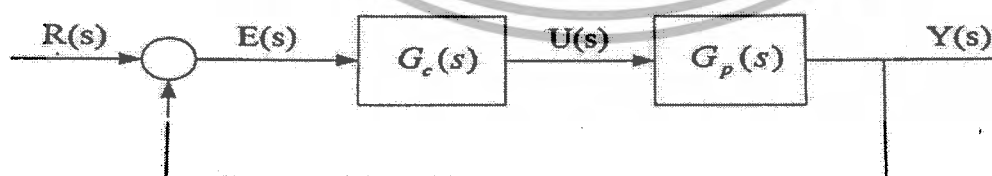
2.2.12.3 Solver Option

คือ วิธีการในการอินทิเกรตของแบบจำลองระบบควบคุมซึ่งจะมี 2 แบบ คือการอินทิเกรตแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้การอินทิเกรตแบบ Variable-step Ode 45

2.2.12.4 Max step size และ Min step size

คือ ขนาดของความละเอียดในการอินทิเกรตที่ทำให้ได้ค่ามากที่สุด และน้อยที่สุด (หน่วย วินาที) ค่านี้จะมีให้เลือกในกรณีที่เลือกการอินทิเกรตแบบ Variable-step โดยส่วนใหญ่แล้วค่านี้จะกำหนดให้เป็น Auto

หลังจากที่ทำการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานแล้ว สามารถทำการจำลองการทำงานของระบบได้โดยทำการคลิกที่ปุ่ม  ในส่วนเมนูบาร์ของหน้าต่าง โดยระห่างจำลองการทำงานนั้นเราสามารถหยุดการจำลองการทำงานของระบบได้โดยการคลิกที่ปุ่ม  และยกเลิกการจำลองการทำงานได้โดยคลิกที่ปุ่ม  หลังจากสิ้นสุดเวลาในจำลองการทำงานของระบบแล้วสามารถดูผลตอบสนองของระบบได้โดยทำการคลิกที่บล็อก Scope ซึ่งตัวอย่างในการจำลองการทำงานของระบบจะอ้างถึงตัวอย่างส่วนของการสร้างแบบจำลองระบบควบคุมตัวอย่างแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบลูปเปิดและลูปปิดโดยที่จะไม่มีตัวควบคุมและผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบลูปปิด เมื่อมีตัวควบคุมโดยต้องการให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมค่าพุ่งเกิน (Overshoot) น้อยกว่า 5% และมีค่าเวลาเข้าที่ (Setting time) น้อยกว่า



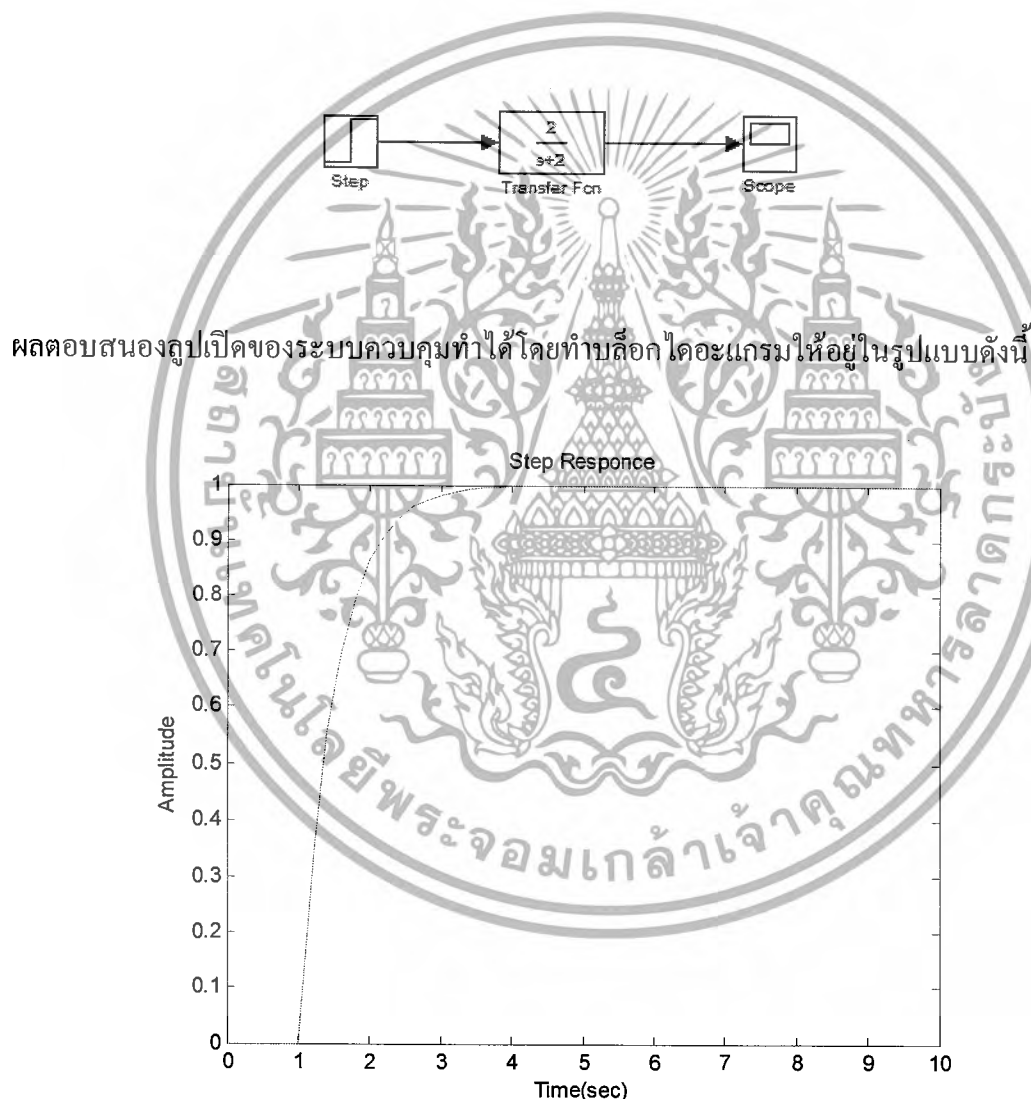
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้

$$G_c(s) = \frac{k(s + 5.954649)}{s}, \quad k = 3$$

$$G_p(s) = \frac{2}{s + 2}$$

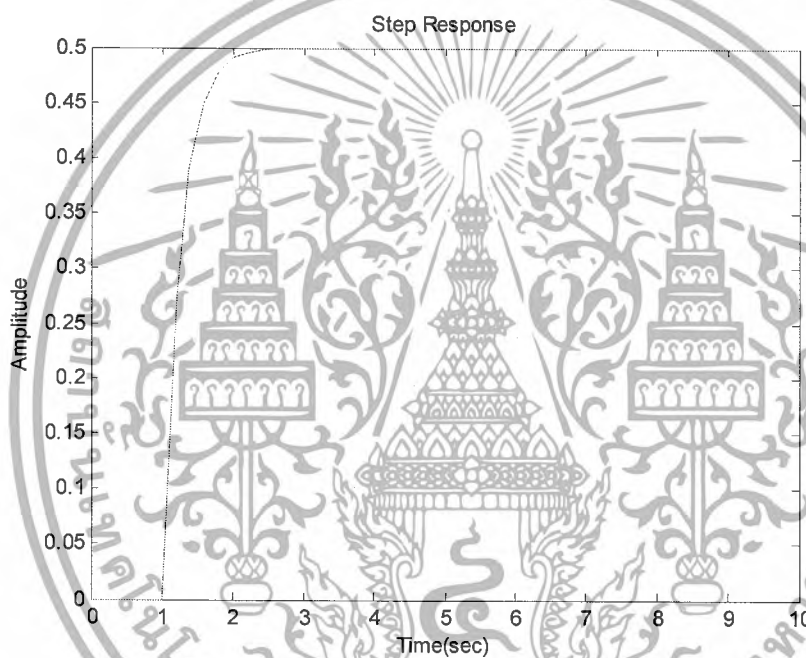
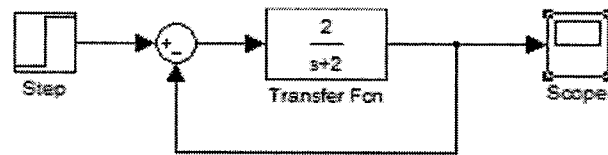
ในการจำลองการทำงานของระบบจะกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานให้มีเวลาเริ่มต้น (Start time) เท่ากับศูนย์และเวลาดำเนินการ (Stop time) มีค่าเท่ากับห้าส่วนพารามิเตอร์ของบล็อก Step จะกำหนดให้เวลาที่สัญญาณเริ่มเปลี่ยนแปลง (Step time) มีค่าเท่ากับหนึ่งค่าเริ่มต้นของสัญญาณ (Initial Value) มีค่าเท่ากับศูนย์และค่าสุดท้ายของสัญญาณ (Final Value) เท่ากับหนึ่ง



ภาพที่ 2.21 ผลตอบสนองแบบรูปเปิดของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

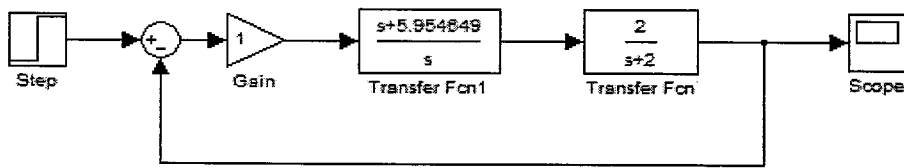
ผลตอบสนองรูปปิดของระบบควบคุมทำได้โดยทำบล็อกไดอะแกรมให้อยู่ในรูปแบบดังนี้



ภาพที่ 2.22 ผลตอบสนองแบบรูปปิดของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองรูปปิดของระบบควบคุมเมื่อรวมตัวควบคุมเข้าไปด้วยกันทำได้ดังนี้

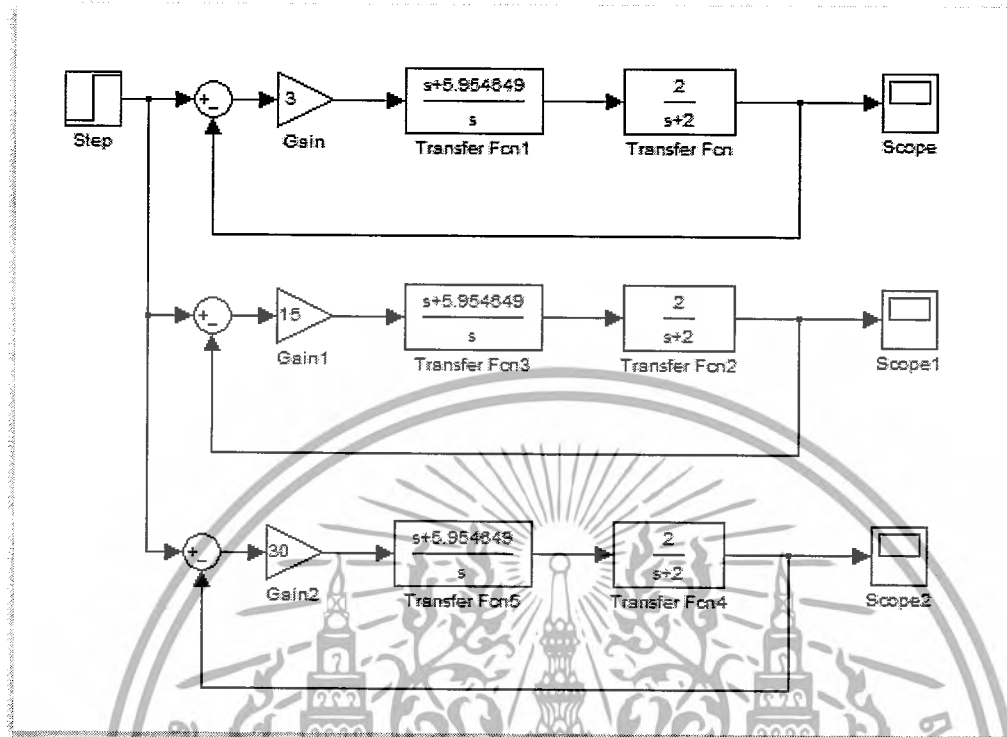


ภาพที่ 2.23 ผลตอบสนองแบบรูปปิดเมื่อรวมตัวควบคุมของระบบควบคุม

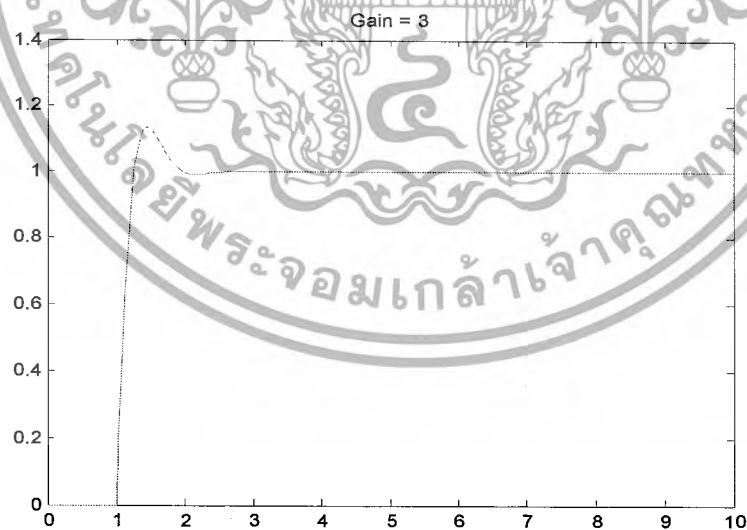
จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมมีค่าเวลาเข้าที่ (Setting time) ตามที่ต้องการ คือน้อยกว่า 1 วินาที แต่มีค่าพุ่งเกินประมาณ 13% ซึ่งมากกว่าที่ต้องการดังนั้นเราสามารถทำการลดค่าพุ่งเกินให้เป็นไปตามที่ต้องการได้โดยทดลองปรับค่าอัตราขยาย k โดยจะลองปรับค่าอัตราขยาย k เพิ่มขึ้น 5 เท่าและ 10 เท่าจากค่าเดิมซึ่งเราสามารถเปรียบเทียบผลการตอบสนองจากการเพิ่มอัตราขยายได้ 2 แบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแรก กำหนดจำนวนแกนในบล็อก Scope

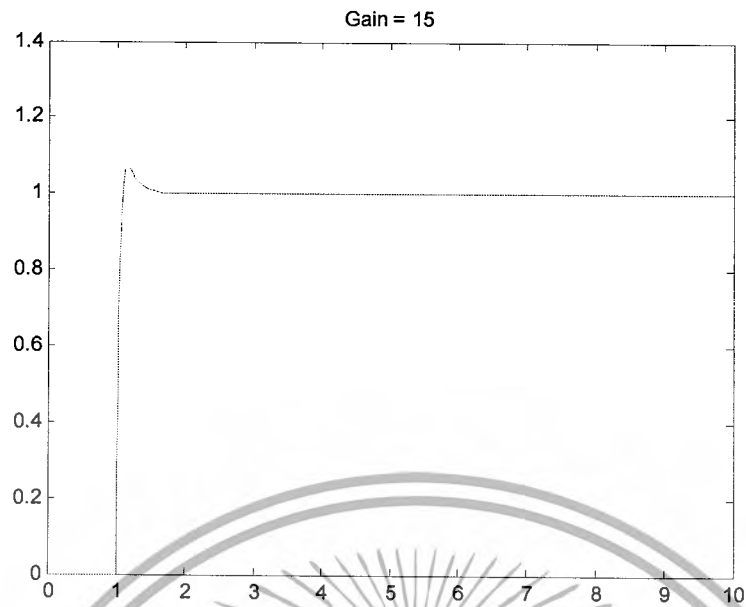


ภาพที่ 2.24 บล็อกไดอะแกรมแสดงค่าเกนต่างๆ

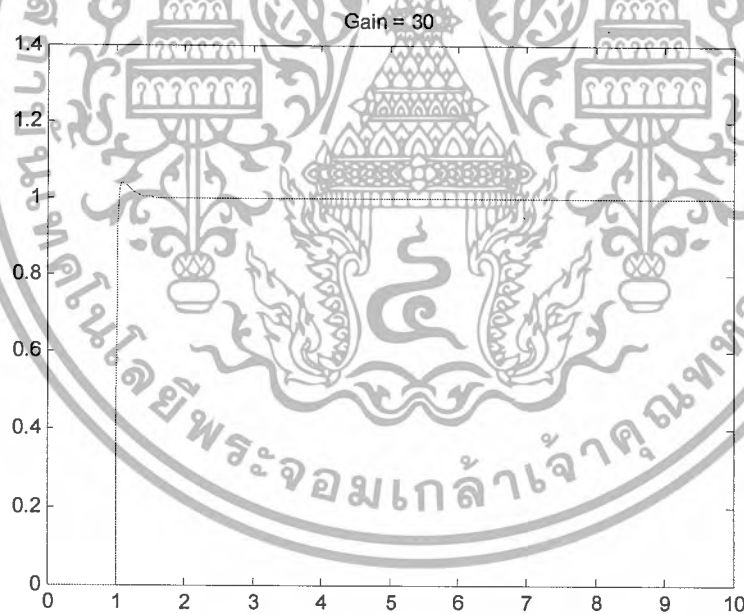


ภาพที่ 2.25-ก ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อกำหนดจำนวนแกนในบล็อก Scope เท่ากับ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



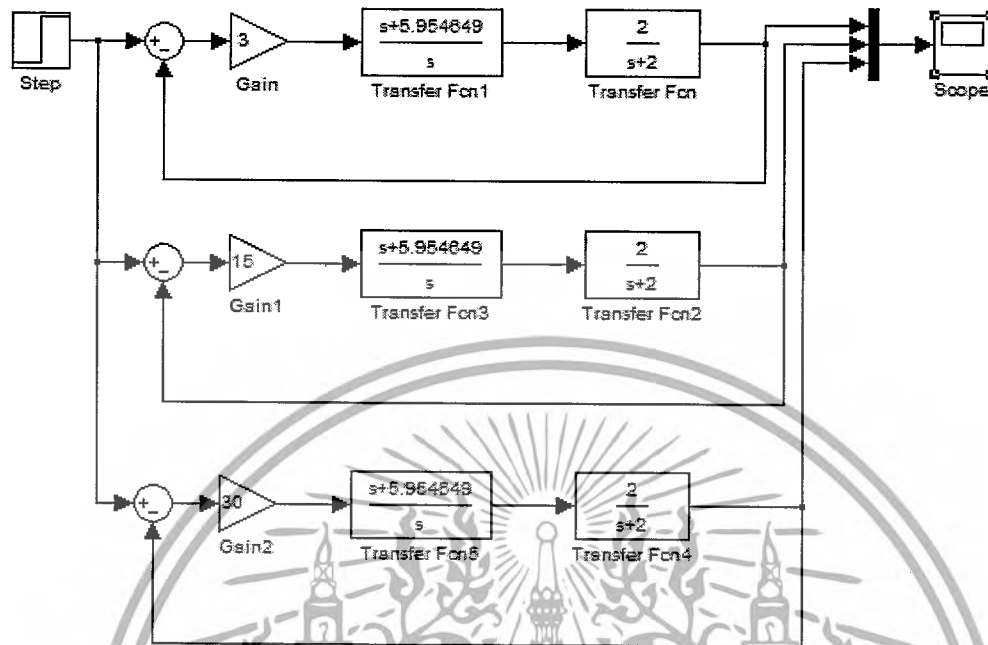
ภาพที่ 2.25-ข ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อกำหนดจำนวนแกนในบล็อก Scope เท่ากับ 15



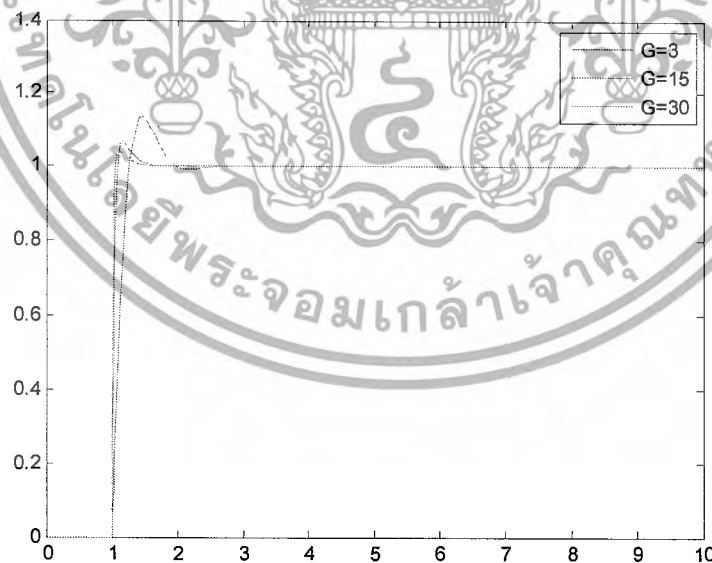
ภาพที่ 2.25-ค ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อกำหนดจำนวนแกนในบล็อก Scope เท่ากับ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่สองใช้ บล็อก Mux เพื่อรวมสัญญาณ



ภาพที่ 2.26 บล็อก โค้ดแกรมการรวมสัญญาณเพื่อแสดงผลที่กราฟเดียว



ภาพที่ 2.27 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อใช้บล็อก Mux เพื่อรวมสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.24 และภาพที่ 2.25 จะแสดงถึงผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีการใช้อัตราขยาย 3, 15 และ 30 เท่า โดยจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราขยายขึ้นจะทำให้ระบบสามารถเข้าสู่ค่า เวลาที่เข้าสู่ (Setting time) ได้เร็วขึ้นและมีค่าฟุงเกินที่ลดลง หลังได้ค่าอัตราขยายที่ทำให้ระบบมีค่าฟุงเกินตามที่ต้องการคือ 30 โดยจะมีค่าฟุงเกินประมาณ 4% จากภาพที่ 2.26 และภาพที่ 2.27 จะเห็นได้ว่าเราสามารถทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่ต้องการได้โดยใช้การกำหนดจำนวนแกนของบล็อก Scope หรือใช้บล็อก Mux ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าต้องการดูสัญญาณที่เปรียบเทียบในรูปแบบไหน

2.3 PID

ตัวควบคุมเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติการควบคุมอัตโนมัติก็คือการใช้ตัวควบคุม (Controller) ทำหน้าที่เปรียบเทียบตัดคืนและปรับแทนมนุษย์ให้มีผลเป็นไปตามต้องการ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะเป็นไปตามกฎและรูปแบบของการควบคุมที่ผู้ควบคุมได้เลือกและกำหนดไว้ล่วงหน้าการควบคุมไม่ว่าจะเป็นการควบคุมด้วยมือหรืออัตโนมัติ ผลการควบคุมจะถูกวัดและป้อนกลับไปยังตัวควบคุม เพื่อทำการเปรียบเทียบตัดคืนและออกคำสั่งปรับใหม่การกระทำจะดำเนินไปซ้ำ ๆ กันเช่นนี้ โดยลำดับปัจจุบันเครื่องควบคุมสามารถแบ่งตามโครงสร้างการทำงานได้ 3 ชนิดคือ เครื่องควบคุมแบบนิวมेटริกส์ที่ทำงานโดยใช้สัญญาณลม เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานโดยใช้วงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์เชิงเส้นในการสร้างสัญญาณควบคุม และเครื่องควบคุมแบบดิจิทัลทำงานโดยการใช้ลอจิก หรือการไมโครโปรเซสเซอร์ในการสร้างสัญญาณควบคุม โดยเครื่องควบคุมที่ถูกนำมาใช้เป็นที่รู้จักกันดีมากที่สุด และที่นิยมในวงการอุตสาหกรรมการผลิตก็คือ ตัวควบคุมแบบ PID

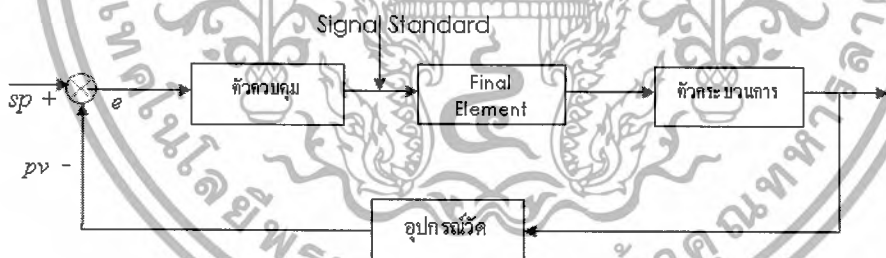
2.3.1 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมพีไอดี

ระบบแบบ Closed-loop เป็นระบบควบคุมแบบหนึ่งซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะมีผลโดยตรงต่อการควบคุม ดังนั้นระบบควบคุมแบบ Closed-loop ก็คือระบบควบคุมป้อนกลับนั่นเองสัญญาณความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นสัญญาณแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณป้อนกลับจะถูกป้อนให้ตัวควบคุมเพื่อที่จะลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง ทำให้เอาต์พุตของระบบมีค่าตามที่ต้องการสัญญาณป้อนกลับนี้อาจเป็นสัญญาณเอาต์พุตโดยตรงหรือเป็นสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณเอาต์พุตระบบควบคุมป้อนกลับโดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

- ตัวควบคุม (Controller) คือตัวรับสัญญาณวัดเพื่อนำมาเปรียบเทียบเป็นค่าเป้าหมายแล้วคำนวณหาค่าที่เหมาะสมเพื่อส่งเป็นสัญญาณควบคุมออกไปควบคุม โพรเซสเราสามารถตั้งเป้าหมายให้กับตัวควบคุมนี้ได้ แบบการควบคุมมีหลายแบบ เช่น ON-OFF Control, P Control, PI Control, PID Control เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์วัด (Measuring Instruments) หมายถึงอุปกรณ์ ได้แก่ Sensor, Transducer หรือ อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Converter) หรือวัดสัญญาณอื่น ๆ ที่มีเอาต์พุตตามสัญญาณมาตรฐาน
- อุปกรณ์ปรับกระบวนการ (Final Control Element) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระบวนการ ด้วยสภาวะของกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามค่าสัญญาณควบคุม (Manipulated Variable) ของกฎการควบคุมอุปกรณ์พวกนี้ ได้แก่ วาล์วควบคุม (Control Valve), inverter, Actuator ต่างๆ เป็นต้น
- ตัวกระบวนการ (Plant or process) คือกระบวนการที่ถูกควบคุมหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ที่เราต้องการควบคุมให้มีสภาวะตามต้องการ ขณะที่สภาวะการทำงานหรือสภาพแวดล้อมอาจเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลากระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ, ความดัน, อัตราการไหล, ระดับความเข้มข้น เป็นต้น
- สัญญาณมาตรฐาน (Standard Signal) การที่ต้องการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในระบบควบคุมอัตโนมัติให้ทำงานได้ตามต้องการ นั้นจำเป็นต้องมีมาตรฐานรองรับซึ่งวิวัฒนาการตั้งแต่เริ่มมีระบบควบคุมอัตโนมัติมา นั้นก็มีการเปลี่ยนแปลงระบบตัวอุปกรณ์เครื่องมือวัดมาตั้งแต่ยุคควบคุมด้วยลม (Pneumatic), ไฟฟ้า (Electrical) แล้วเริ่มมีการใช้สัญญาณดิจิทัลกันแล้ว สัญญาณลม 3-15 PSI, สัญญาณไฟฟ้า 1-5 Vdc หรือ 4-20 mA



ภาพที่ 2.28 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

การควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) เพราะตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมที่สามารถควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีโครงสร้างการทำงานที่ไม่ซับซ้อน สามารถเข้าใจได้ง่ายการใช้งานตัวควบคุมพีไอดีนี้ขึ้นอยู่กับปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของกระบวนการตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุม PID ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบ Proportional (P) ตัวควบคุมแบบ Integral (I) ตัวควบคุมแบบ Derivative (D) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังนี้

$$m(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

โดยที่

K_p = ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P (Proportional Gain)

T_i = ค่าเวลา Integral (Integral Time)

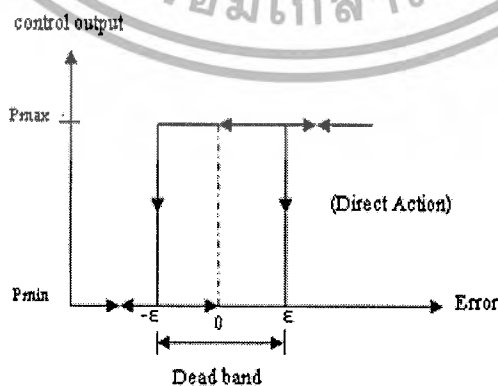
T_d = ค่าเวลา Derivative (Derivative Time)

จากภาพที่ 2.28 นั้นจะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมหรือตัวแปรปรับกระบวนการ (mv) ที่ได้จากตัวควบคุม PID จะถูกกำหนดไว้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาเข้าตัวควบคุมกับตัวแปรกระบวนการ (pv) กับสัญญาณอ้างอิง หรือค่าเป้าหมาย (sp) โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์การควบคุมที่ผู้ควบคุมปรับแต่งไว้ล่วงหน้าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะเป็นไปตามกริยาควบคุมแบบต่างๆดังที่กล่าวต่อไป

2.3.2 กริยาการควบคุมแบบป้อนกลับ

2.3.2.1 กริยาการควบคุมแบบ ON-OFF

การควบคุมแบบ ON-OFF เป็นการควบคุมที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยการควบคุมจะทำงานเพียง 2 สถานะคือเปิด (100%) กับปิด (0%) กริยาการควบคุมแบบ ON-OFF ดังแสดงภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 แสดงกริยาการควบคุมแบบ ON-OFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.29 จะเห็นว่าถ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าวิกฤต (+E) ค่าของเอาต์พุทของตัวควบคุมจะมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0% เป็น 100% เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าวิกฤต (-E) ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 100% เป็น 0% ค่าเอาต์พุทที่อยู่ในช่วงเดธแบนด์ (Dead Band) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสียดทานที่ไม่ได้คาดไว้ก่อนหรือบางครั้งก็จำเป็นต้องทำให้เกิดช่วงเดธแบนด์ขึ้น เพื่อป้องกัน ON - OFF บ่อยเกินไปอันจะทำให้อุปกรณ์ควบคุมหรือกระบวนการได้รับความเสียหาย แต่ช่วงเดธแบนด์นี้ต้องไม่กว้างนัก เพราะจะทำให้ค่าความเที่ยงตรงของการควบคุมลดลงกริยาการควบคุมแบบ ON - OFF สามารถเขียนเป็นสมการ (2.2) ได้ดังนี้

$$m(t) = \begin{cases} 0\% , e < -\epsilon \\ 100\% , e > +\epsilon \end{cases} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$m(t)$ = สัญญาณควบคุมหรือเอาต์พุทของตัวควบคุม

$e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อน

ϵ = $\frac{1}{2}$ ของค่าเดธแบนด์

2.3.2.2 กริยาการควบคุมแบบ Proportional (P)

กริยาการควบคุม P นั้นค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมจะแปรผันตรงกับค่าความคลาดเคลื่อน กล่าวคือถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้นค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมก็จะมีค่ามากขึ้นตาม ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลงค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมก็จะมีค่าน้อยลงเป็นไปตามกริยาการควบคุมแบบ P สามารถเขียนสมการ (2.3) ได้ดังนี้

$$mp(t) = Kp e(t) + \bar{m} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$mp(t)$ = ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมแบบ Proportional

Kp = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Proportional

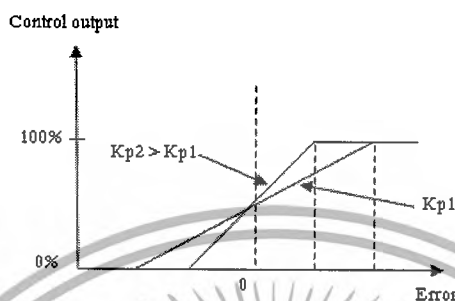
\bar{m} = ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมที่ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์

ตัวควบคุมแบบ P บางตัวอาจจะใช้ค่า Proportional Band (PB) แทนการใช้ค่า Kp ซึ่ง PB คือช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างที่เอาต์พุทของตัวควบคุมมีค่า 0-100% ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PB = \frac{100\%}{K_p}$$

ข้อเสียของกริยาการควบคุมแบบ Proportional คือไม่สามารถกำจัดค่าออฟเซตได้



ภาพที่ 2.30 แสดงคุณสมบัติของกริยาการควบคุมแบบ Proportional

2.3.2.3 กริยาการควบคุมแบบ Integral (I)

กริยาการควบคุมแบบ I เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการควบคุมแบบรีเซ็ต (Reset Control) โดยค่าของเอาต์พุตของตัวควบคุมที่หาได้จากค่าพื้นที่ทั้งหมดภายใต้กราฟของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลาคูณกับค่าคงที่ที่เรียกว่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I (Integral Gain) ดังสมการ (2.4) ต่อไปนี้

$$m_I(t) = K_I \int_0^t e(t) dt + m_I(0) \quad (2.4)$$

เมื่อ

$m_I(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Integral

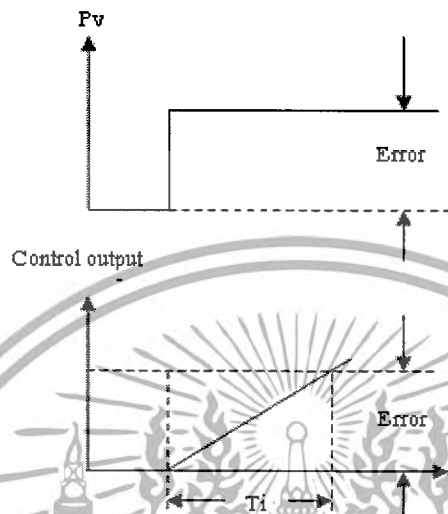
K_I = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Integral

$\int_0^t e(t) dt$ = พื้นที่ทั้งหมดของค่าความคลาดเคลื่อน

$m_I(0)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมที่เวลา t เท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของกริยาการควบคุมแบบ I นี้จะทำให้ไม่เกิดออฟเซตขึ้นในระบบและลดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ของระบบลงได้ แต่ถ้ากริยาการควบคุมมีค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการช้าลงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ I ดังแสดงในภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Integral

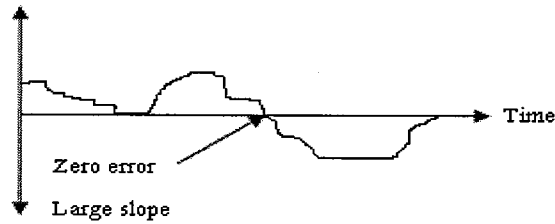
2.3.2.4 กริยาการควบคุมแบบ Derivative (D)

กริยาการควบคุมแบบ D หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการควบคุมแบบอัตราส่วน (Rate Action) โดยสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราของการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลาจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ และค่าเอาต์พุตก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลงดังสมการ (2.5) ต่อไปนี้

$$m_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

เมื่อ $m_D(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Derivative
 K_D = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Derivative
 $\frac{de(t)}{dt}$ = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.32 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ Derivative

2.3.2.5 กิริยาการควบคุมแบบ Proportional - Integral (PI)

ตามที่กล่าวมาแล้วว่ากิริยาการควบคุมแบบ P นั้นจะมีออฟเซ็ทเกิดขึ้นซึ่งการกำจัดค่าออฟเซ็ทนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มกิริยาการควบคุมแบบ I เข้าไปดังสมการต่อไปนี้

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.6)$$

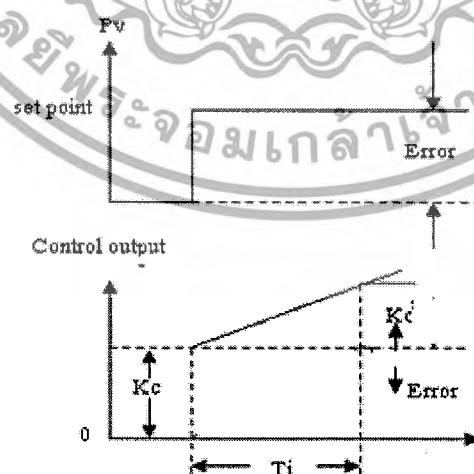
หรือ

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$K_c = K_p \text{ และ } K_I = \frac{1}{T_i}$$

T_i = ค่าเวลา Integral



ภาพที่ 2.33 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ PI (Direct action)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.6 กริยาการควบคุมแบบ Proportional - Derivative (PD)

การประยุกต์ใช้กริยาการควบคุมแบบ P ร่วมกับกริยาการควบคุมแบบ D เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น แต่จะไม่มีผลโดยตรงต่อผลตอบสนองของระบบที่สภาวะคงที่ ซึ่งสมการเอาต์พุตของกริยาการควบคุมแบบ PD แสดงดังสมการ (2.8) ต่อไปนี้

$$m_{PD}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

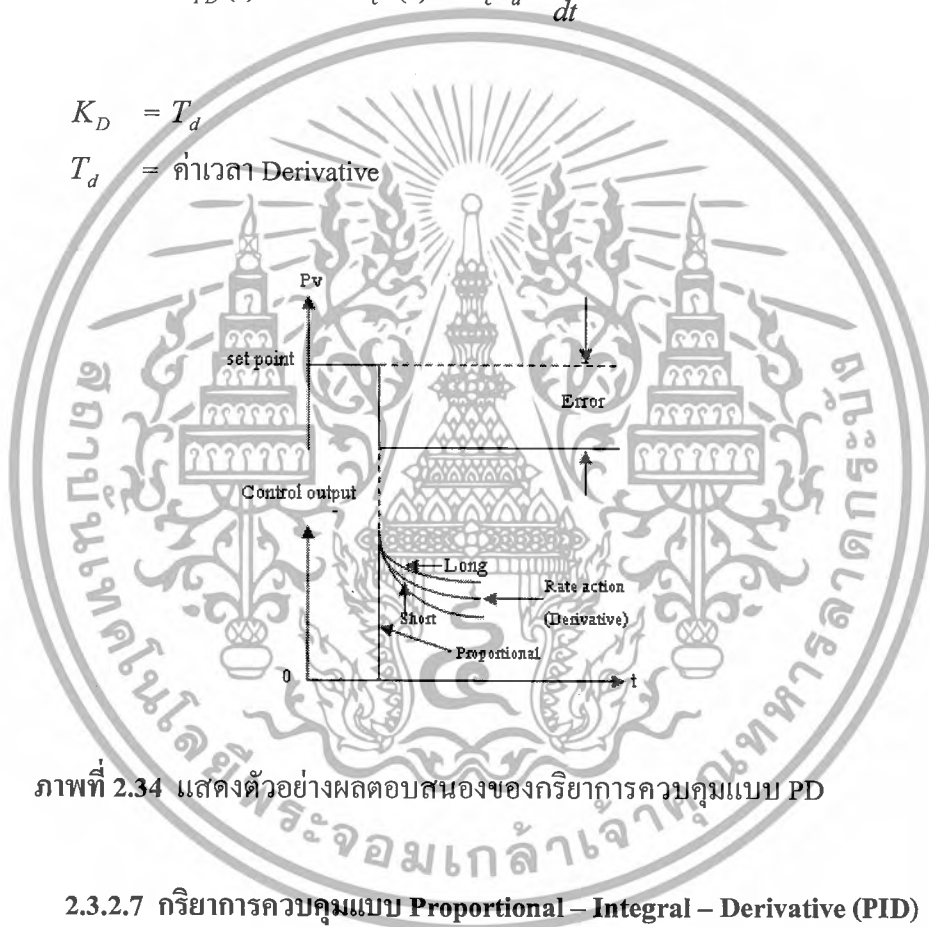
หรือ

$$m_{PD}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c T_d \frac{de(t)}{dt}$$

เมื่อ

$$K_D = T_d$$

T_d = ค่าเวลา Derivative



ภาพที่ 2.34 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PD

2.3.2.7 กริยาการควบคุมแบบ Proportional - Integral - Derivative (PID)

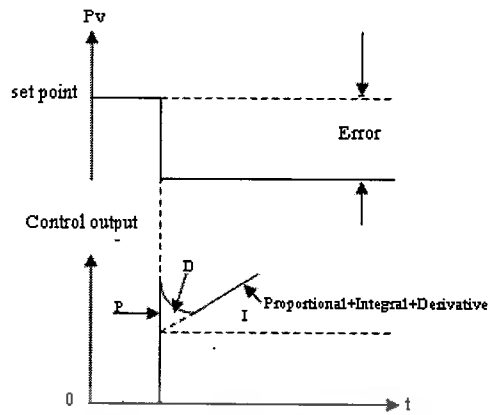
เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมมีสมรรถนะเป็นไปตามที่เราต้องการ จึงใช้กริยาการควบคุมทั้ง 3 แบบต่อร่วมกันซึ่งจะทำให้ได้กริยาการควบคุมแบบ PID ที่มีสมการ ดัง (2.9) ต่อไปนี้

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt + K_p K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

หรือ

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.35 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PI (Direct action)

2.4 Model reference adaptive control (MRAC)

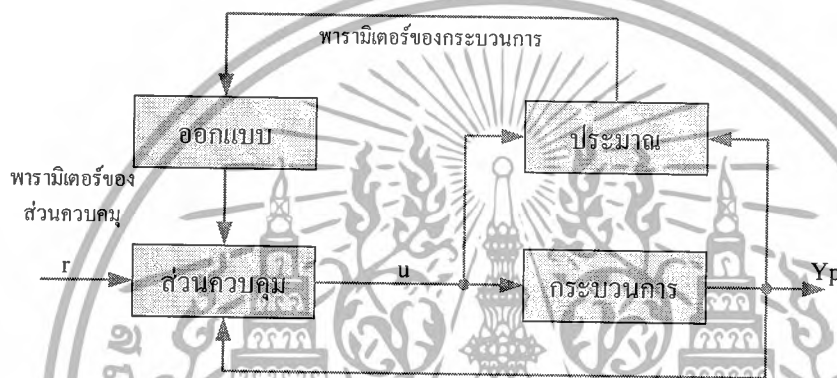
การควบคุมที่ปรับตัวได้ในระหว่างการพัฒนาทฤษฎีการควบคุมแนวใหม่จะพบได้ว่าการควบคุมที่ถูกสังเคราะห์โดยการประมาณระบบที่ต้องการควบคุมหรือกระบวนการในรูปของสมการอนุพันธ์เชิงเส้นค่าไม่แปรผันตามเวลาและออกแบบตัวควบคุม โดยวิธีการป้อนกลับเสถียรที่มีสมบัติที่ถูกกำหนดตายตัวซึ่งต่อไปจะเรียกตัวควบคุมชนิดนี้ว่าการควบคุมคงที่ หรือ (fixed controller) การควบคุมคงที่ดังกล่าวไม่สามารถควบคุมพฤติกรรมของระบบให้เป็นไปตามความต้องการของเราได้ทุกสถานการณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ากระบวนการที่ถูกควบคุมมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าหรือแปรค่าไปตามเวลา

ในช่วงหลังของยุค 1950 ได้มีความสนใจในเรื่องการควบคุมที่ปรับตัวได้มากขึ้น โดยเริ่มจาก gain scheduling technique ซึ่งเป็นการควบคุมที่ปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไปตามสภาพแวดล้อมที่สังเกตได้ (คล้ายกับเป็นการสังเกตสภาพแวดล้อมจากนั้นเปิดตารางเพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือเกนที่เหมาะสม) การจะออกแบบตัวควบคุมแบบนี้สามารถทำได้เมื่อเรารู้ความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างพฤติกรรมของกระบวนการกับสถานะภายนอกซึ่งสามารถวัดได้ เช่น ปฏิกริยาของเครื่องบิน จากคำสั่งของนักบินนี้โดยตรงกับระดับความสูงของเครื่องบิน เนื่องจากพฤติกรรมของเครื่องบินเป็นที่ทราบกันว่าเป็นฟังก์ชันอย่างไร้กับความสัมพันธ์ ดังนั้นจึงสามารถออกแบบตัวควบคุมที่สามารถปรับตัวไปตามระดับความสูงต่างๆ

คำนิยามของระบบควบคุมที่ปรับตัวได้มีอยู่หลายนิยามยกตัวอย่าง เช่น ระบบที่การควบคุมซึ่งสามารถปรับตัวเองให้เหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการแต่นิยามที่ใช้กันมากที่สุดคือระบบที่ประกอบด้วยการป้อนกลับปฐมภูมิ (primary feedback) ซึ่งคอยดูการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของกระบวนการ และการป้อนกลับทุติยภูมิ (secondary feedback) ซึ่งเกี่ยวข้องกับเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของส่วนควบคุม จากนิยามนี้การป้อนกลับปฐมภูมิเป็นเช่นต้องการควบคุมที่ไม่สามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับตัวได้โดยทั่วไปในขณะที่การป้อนกลับทุติยภูมิจะทำให้เกิดสภาพที่สามารถปรับ เองตัวได้ การควบคุมที่ปรับตัวได้ซึ่งที่ได้นิยามข้างต้นต่างจากเทคนิค gain scheduling ตรงที่ gain scheduling ไม่ได้ใช้การป้อนกลับทุติยภูมิเป็นกลไกที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ แต่ใช้กลไกของการวัดสภาพแวดล้อมภายนอก ดังนั้นเทคนิค gain scheduling อาจไม่นับว่าเป็นการควบคุมที่ปรับตัวเองได้ จุดประสงค์ของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในการป้อนกลับทุติยภูมิ คือต้องการรักษาสมรรถภาพ (performance) ให้สูงแม้ว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอาจไม่ทราบค่าหรือมีค่าที่เปลี่ยนแปลง

โครงสร้างของระบบควบคุมที่ปรับตัวได้แบ่งออกได้หลายวิธี วิธีที่ใช้มาก ได้แก่การปรับตัวโดยตรง (direct adaptation) และการปรับตัวทางอ้อม (indirect adaptation) ในภาพที่ 2.36

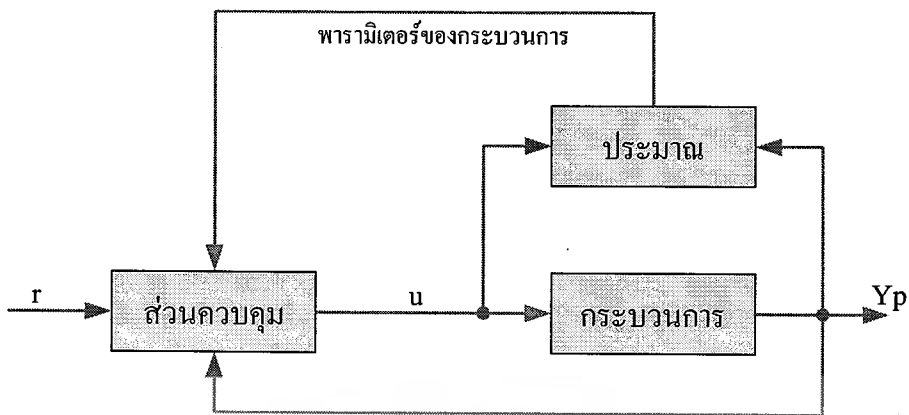


ภาพที่ 2.36 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ปรับตัวได้

จากภาพที่ 2.36 ลูปป้อนกลับปฐมภูมิหรือส่วนควบคุมปฐมภูมิได้แก่ลูปล่างประกอบด้วย ส่วนควบคุมและกระบวนการซึ่งถูกป้อนกลับด้วยสัญญาณที่วัดได้จาก y_p ลูปป้อนกลับทุติยภูมิได้แก่ ลูปบนอันประกอบด้วยส่วนควบคุมกระบวนการส่วนประมาณและส่วนออกแบบ

ความสามารถในการปรับตัวได้ระบบปรับตัวทางอ้อมในภาพที่ 2.36 เกิดจากการป้อนกลับทุติยภูมิ โดยส่วนประมาณจะประมาณพารามิเตอร์ของกระบวนการและส่งต่อให้กับส่วนออกแบบ เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ให้กับส่วนการควบคุม เมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ส่วนออกแบบจะออกแบบค่าพารามิเตอร์ของส่วนควบคุมให้เหมาะสมกับกระบวนการที่เปลี่ยนไป ส่วนควบคุมที่ได้รับการปรับพารามิเตอร์ตามกระบวนการนี้ จะควบคุมพฤติกรรมของกระบวนการ ด้วยกลไกของลูปปฐมภูมิต่อไป

โครงสร้างระบบปรับตัวเองที่มีรูปแบบคล้ายกับระบบปรับตัวทางอ้อมในภาพที่ 2.36 เพียงแต่ลบส่วนออกแบบทิ้ง และเปลี่ยนส่วนประมาณเป็นส่วนปรับพารามิเตอร์ของส่วนควบคุมดังในภาพที่ 2.37

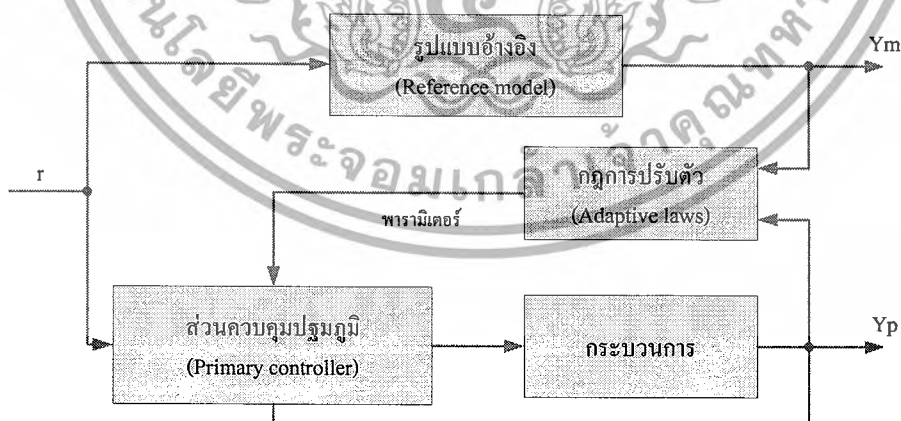


ภาพที่ 2.37 โครงสร้างระบบปรับตัวเองมีรูปแบบคล้ายกับระบบปรับตัวทางอ้อม

ทั้งโครงสร้างของการปรับตัวโดยตรงและทางอ้อมมีข้อดีและข้อเสียข้อดีดังนี้แบบทางอ้อมคือความอิสระที่จะเลือกรูปแบบของส่วนออกแบบข้อดีที่สองของแบบทางอ้อมคือการที่มีส่วนประมาณพารามิเตอร์จะทำให้ผู้ปฏิบัติการได้รู้ถึงสถานะปัจจุบันของกระบวนการ และข้อผิดพลาดต่าง ๆ ของกระบวนการอย่างไรก็ตามการที่จะปรับตัวทางอ้อมไม่อำนวยความสะดวกวิเคราะห์ทางทฤษฎีเพราะว่าระบบจะซับซ้อน โครงสร้างการปรับตัวโดยตรงมักจะซับซ้อนน้อยกว่า ดังนั้นเราสามารถพิสูจน์เสถียรภาพของระบบโดยรวมได้ง่ายกว่า

- Model reference adaptive system

เทคนิคการควบคุมแบบ Model reference adaptive system (MRAC) ได้ถูกเสนอครั้งแรกโดย Whitacker ในปี 1958 โครงสร้างของ MRAC ที่นิยมกันมากที่สุดเป็นดังภาพที่ 2.38



ภาพที่ 2.38 โครงสร้างของ MRAC ที่นิยมกันมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาพที่ 2.38 แสดงให้เห็นว่าส่วนควบคุมปฐมภูมิจะทำหน้าที่ควบคุมพฤติกรรมต่าง ๆ ของระบบลูปปิดในลักษณะเดียวกันกับระบบที่ไม่ปรับตัวโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามสถานการณ์ที่เราไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบหรือพารามิเตอร์ของระบบแปลค่าไปตามเวลา การตั้งค่าพารามิเตอร์ของส่วนควบคุมปฐมภูมิให้ตายตัว จะไม่สามารถควบคุมพฤติกรรมของระบบลูปปิดให้เป็นไปตามต้องการได้ทุกสถานการณ์

โดยเทคนิคของ MRAC ผลตอบสนองหรือพฤติกรรมของระบบต่ออินพุต r ตามที่เราต้องการสามารถกำหนดโดยรูปแบบอ้างอิง หรือ reference model ซึ่งแสดงด้วย y_m องค์ประกอบในการปรับตัวจะติดตามเปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการ y_p กับ y_m ตั้งค่าพารามิเตอร์ให้กับส่วนควบคุมปฐมภูมิ เพื่อที่จะนำผลตอบสนองของกระบวนการให้เข้าสู่ผลตอบสนองรูปแบบอ้างอิงในองค์ประกอบของส่วนปรับตัวนอกจากใช้ผลตอบสนองของกระบวนการ y_p แล้วยังอาจต้องใช้สเตต (state) ของกระบวนการ x_p และอินพุตของกระบวนการ u หรือ set point r ลักษณะของ MRAC ส่วนใหญ่มักจะเป็นการปรับตัวโดยตรงเพราะไม่มีส่วนของการประมาณพารามิเตอร์ของกระบวนการอย่างชัดเจน

จากรูปที่ 2.38 แสดงระบบ MRAC ซึ่งประกอบด้วยลูปป้อนกลับสองลูปซึ่งได้กล่าวไว้ในภาพที่ 2.36 และ 2.37 ลูปในประกอบด้วยลูปป้อนกลับปฐมภูมิลูปนอกประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่ปรับตัวโดยทั่วไปลูปป้อนกลับปฐมภูมิจะทำงานที่ความเร็วสูงกว่าลูปปรับตัว ดังนั้นพารามิเตอร์ของกระบวนการจะถูกสมมุติว่าเปลี่ยนแปลงช้ากว่าสเตตของกระบวนการ ในกรณีแสดงภาพที่ 2.38 แสดงว่ารูปแบบอ้างอิงจะขนานกับกระบวนการแต่ไม่จำเป็นว่าระบบปรับตัวได้ MRAC จำเป็นต้องมีรูปแบบอ้างอิงที่ขนานกับกระบวนการเสมอไปที่ระบบ MRAC บางครั้งจะนำรูปแบบอ้างอิงต่ออนุกรมกับขบวนการ ในการต่ออนุกรมนี้รูปแบบอ้างอิงจะทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดอินพุตอ้างอิงและให้ประโยชน์ต่อการควบคุมตรงที่ระบบ โดยทั่วไปจะไม่สามารถตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นขั้นบันไดได้ ดังนั้นตัวกำเนิดอินพุตอ้างอิงจะต้องกรองสัญญาณอินพุตให้เรียบขึ้นและตอบสนองต่อกระบวนการจะเป็นไปตามอินพุตได้ดีขึ้นในลักษณะนี้มีผลต่อการอ้อมตัวของระบบด้วยนอกจากรูปแบบอ้างอิงจะต่อขนานและต่ออนุกรมกับขบวนการ แล้วยังสามารถนำทั้งสองแบบมารวมกันเป็น MRAC แบบอนุกรม - ขนานได้อีกซึ่งมีข้อดีข้อเสียต่างกันในที่นี้ศึกษาเฉพาะ MRAC แบบที่มีรูปแบบอ้างอิงที่ต่อขนานกับกระบวนการ (parallel MRAC) ส่วนสำคัญที่สุดใน MRAC ได้แก่การออกแบบกฎทางการปรับตัว ซึ่งมีหลายวิธีแต่ในที่นี้จะศึกษา และทดลองเฉพาะวิธีของ MIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การออกแบบตัวควบคุมที่สามารถปรับตัวเองได้

ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ MRAC ได้แก่กระบวนการและตัวควบคุมปฐมภูมิ (process) ตัวควบคุมปฐมภูมิ (primary controller) รูปแบบอ้างอิง (reference model) และที่มาของกฎการปรับตัว

1. กระบวนการ

แม้ว่ากระบวนการจะไม่อยู่ในส่วนของการออกแบบตัวควบคุมที่ปรับตัวเองได้ แต่เนื่องจากกระบวนการเป็นส่วนที่ตัวควบคุมจะต้องเกี่ยวข้องกับ จึงสมควรที่จะได้พิจารณาในส่วนนี้ในการออกแบบตัวควบคุมเราจะต้องสมมุติว่า กระบวนการให้เป็นไปในทิศทางบางอย่างที่อาจไม่เป็นจริงในธรรมชาติ ตัวอย่างเช่นทฤษฎีการปรับตัวที่จะพิจารณาต่อไปจะต้องสมมุติว่ากระบวนการควรจะเป็นเชิงเส้นควรทราบอันดับของทรานเฟอร์ฟังก์ชันและควรรู้ถึงเครื่องหมายของ DC gain รวมทั้งทรานเฟอร์ฟังก์ชันควรเป็น minimum phase และ กระบวนการควรจะสามารถปราศจากการรบกวน

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่ากระบวนการจะไม่มีทางสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งหมดนี้ยกตัวอย่างเช่นอันดับของกระบวนการที่แน่นอนเราไม่สามารถรู้ได้ ซึ่งโดยมากอันดับของกระบวนการที่นำมาใช้จะมาจากทฤษฎีการวิเคราะห์ถึงส่วนประกอบของระบบผลตอบสนองทั้งในโดเมนของเวลา หรือโดเมนความถี่และเป็นที่ยอมรับว่าไม่มีกระบวนการที่เป็นเชิงเส้นอย่างแท้จริง หรือแบบปราศจากการรบกวน

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าคุณสมบัติของกระบวนการ จะไม่สามารถเป็นไปตามที่สมมุติได้ทั้งหมดก็ไม่ได้หมายความว่าตัวควบคุมที่สามารถปรับตัวเองได้จะไม่สามารถเป็นไปได้อันเป็นสิ่งสำคัญในอันดับต่อมาจะทำอย่างไรให้ตัวควบคุมที่ปรับตัวเองได้สามารถทำงานได้ในสถานะที่ไม่สมบูรณ์ นั่นคือสามารถทำงานได้ในกระบวนการจริง ๆ

2. ส่วนควบคุมปฐมภูมิ (the primary controller)

ส่วนควบคุมปฐมภูมิ ดังภาพที่ 2.36 โดยหลักการสามารถมีโครงสร้างใดก็ได้ตามการออกแบบตัวควบคุมเชิงเส้น อย่างไรก็ตามควรจะต้องสอดคล้องกับคุณสมบัติบางประการประการแรกจะต้องสอดคล้องกับสถานะ perfect model-matching ซึ่งหมายถึงการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะต้องทำให้พฤติกรรมของลูปวงปิดเท่ากับแบบอ้างอิงได้ ประการที่สองสำหรับการใช้การควบคุมโดยตรงสัญญาณควบคุม u จะต้องมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นต่อพารามิเตอร์ โดยทั่วไปส่วนควบคุมปฐมภูมิที่ใช้ใน MRAC ประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่กำเนิดเวกเตอร์ของสัญญาณ (signal vector) ซึ่งสัญญาณควบคุม u จะอยู่ในรูปโดยเป็นเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งในระเบียบวิธีที่จะนำเสนอต่อไปได้ว่าจะประกอบขึ้นจากสเตตและสัญญาณอ้างอิง (reference signal setpoint) r หรือถ้าไม่ทราบสเตตที่จะต้องประมาณในลักษณะคล้ายกับตัวสังเกตสเตต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รูปแบบอ้างอิง (the reference model)

รูปแบบอ้างอิงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง r ที่เราต้องการ รูปแบบอ้างอิงมักจะได้จากการทดลองภายในคอมพิวเตอร์ การกำหนดรูปแบบอ้างอิงจะต้องกระทำให้สมเหตุสมผล คือระบบในความเป็นจริงสามารถเป็นไปตามรูปแบบนั้น ๆ ได้เพราะหากกำหนดรูปแบบอ้างอิงที่มีผลตอบสนองเร็วเกินไปจะทำให้เกิดสถานะอิ่มตัว (saturation) ส่วนหนึ่งส่วนใดของระบบได้และจะนำมาซึ่งความไม่เสถียรของระบบ

4. กฎการปรับตัว (adaptive laws)

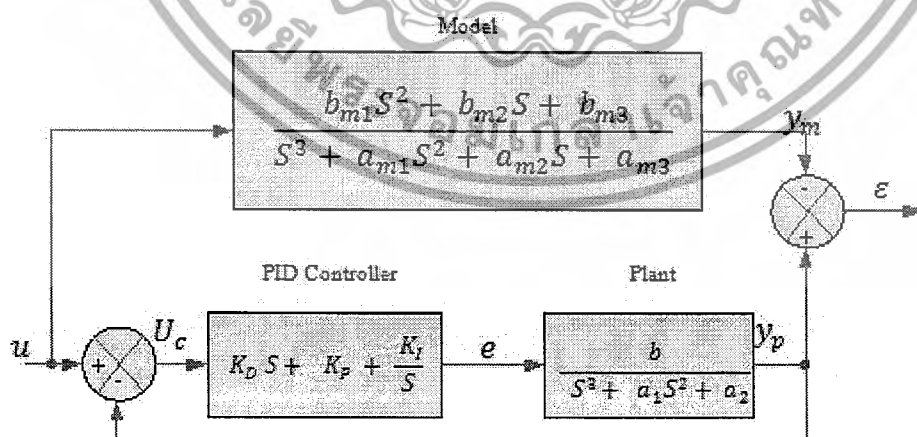
กฎเกณฑ์สำคัญในการออกแบบ MRAC คือกฎการปรับตัวและการพิสูจน์กฎการปรับตัวซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีของ MIT โดยสมมุติว่ากระบวนการเป็นเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าหรือแปรค่าเป็นตามเวลาและกระบวนการมีหนึ่งอินพุทหนึ่งเอาต์พุทและการควบคุมเป็นสเทป้อนกลับและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่จะปรับคือเกนป้อนกลับ (feedback gain)

กฎของ MIT กล่าวว่าฟังก์ชันที่ทำให้ระบบมีค่าผิดพลาดต่ำสุดคือ

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \varepsilon(\theta)^2 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = y_p - y_m$$

การออกแบบตัวควบคุมแบบ พีไอดี (PID Controller) โดยใช้เทคนิค MRAC กำหนดให้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของแพลนที่เป็น

$$G_p(S) = \frac{b}{S^2 + a_1 S + a_2}$$



ภาพที่ 2.39 บล็อกตัวควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Close Loop Transfer function

$$\frac{G}{1 + GH} = \frac{b(K_D S^2 + K_P S + K_I)}{S(S^2 + a_1 S + a_2) + b(K_D S^2 + K_P S + K_I)}$$

$$y_P = \frac{b(K_D S^2 + K_P S + K_I)}{S^3 + (a_1 + bK_D)S^2 + (a_2 + bK_P)S + bK_I} \times U_c$$

กำหนดให้

$$\varepsilon = y_p - y_m \quad J = \frac{1}{2} \varepsilon^2 \quad D = \frac{d}{dt}$$

$$\frac{dK_P}{dt} = -\gamma_P \left(\frac{\partial J}{\partial K_P} \right) = -\gamma_P \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y_p} \right) \left(\frac{\partial y_p}{\partial K_P} \right) = -\gamma_P(\varepsilon) \left(\frac{\partial y_p}{\partial K_P} \right)$$

$$\frac{dK_I}{dt} = -\gamma_I \left(\frac{\partial J}{\partial K_I} \right) = -\gamma_I \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y_p} \right) \left(\frac{\partial y_p}{\partial K_I} \right) = -\gamma_I(\varepsilon) \left(\frac{\partial y_p}{\partial K_I} \right)$$

$$\frac{dK_D}{dt} = -\gamma_D \left(\frac{\partial J}{\partial K_D} \right) = -\gamma_D \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y_p} \right) \left(\frac{\partial y_p}{\partial K_D} \right) = -\gamma_D(\varepsilon) \left(\frac{\partial y_p}{\partial K_D} \right)$$

$$\frac{\partial y_p}{\partial K_P} = \frac{[D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I](bDU_c) - b(K_P D + K_I + K_D D^2)(bD)}{[D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I]^2}$$

$$= \frac{bDU_c}{D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I} - \frac{b(K_P D + K_I + K_D D^2)(bD)}{[D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I]^2}$$

$$= \frac{bD(U_c - y_p)}{D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I}$$

$$\frac{\partial y_p}{\partial K_I} = \frac{b(U_c - y_p)}{D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I}$$

$$\frac{\partial y_p}{\partial K_D} = \frac{bD^2(U_c - y_p)}{D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I}$$

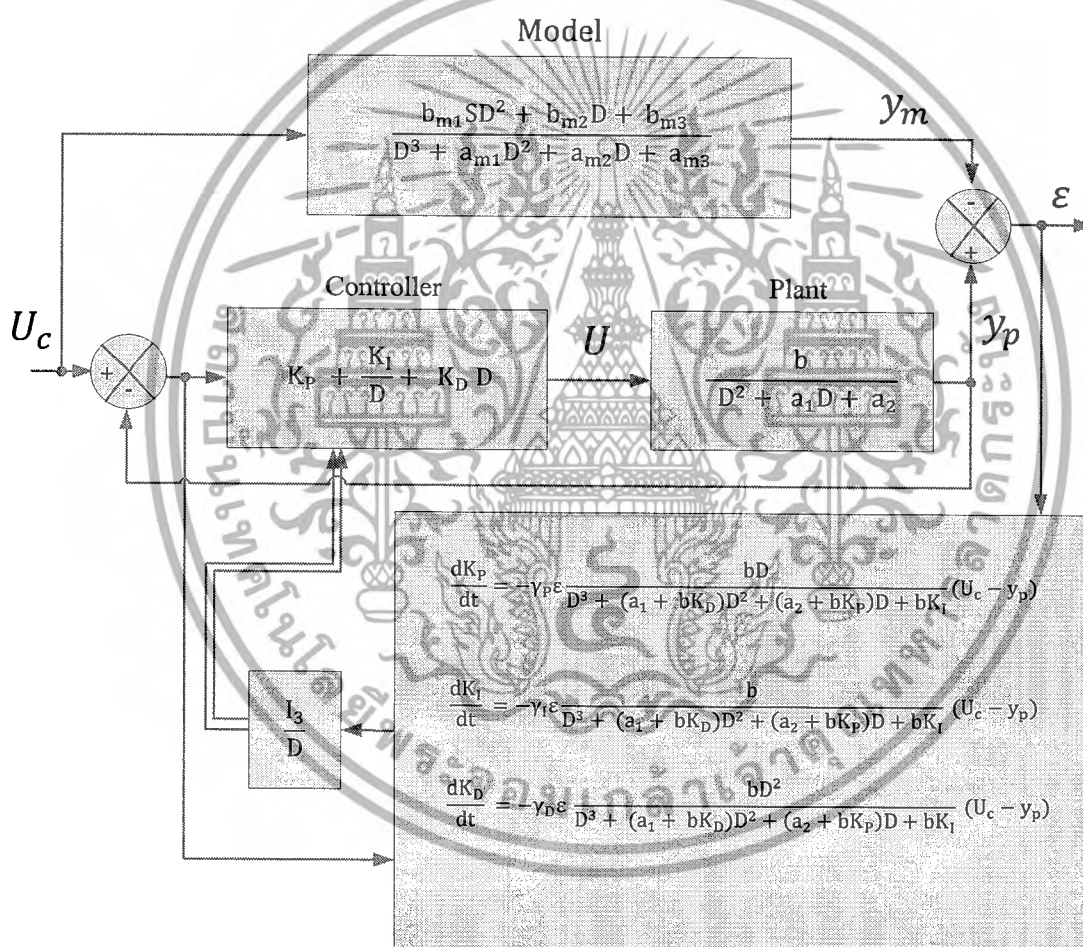
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dK_P}{dt} = -\gamma_P \varepsilon \frac{bD(U_c - y_p)}{D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I}$$

$$\frac{dK_I}{dt} = -\gamma_I \varepsilon \frac{b(U_c - y_p)}{D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I}$$

$$\frac{dK_D}{dt} = -\gamma_D \varepsilon \frac{bD^2(U_c - y_p)}{D^3 + (a_1 + bK_D)D^2 + (a_2 + bK_P)D + bK_I}$$

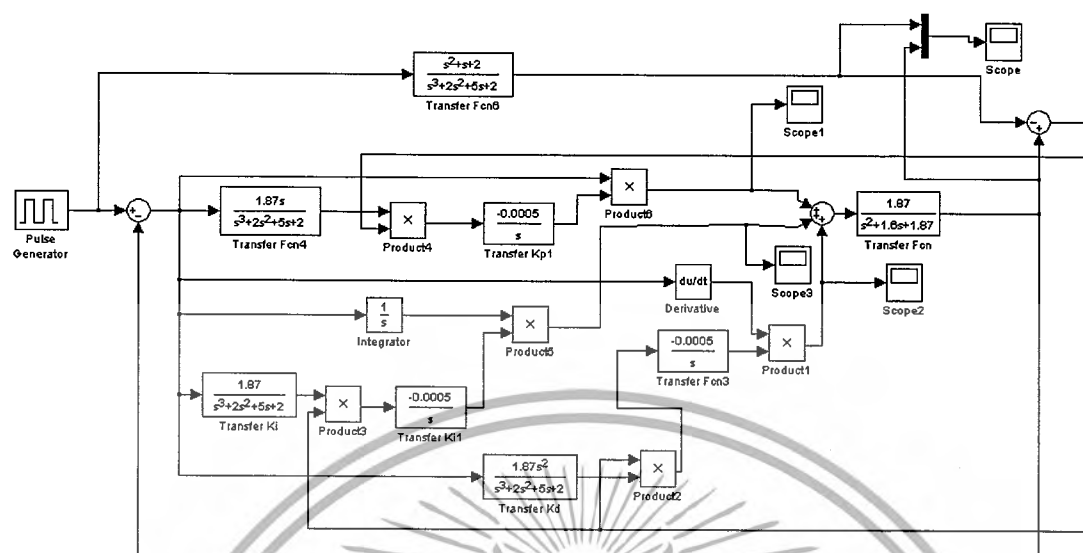
บล็อกไดอะแกรมจากการออกแบบ



ภาพที่ 2.40 บล็อกไดอะแกรม MRAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำโมเดลที่ได้ไปจำลองใน Simulink



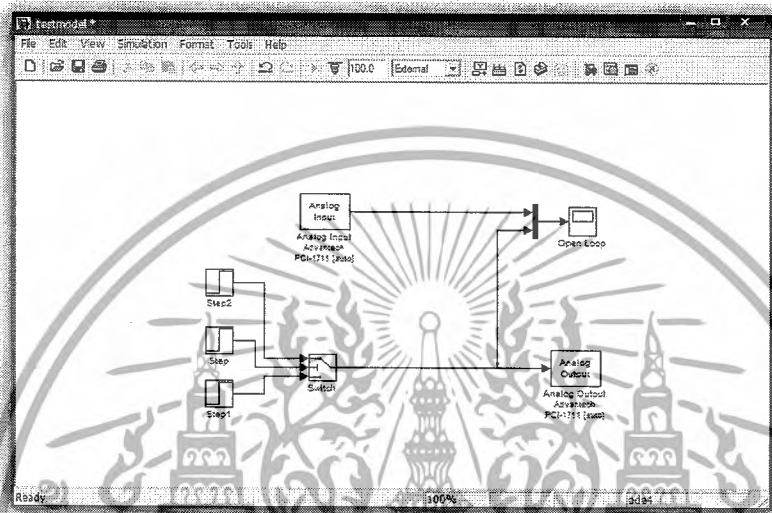
ภาพที่ 2.41 แสดงการนำข้อมูลมาจำลองใน simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

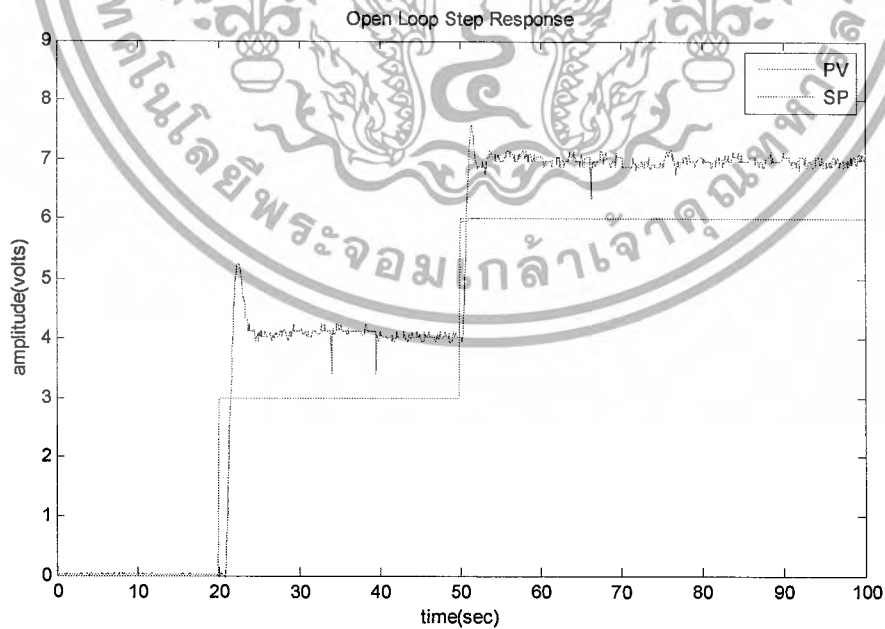
บทที่ 3

การจำลองระบบควบคุมMRAC

3.1 Open Loop Model



ภาพที่ 3.1 แสดงการจำลองเฟล้นแบบลูเปิด

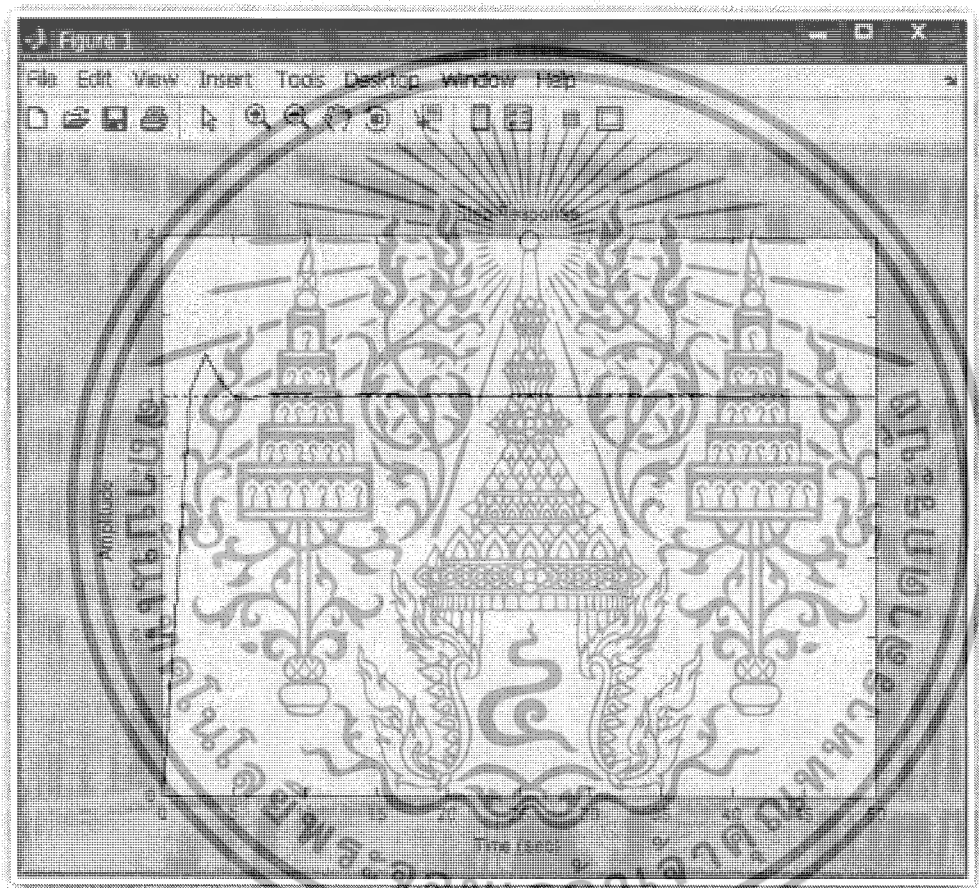


ภาพที่ 3.2 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบลูเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองโมเดลหรือการหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการสามารถหาได้จากกราฟที่ได้จากการจำลองกระบวนการใน Simulink โดยเลือกการพิจารณากราฟที่เสถียรจาก 3-6V จะได้ว่าสามารถพิจารณาหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้ $M_p = 0.2 - 2\%$, $T_s = 5$ s, $\zeta = 0.582$, $\omega_n = 1.37$ จะได้ว่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันคือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{1.87}{s^2 + 1.6s + 1.87}$$



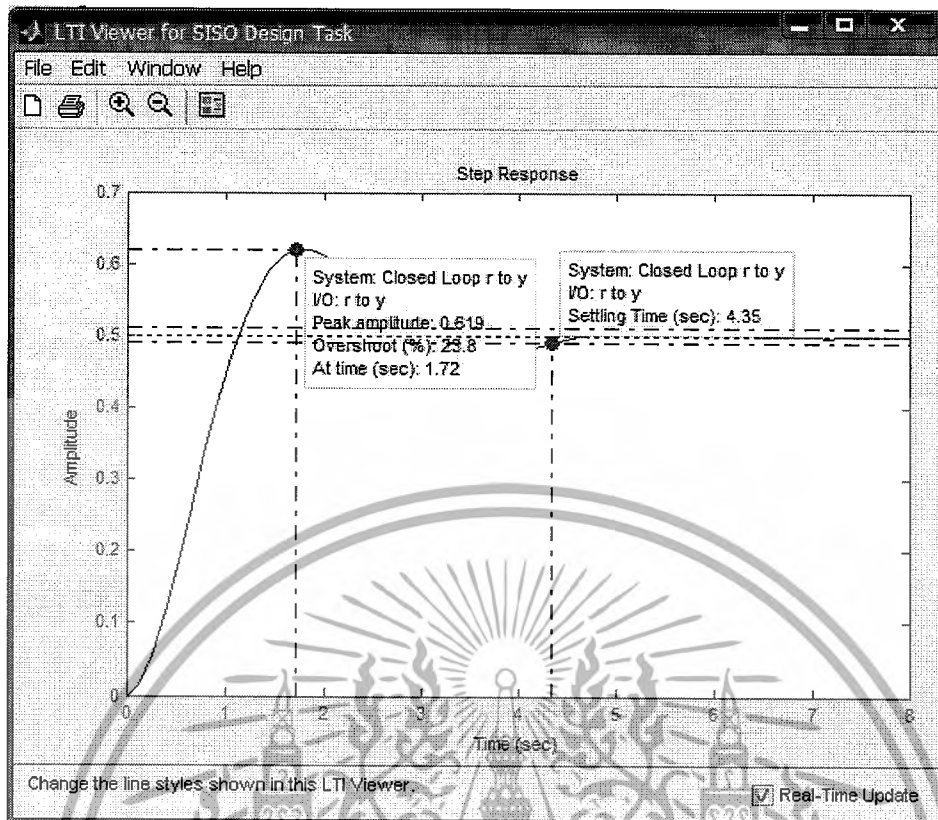
ภาพที่ 3.3 กราฟแสดงผลตอบสนองของกระบวนการแบบลูปเปิดเมื่อจ่ายอินพุตแบบ Unit Step

3.2 PID Control

3.2.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID โดยวิธีทางเดินของราก

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีจะใช้โปรแกรม MATLAB ในส่วนของโปรแกรมย่อย SISOTOOL เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 ผลตอบสนองของกระบวนการดูเปิดเมื่อจ่ายอินพุตแบบ Unit Step

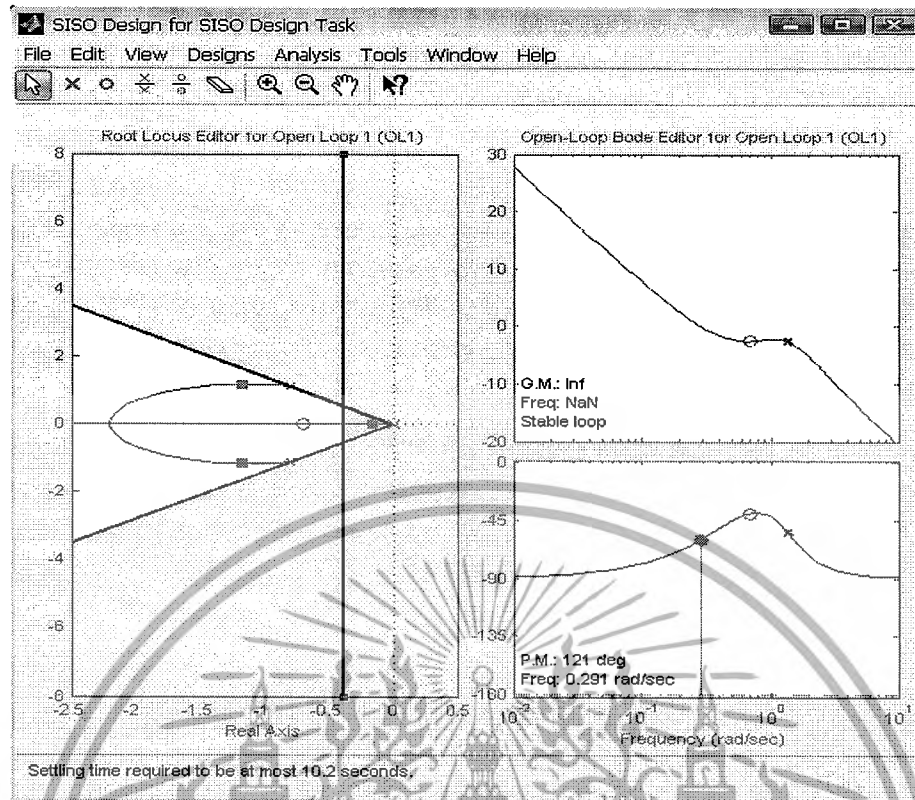
จากภาพที่ 3.4 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม Matlab โดยพิมพ์คำสั่งว่า

```
H = tf([1.87],[1 1.6 1.87])
```

```
Sisotool(h)
```

หลังจากนั้น Matlab จะเรียกส่วนของโปรแกรมย่อย SISOTOOL ขึ้นมาและจะได้ผลตอบสนองตามภาพที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 การหาค่าทางเดินของราก

จากรูปทางเดินของรากเรากำหนดสมรรถนะ คือเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 15 วินาที เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินไม่เกิน 10% หลังจากนั้นทำการวางโพลและซีโรเพื่อให้เส้นทางเดินของรากอยู่ทางด้านซ้ายมือของระนาบ S ซึ่งสมการของตัวควบคุมแบบ พีไอดี คือ

$$\frac{K_c(s + Z_c)^2}{s}$$

เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม SISOTOOL คือ

$$\frac{0.5(s + 0.7)(s + 0.7)}{s}$$

หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบสมการเพื่อคำนวณหาค่า K_p , K_I , K_D ซึ่งจะได้ว่า

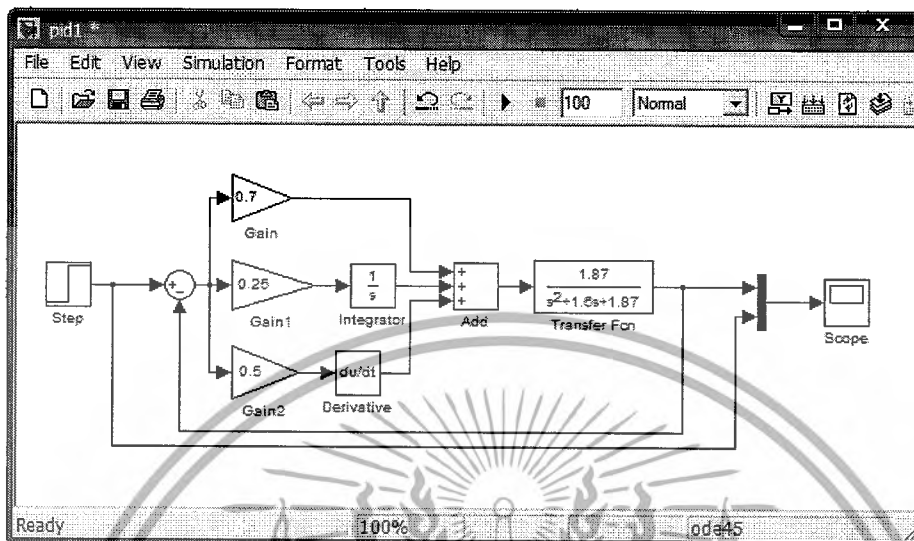
$$K_p = 0.7$$

$$K_I = 0.25$$

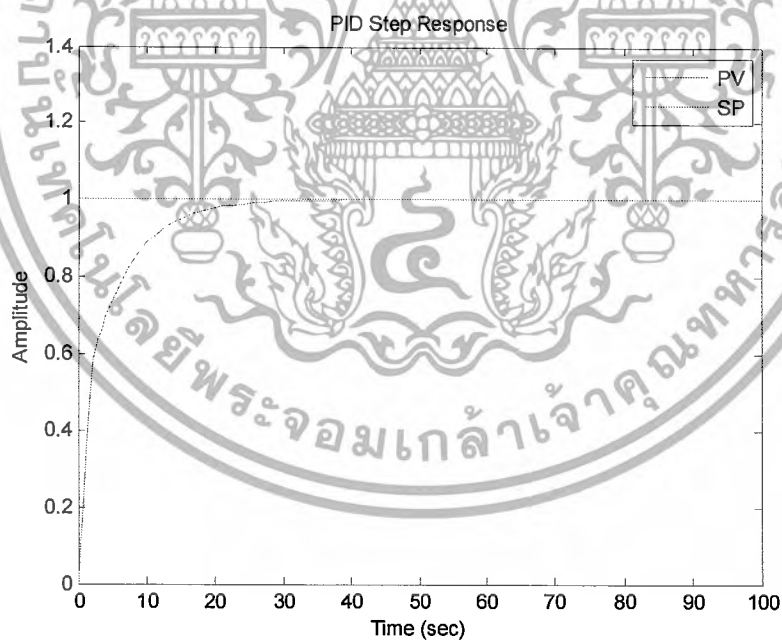
$$K_D = 0.5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า K_P , K_I , K_D ที่ได้มาทำการจำลองกระบวนการในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink ซึ่งกราฟผลตอบสนองแสดงได้ดังรูป

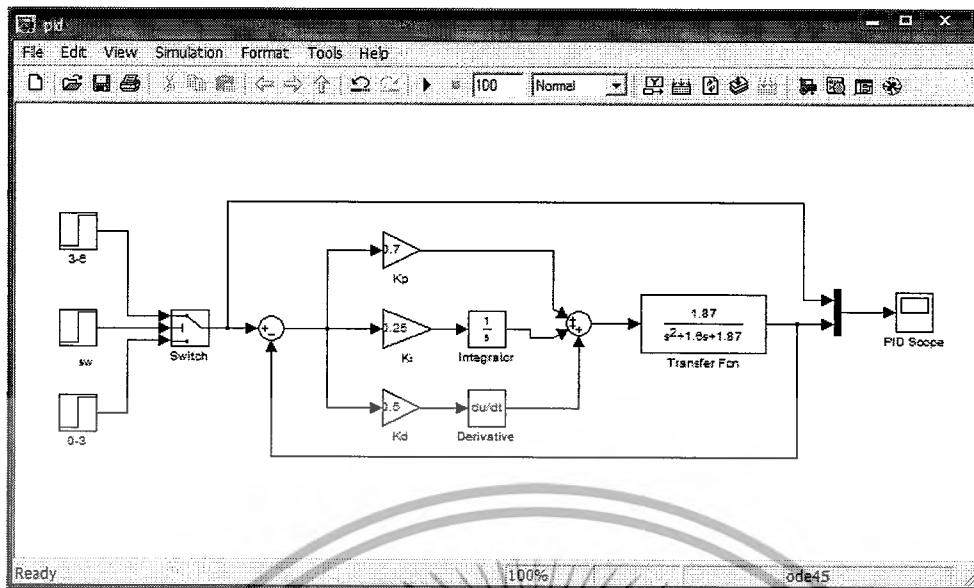


ภาพที่ 3.6 แสดงการจำลองระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID โดยวิธีทางเดินของราก



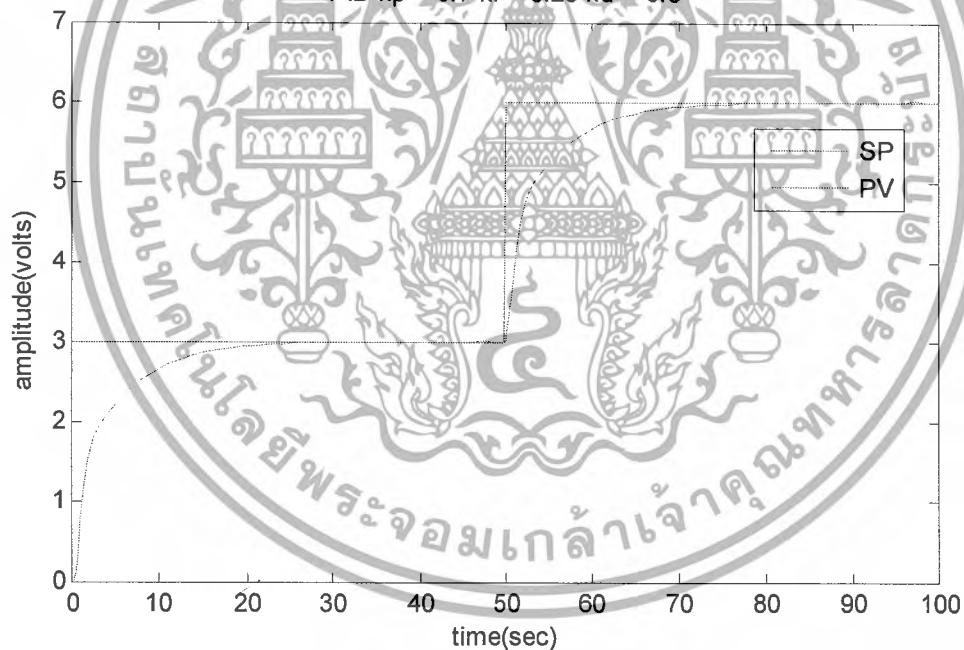
ภาพที่ 3.7 กราฟแสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PID โดยวิธีทางเดินของรากที่ค่า $K_P = 0.7$, $K_I = 0.25$, $K_D = 0.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 แสดงการจำลองระบบควบคุมแบบ PID

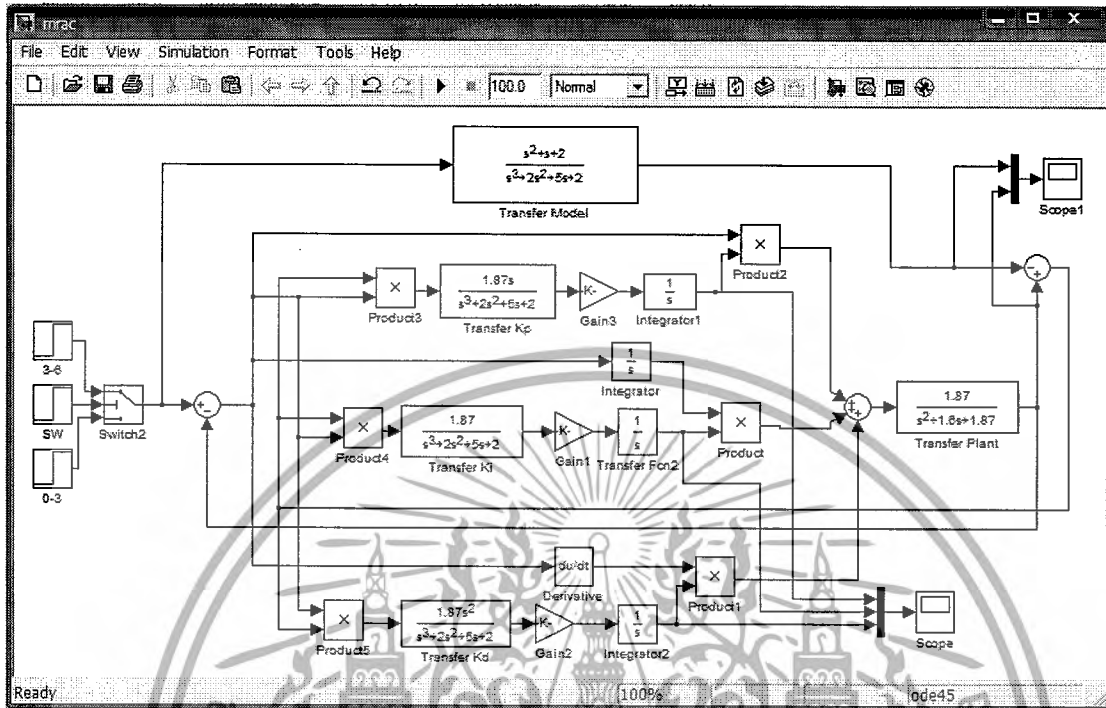
PID $k_p = 0.7$ $k_i = 0.25$ $k_d = 0.5$



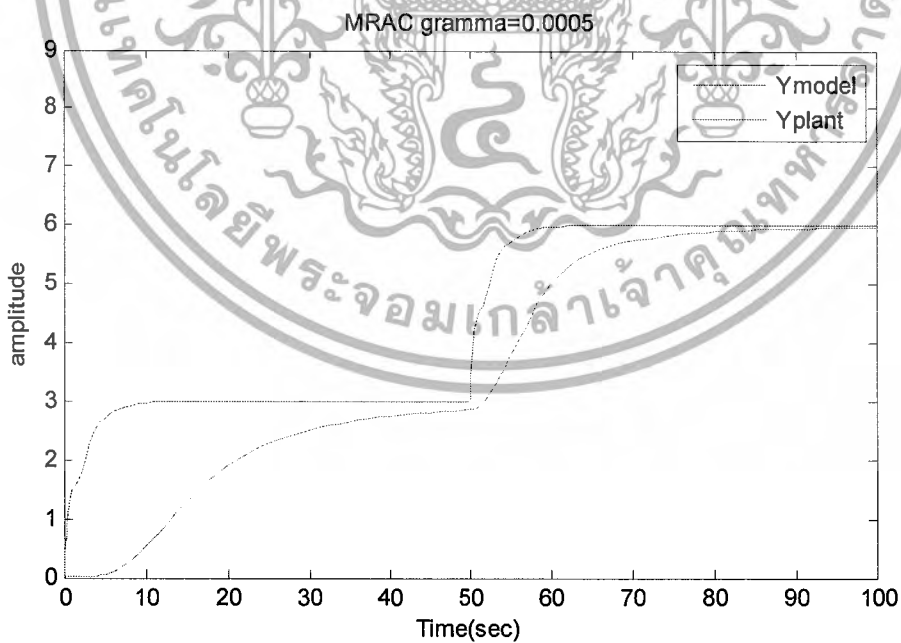
ภาพที่ 3.9 กราฟแสดงผลตอบสนองของการควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 MRAC

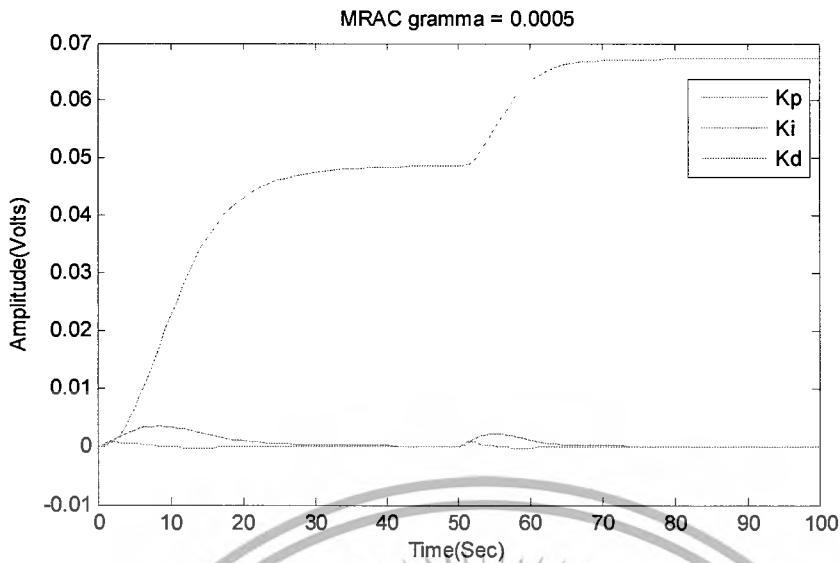


ภาพที่ 3.10 แสดงการจำลองระบบควบคุม MRAC



ภาพที่ 3.11 กราฟแสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ MRAC ที่ $\text{gamma} = 0.0005$

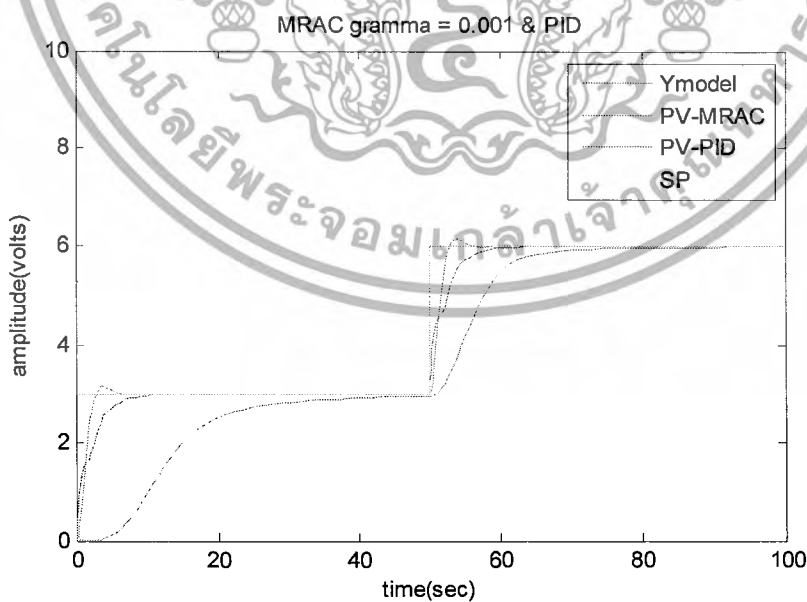
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 กราฟแสดงการหาค่าพารามิเตอร์การหาค่าตัวควบคุมแบบ PID

ภาพที่ 3.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีค่าพารามิเตอร์ที่ได้นี้มาจากการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงค่าให้เหมาะสมต่อกระบวนการเมื่อ Set point เปลี่ยน หรือเกิดสิ่งรบกวนจากภายนอก

3.4 PID VS MRAC Control

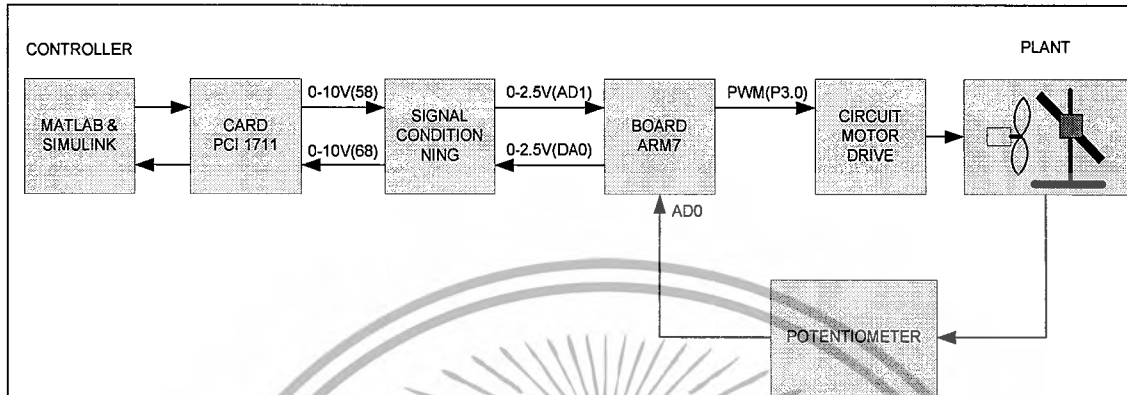


ภาพที่ 3.13 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ MRAC & PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

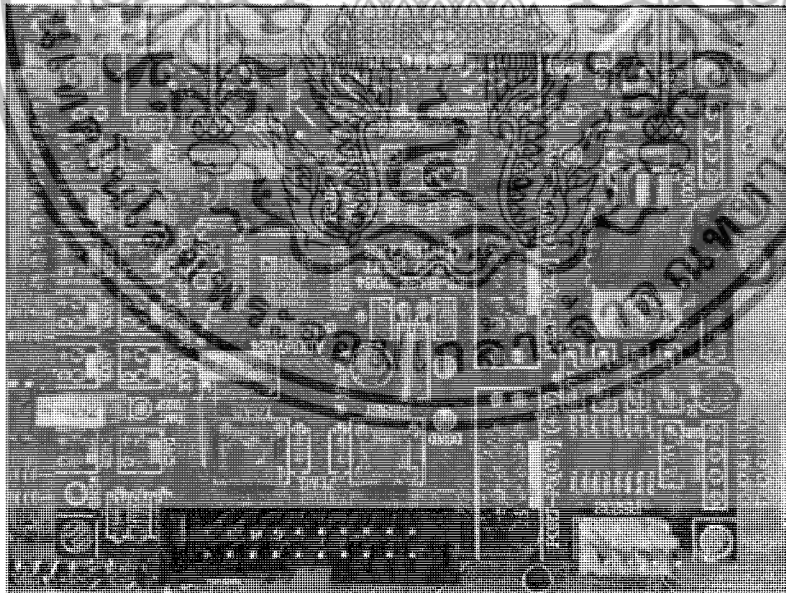
การสร้างระบบควบคุม MRAC



ภาพที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมโครงสร้างระบบ

4.1 ฮาร์ดแวร์

4.1.1 ARM7



ภาพที่ 4.2 บอร์ด ARM7

บอร์ด ARM7 ที่ใช้ในโครงงานนี้มีหน้าที่เพื่อรับและส่งสัญญาณระหว่างคอนโทรลเลอร์กับเพลนต์

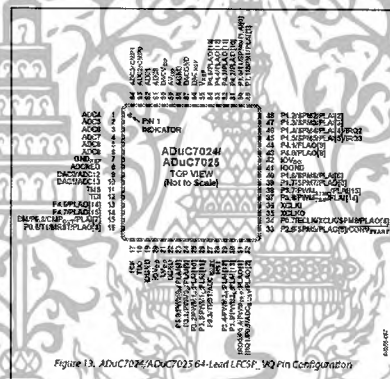
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาปัตยกรรมของ ARM7 เป็นซีพียูรูปแบบ RISC ขนาด 32 บิตภายในมีบัสขนาด 32 บิต ตัวเดียวที่ใช้สำหรับรับข้อมูลและคำสั่งชุดคำสั่งจะมีขนาด 32 บิต คงที่ในขณะที่ข้อมูลสามารถเลือกได้ว่าจะมีขนาด 8, 16 หรือ 32 บิต

โครงสร้างของ ARM7 จะเป็นแบบที่เรียบง่ายมีชุดคำสั่งไม่มากนักประหยัดพื้นที่สารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างประหยัดพลังงาน

สถาปัตยกรรมของ ARM7 จะเป็นแบบ load-and-store ในการประมวลผลข้อมูลใด ๆ ต้องทำผ่านทางรีจิสเตอร์เริ่มต้นด้วยการโหลดค่าจากหน่วยความที่จัดเก็บในรีจิสเตอร์นำค่ามาประมวลผลเสร็จแล้วจะเขียนค่าเก็บในหน่วยความจำดั้งเดิม

รีจิสเตอร์ของ ARM7 ที่ใช้งานได้สำหรับผู้มีทั้งหมด 16 ตัว คือ R0-R15 โดยทุกตัวมีขนาด 32 บิต โดย R0-R12 เป็นรีจิสเตอร์ทั่วไป ไม่ได้กำหนดหน้าที่การทำงานพิเศษ ส่วน R12 ทำหน้าที่เป็น stack pointer (SP) R14 และทำหน้าที่เป็น link register (LR) และ R15 ทำหน้าที่เป็น Program Counter (PC)



ภาพที่ 4.3 แสดงการจัดขาของ ADuC7024

รีจิสเตอร์ของ ARM7 ที่นำมาใช้ในโครงงานนี้ได้แก่ GPIO, A2D, D2A, PWM, I2C ซึ่งจะขอกกล่าวถึงคุณสมบัติรีจิสเตอร์แต่ละตัวพอสังเขปได้ดังนี้

4.1.1.1 การติดต่อของพอร์ต และการควบคุมการทำงานของพอร์ตตอนยกประสงค์

(General Purpose I/O GPIO)

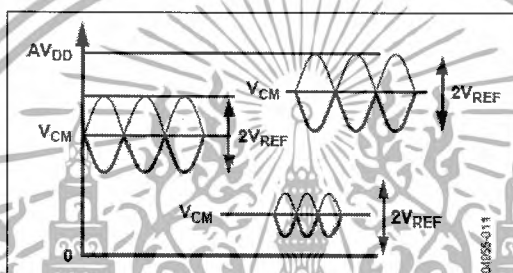
ADuC7024 มีพอร์ตตอนยกประสงค์ (General Purpose I/O) ขนาด 32 บิตให้ใช้งานทั้งหมด 5 พอร์ตคือ P0-P4 โดยแต่ละพอร์ตจะมี 8 ขา PX.0-PX.7 รวม 40 ขา ทั้งหมดทำหน้าที่เป็นได้ทั้งอินพุตพอร์ตและเอาต์พุตพอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

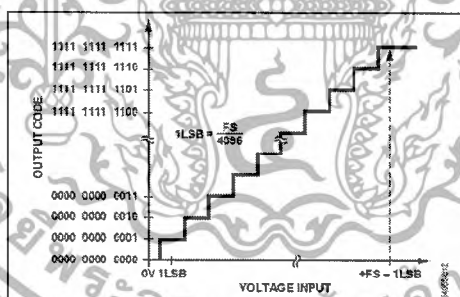
แต่เนื่องจากแต่ละขาของพอร์ต P0-P4 มีหน้าที่การทำงานได้หลายประเภทจึงต้องมีการกำหนดหน้าที่การทำงานของแต่ละพอร์ตโดยรีจิสเตอร์ดังนี้

4.1.1.2 การติดต่อพอร์ต และการเขียนโปรแกรมสั่งงานของวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล(A/D)

สำหรับฟังก์ชัน ADC ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ADuC7024 นั้นจะมีขนาด 12bit 10 Channel สามารถรับสัญญาณอนาล็อกได้ ตั้งแต่ 0V-VREF เมื่อทำงานอยู่ในโหมด single-ended และถ้าทำงานอยู่ในโหมด Fully Difference จะสามารถรับสัญญาณอินพุทแบบอนาล็อกได้ ตั้งแต่ 0V-AVDD ด้วยค่าแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 2VREF



ภาพที่ 4.4 แสดงรูปสัญญาณเมื่อทำงานอยู่ในโหมด Fully Difference



ภาพที่ 4.5 Pseudo Differential and Single-Ended Modes

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานอยู่ตำแหน่งโหมด Pseud Differential & Single Ended ย่านการทำงานที่สามารถรับอินพุทจากภายนอกจะอยู่ในช่วง 0V ถึง 2VREF ถ้าแปลงให้เป็นรหัสเลขฐานสองทำได้โดย

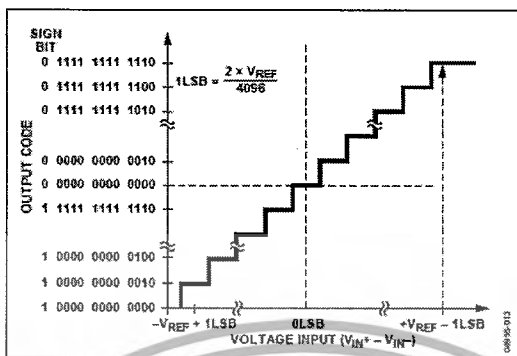
$$1 \text{ LSB} = \text{FS}/4096$$

$$\text{หรือ } 2.5 \text{ V}/4096 = 0.61 \text{ mV}$$

$$\text{หรือ } 610 \mu\text{V when VREF} = 2.5 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งคุณสมบัติการแปลงสัญญาณในทางอุดมคติแสดงดังภาพที่ 4.4 และ ภาพที่ 4.5 เป็นคุณสมบัติของการแปลงสัญญาณ ADC เมื่อทำงานอยู่ในโหมด Differential

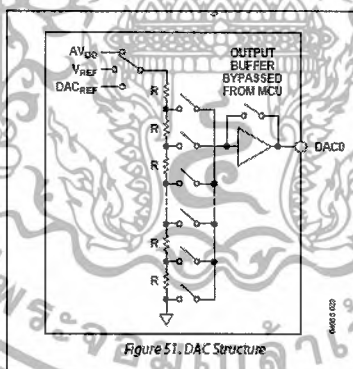


ภาพที่ 4.6 การแปลงสัญญาณ ADC เมื่อทำงานอยู่ในโหมด Differential

4.1.1.3. การติดต่อและการเขียนโปรแกรมของวงจรแปลงดิจิทัล เป็น อนาลอก

(D/A)

มี D/A จำนวน 2 ช่องอินพุตเป็นสัญญาณอนาลอกขนาด 12 บิตขนาดของแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ $0-V_{REF}$, $0-A_{VDD}$, $0-DAC_{REF}$ แล้วแต่จะเลือกใช้



ภาพที่ 4.7 วงจรแปลงดิจิทัลเป็นอนาลอก (D/A)

หลักการการทำงานเมื่อมีลอจิก 1 มาเหมือนการสับสวิทช์ทำให้เกิดการแบ่งแรงดันส่งต่อผ่านตัวของออปแอมป์ทำให้เกิดแรงดันที่เอาต์พุตลอจิกที่มีนัยสำคัญมากกว่าถูกสับก็จะทำให้ได้รับสัญญาณเอาต์พุตมากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับ DAC ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 เบอร์ ADuC7024 นั้นจะมีขนาด 12-bit 2 Channel มีย่านการใช้งาน 2 ย่าน คือ $0V-V_{REF}$ และ $0V-A_{VDD}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.4 การติดต่อและการเขียนโปรแกรมสั่งงานอุปกรณ์ I²C

I²C = I²C BUS ย่อมาจาก Inter Integrate Circuit Bus (IIC) นิยมเรียกสั้น ๆ ว่า I²C BUS (ไอ-แอสคว-ซี-บัส) เป็นการสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัส (Synchronous) เพื่อใช้ติดต่อสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) กับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Philips Semiconductors โดยใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้นคือ SDA (Serial Data Line) และสาย SCL (Serial Clock Line) สาย SDA คือสายที่ใช้ในการส่งข้อมูลและสาย SCL เป็นสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการกำหนดจังหวะการทำงาน ซึ่งสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์จำนวนหลาย ๆ ตัวเข้าด้วยกันได้ทำให้ MCU ใช้พอร์ตเพียง 2 พอร์ตเท่านั้นความเร็วในการติดต่อสื่อสารนั้นมีตั้งแต่ความเร็วที่ความถี่ 100kHz - 400kHz ตามสมการ

$$f_{serialclock} = \frac{f_{UCLK}}{(2 + DIVH) + (2 + DIVL)}$$

เมื่อ

$f_{serialclock}$ = คือ ความถี่ที่ต้องการ

f_{UCLK} = คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

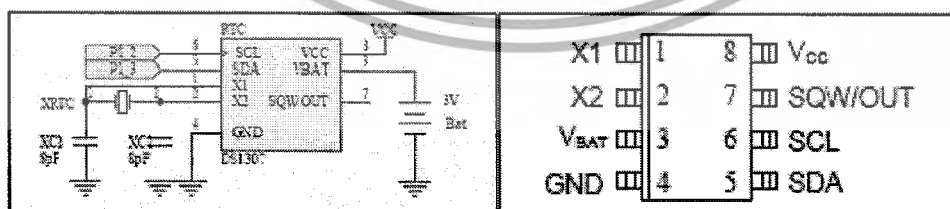
(41.78 MHz)

DIVH = คือ คาบเวลาของลอจิก high

DIVL = คือ คาบเวลาของลอจิก low

ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการความถี่ 100kHz จะได้ $DIVH = DIVL = 0xCF$

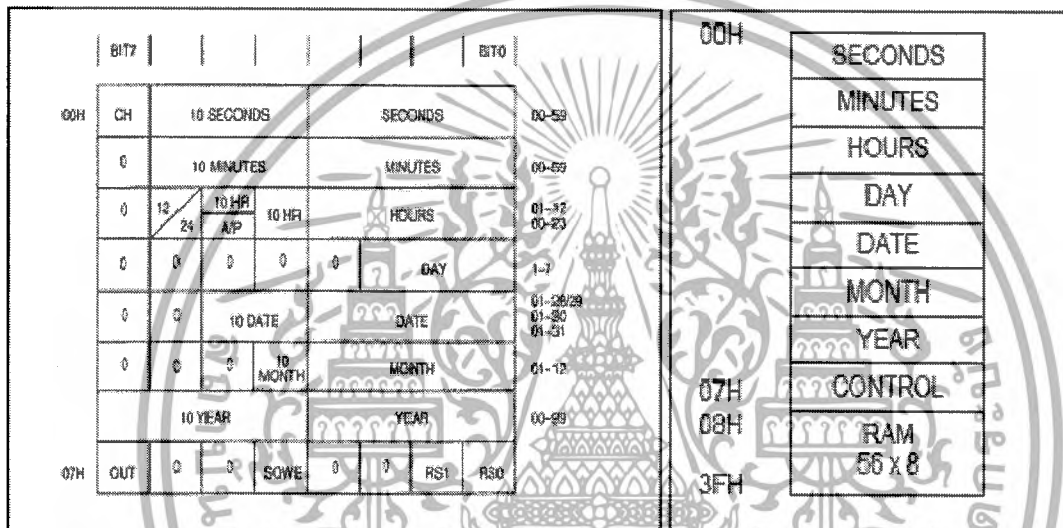
4.1.1.5 เขียนโปรแกรมติดต่อกับ REAL TIME CLOCK



ภาพที่ 4.8 ลักษณะวงจรการต่อสายและรายละเอียดขาสัญญาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vcc	= แหล่งจ่ายไฟฟ้า
X1,X2	= ขาต่อคริสตอลความถี่ 32.768 kHz
Vbat	= +3V แหล่งจ่ายไฟสำรอง
GND	= กราวด์
SDA	= Serial data line ขาสัญญาณข้อมูลอนุกรม
SCL	= Serial clock line ขาสัญญาณนาฬิกา
SQW/OUT	= ขาสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเอาต์พุต

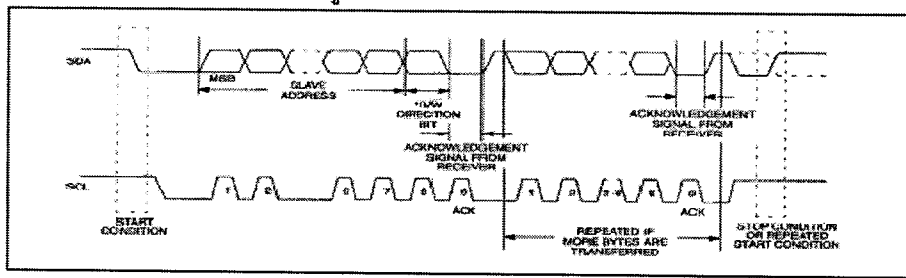


ภาพที่ 4.9 แสดงแอดเดรสของ Register ต่างๆ ใน DS1307

DS1307 มีขนาด 64*8 ในแต่ละแอดเดรสข้อมูลจะมีขนาด 8 บิตตั้งแต่แอดเดรสที่ 00H-06H มีไว้สำหรับเขียนหรืออ่านข้อมูลที่เป็น วินาที,นาฬิกา,ชั่วโมง,วัน,วันที่,เดือน,ปี ตามลำดับ ส่วนการใช้งานนั้นถ้าต้องการเขียนปี 07 ลงไปใน register จะต้อง อ้างอิงแอดเดรสก่อนคือแอดเดรสที่ 06H ต่อจากนั้นก็เขียนข้อมูลลงไปได้เลยคือ 07H ตัวอย่างคำสั่งคือ WriteDS1307(0x06,0x07); ลำดับการทำงานของคำสั่ง ก็จะส่ง 06H ออกไปก่อนต่อจากนั้นจะส่งข้อมูล 07H ตามออกไป แอดเดรสที่ 07H นั้นเป็นส่วนของการควบคุมการผลิตของสัญญาณพัลส์ ซึ่งสามารถต่อออกไปใช้งานภายนอกได้ส่วนแอดเดรสตั้งแต่ 08H-3FH นั้นเป็นส่วนของแรมสามารถเก็บข้อมูลได้ด้วยขนาด 56*8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

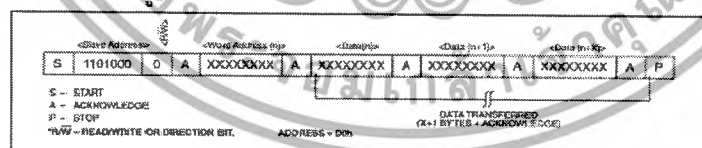
- TIMING DIAGRAM ของการส่งถ่ายข้อมูลแบบ I²C



ภาพที่ 4.10 Timing Diagram การส่งข้อมูล

จากภาพที่ 4.10 สังเกตได้ว่าถ้า SCL เป็นลอจิก 1 แบบค้างสถานะแล้ว SDA มีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลถือว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นไม่ใช่ข้อมูลในช่วงเริ่มต้น (Start condition) SCL เป็นลอจิก 1 SDA เป็นช่วงขอบขาลงหลังจากผ่านสัญญาณ Start แล้วตัว Master จะส่งแอดเดรสไปให้กับตัว DS1307 (Slave) ว่าจะติดต่อกับตัวไหนในบอร์ดทดลองนี้ DS1307 อยู่ที่ 0xD หลังจากนั้นจะส่งบิต R/W เพื่อบอกว่าต้องการเขียนหรืออ่าน 1 = อ่าน, 0 = เขียน เช่น 0xD0 เป็นการติดต่อเพื่อทำการเขียนเป็นต้นหลังจากนั้นตัว Master จะหยุดส่ง SDA แต่ส่ง SCL ออกไปหนึ่งลูกและทำการรับสัญญาณจาก DS1307 ว่าทราบข้อมูลหรือยังถ้าตัวลูกส่ง ACK ตอบกลับมาว่าทราบแล้วตัว Master จะส่งข้อมูลไปต่อดังไปตามมาถ้าส่งครบแล้วตัว Master ทำให้ SDA, SCL เป็นลอจิก 1 คือช่วงของ Stop condition

- โหมดการเขียนข้อมูล

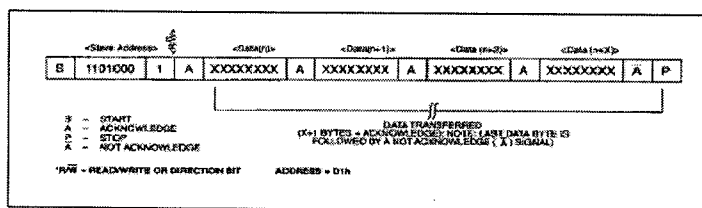


ภาพที่ 4.11 โหมดการเขียนข้อมูล

ในโหมดนี้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ (Master) ต้องการติดต่อกับ DS1307 (Slave) เพื่อทำการเขียนข้อมูลหลังจากผ่าน Start condition ไปแล้วตัว Master จะส่งข้อมูล 0xD0 เพื่ออ้างอิงถึงตำแหน่งและการเขียนต่อจากนั้นก็ส่ง ACK รอการตอบกลับตามด้วยข้อมูลและ Stop bit เป็นการสิ้นสุดโหมดการเขียนข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โหมดการอ่านข้อมูล

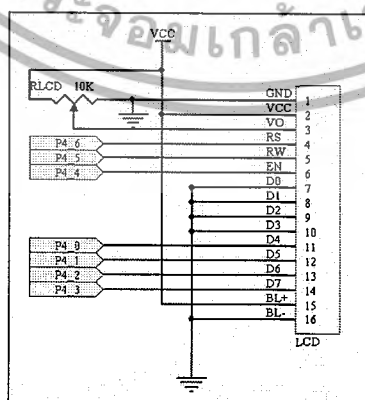


ภาพที่ 4.12 การอ่านข้อมูล

ในโหมดนี้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ (Master) ต้องการติดต่อกับ DS1307 (Slave) เพื่อทำการอ่านข้อมูลหลังจากผ่าน Start condition ไปแล้วตัว Master จะส่งข้อมูล 0xD1 เพื่ออ้างอิงถึงตำแหน่งและการอ่านต่อจากนั้นก็ส่ง ACK รอการตอบกลับตามด้วยข้อมูลและ Stop bit เป็นการสิ้นสุดโหมดการเขียนข้อมูล

4.1.1.6 คำสั่งควบคุมโมดูลตัวแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD interface)

จอแสดงผลที่ใช้ในงานนี้เป็นรูปแบบ Dot Matrix LCD Module เป็นอุปกรณ์แผงแสดงผลตัวอักษรหรือตัวเลขใช้แสดงผลการทำงานเป็นข้อความตัวอักษรหรือข้อความต่าง ๆ ซึ่ง LCD Module มีส่วนประกอบใหญ่ ๆ แบ่งได้เป็น Dot Matrix LCD เป็นส่วนของกระจกผลึกที่ใช้สำหรับการแสดงผล Driver เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุมมาขับ LCD อีกที่หนึ่ง Controller เป็นตัวรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกมาและจัดการควบคุม LCD Module ให้ทำงานแสดงผลต่าง ๆ เช่น ลบจอภาพการเกิดตัวอักษรโดยตัว LCD MODULE สามารถนำไปต่อเข้ากับบอร์ดของตัวบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ทาง DATA BUS หรือทาง I/O PORT

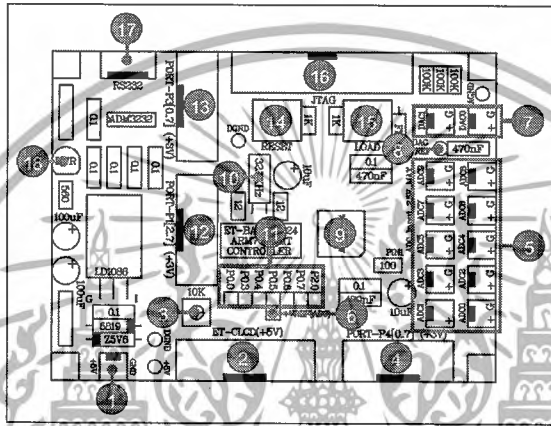


ภาพที่ 4.13 Schematic ของการต่อจอแสดงผล LCD กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ADuC 7024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.13 Schematic ของการต่อกับจอแสดงผล LCD กับตัวคอนโทรลเลอร์ ADuC7024 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นการต่อแบบ I/O port และการทำงานของจอแสดงผล LCD อยู่ในโหมด 4 บิตซึ่งจะต่อใช้งานที่ D7-D4 โดยข้อมูลครั้งแรกที่ส่ง นั้นจะถือเป็นข้อมูล 4 บิตบนและข้อมูลที่ส่งต่อมานั้นเป็นข้อมูล 4 บิตล่างโดยรายละเอียดการต่อใช้งานขาต่างๆของ LCD โมดูลมีดังต่อไปนี้

4.1.1.7 โครงสร้างบอร์ด ET-BASE ARM7024 (ADuC7024)



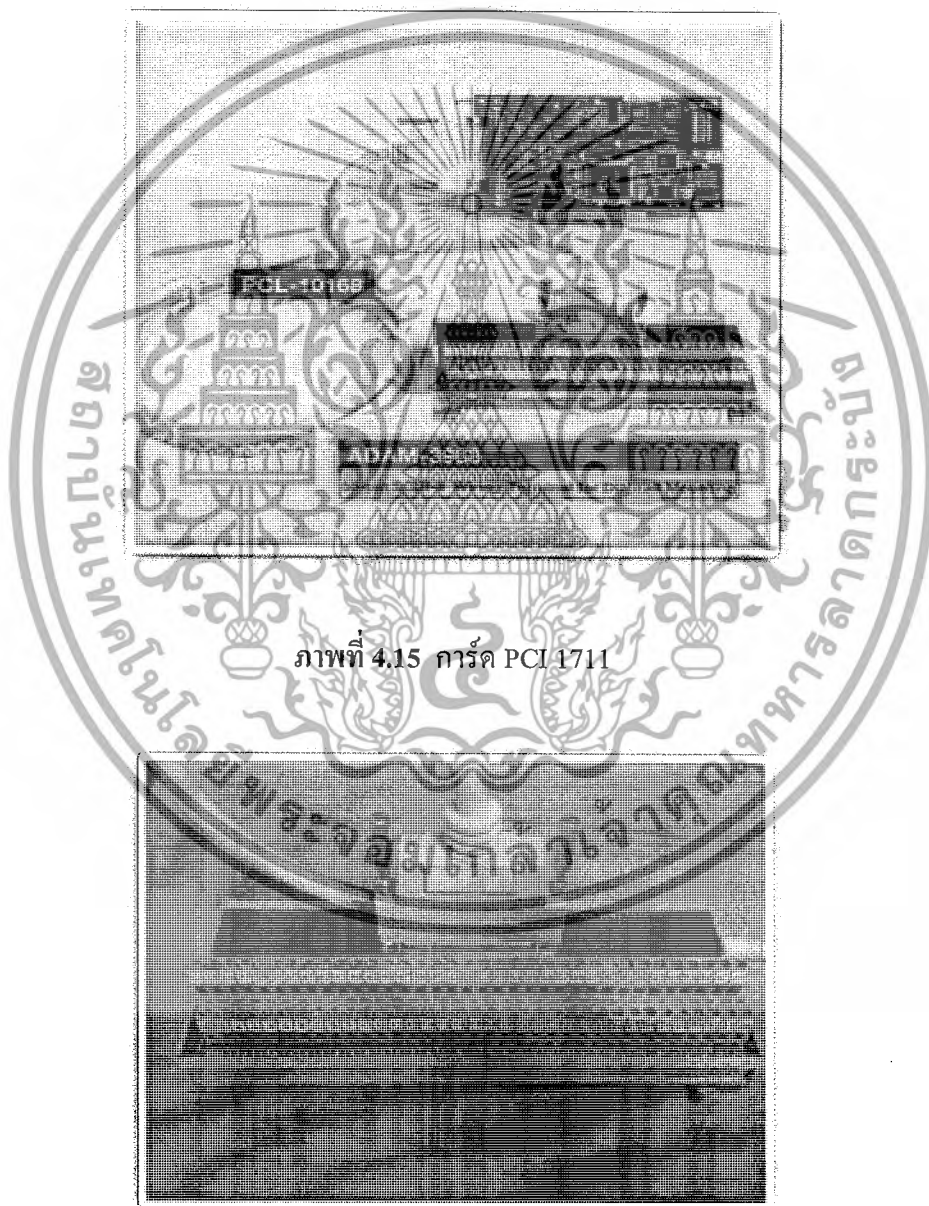
ภาพที่ 4.14 บอร์ด ET-BASE ARM7024(ADuC7024)

- หมายเลข 1 คือ ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรของบอร์ด ใช้กับแหล่งจ่ายไฟตรง +5VDC
- หมายเลข 2 คือ Port-LCD ชนิด Character Type ใช้การเชื่อมต่อแบบ 4 บิต ผ่าน Port-P4[0..6]
- หมายเลข 3 คือ ตัวต้านทานสำหรับปรับค่าความสว่างให้ LCD
- หมายเลข 4 คือ Port-P4 มี ขนาด 8 Bit คือ P4[0..7]
- หมายเลข 5 คือ ขั้วต่อ ADC จำนวน 10 ช่อง คือ ADC[0..9]
- หมายเลข 6 คือ จุดต่อแรงดันอ้างอิงให้ ADC จากภายนอก
- หมายเลข 7 คือ ขั้วต่อ DAC จำนวน 2 ช่อง คือ DAC[0..1]
- หมายเลข 8 คือ จุดต่อแรงดันอ้างอิงให้ DAC จากภายนอก
- หมายเลข 9 คือ MCU เบอร์ ADuC7024 ซึ่งเป็น MCU ตระกูล ARM7TDMI จาก Analog Device
- หมายเลข 10 คือ Crystal ค่า 32.768 KHz
- หมายเลข 11 คือ Port-P0 มี ขนาด 6 Bit คือ P0[0,3,4,5,6,7] และ Port-P2 มี 1 บิต คือ P2[0]
- หมายเลข 12 คือ Port-P1 มี ขนาด 6 Bit คือ P1[2..7]
- หมายเลข 13 คือ Port-P3 มี ขนาด 8 Bit คือ P3[0..7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเลข 14 คือ Switch RESET ใช้สำหรับ Reset การทำงานของ CPU
- หมายเลข 15 คือ Switch LOAD ใช้ร่วมกับ RESET สำหรับสั่ง Download HEX ให้ MCU
- หมายเลข 16 คือ ขั้วต่อ ARM-JTAG สำหรับ Debug โปรแกรม
- หมายเลข 17 คือ ขั้วต่อ RS232 สำหรับใช้งานทั่วไป และ Download HEX ให้ MCU
- หมายเลข 18 คือ LED Power ใช้แสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟ +5VDC

4.1.2 Card Interface



ภาพที่ 4.15 การ์ด PCI 1711

ภาพที่ 4.16 คอนเน็กเตอร์สำหรับการ์ด PCI 1711

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ์ด PCI1711 เป็นการ์ดแบบ Multifunction ของบริษัท Advantech ประกอบไปด้วย A/D, D/A, Timer/Counter ซึ่งคุณสมบัติของแต่ละตัวอธิบายได้ดังนี้

- ส่วนแปลงสัญญาณ A/D

ส่วนแปลงสัญญาณ A/D นี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแรงดันจากอุปกรณ์กรองความถี่ และแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัลเพื่อส่งให้กับคอมพิวเตอร์ หรือตัวส่งสัญญาณต่อไปโดย ส่วนแปลงสัญญาณ A/D นี้จะมีจำนวนช่องในการรับสัญญาณถึง 16 ช่องมีความละเอียดสูงถึง 12 บิต มีความเที่ยงตรงสูงถึง $\pm 0.5\%$

- ส่วนการแปลงสัญญาณ D/A

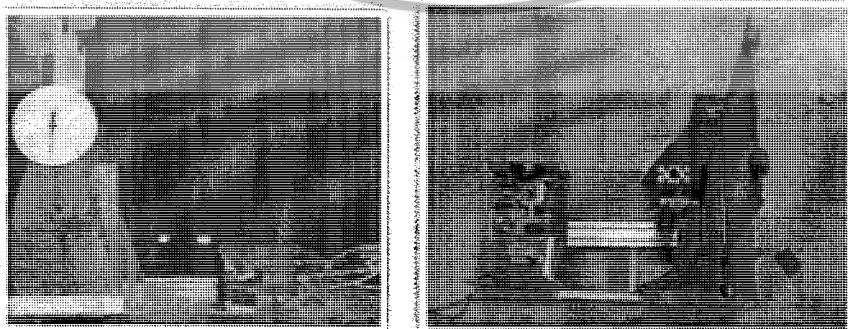
ส่วนแปลงสัญญาณ D/A นี้จะมีหน้าที่หลักในการรับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุมและแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อก นั้นใช้เพื่อส่งให้กับชุดขับเคลื่อนต่อไปโดย ส่วนแปลงสัญญาณ D/A นี้จะมีจำนวนช่องในการส่งสัญญาณ 2 ช่องมีความละเอียดสูงถึง 12 บิตมีความเป็นเชิงเส้นมากถึง ± 0.5 บิตและมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงถึง $10 \mu s$ นอกจากนี้ยังสามารถเลือกใช้ช่วงของสัญญาณเอาต์พุตที่ทำการจัดส่งออกไปได้หลายแบบ

ด้วยการ์ด PCI1711 นั้นนำมาใช้เพื่อทำหน้าที่รับส่งสัญญาณในรูปของแรงดันไฟฟ้าระหว่างคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมกับบอร์ด ARM7 และบอร์ด Signalconditioning ที่ทำหน้าที่เป็นตัวไต่

4.1.3 Fan & Plate

ในการควบคุมการทำงานของกระบวนการพัดลมและแผ่นเพลทเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการได้ นั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ มาประกอบเข้าด้วยกันซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างกระบวนการพัดลมและแผ่นเพลทมีดังนี้

4.1.3.1 โครงสร้างของกระบวนการพัดลมและแผ่นเพลท

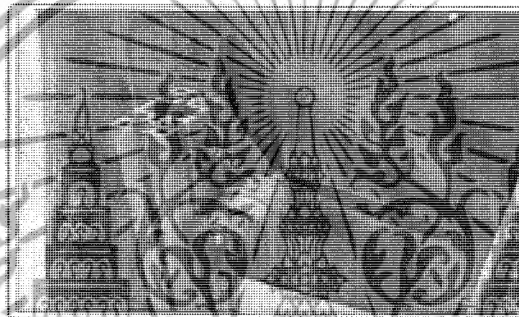


ภาพที่ 4.17 แสดงโครงสร้างกระบวนการพัดลมและแผ่นเพลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบชุดทดลองระบบการพัลลัมและแผ่นเพลทนั้นสามารถดังภาพที่ 4.18 การเคลื่อนที่ของแผ่นเพลทจะต้องมีแกนยึดเพื่อเป็นแกนที่ช่วยทำให้แผ่นเพลทหมุนรอบแกน ฉะนั้น แกนหมุนจึงจำเป็นที่จะต้องมีความเสียดทานต่ำ (Low Friction) แผ่นเพลทที่ได้นำมาทำการสร้างนั้น มีความกว้าง 30 ซม. ยาว 60 ซม. และหนา 2 มม. ฐานรองมีขนาดความกว้าง 35 ซม. ยาว 70 ซม. หนา 5 มม. แกนหมุนอยู่สูงจากพื้น 4 ซม. มอเตอร์และพัลลัมที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของแผ่นเพลทจะต้องเคลื่อนที่ปรับตำแหน่งได้ขนาดและน้ำหนักของแผ่นเพลทเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมระบบ การนำหนักจะต้องอยู่ในย่านที่สามารถควบคุมได้ไม่หนักหรือเบาจนเกินไป

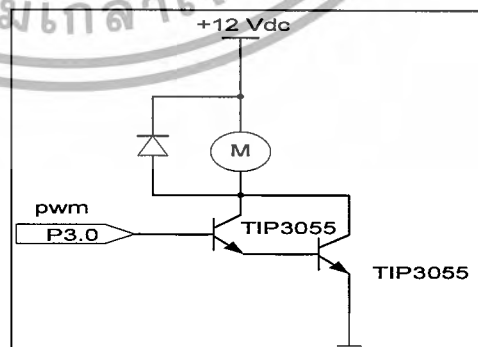
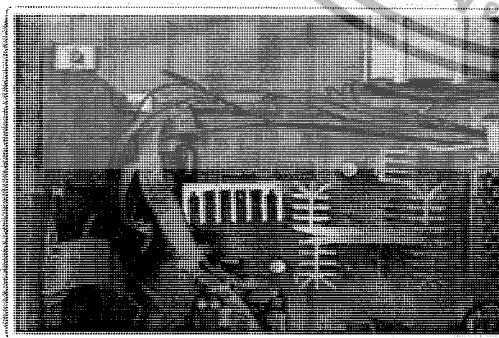
4.1.3.2 มอเตอร์และพัลลัม



ภาพที่ 4.18 แสดงมอเตอร์และใบพัด

มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์ขนาด 12 Vdc 20000 rpm และใบพัดที่ใช้ 3 ใบ ขนาด 8 inch

4.1.3.3 ชุดขับมอเตอร์

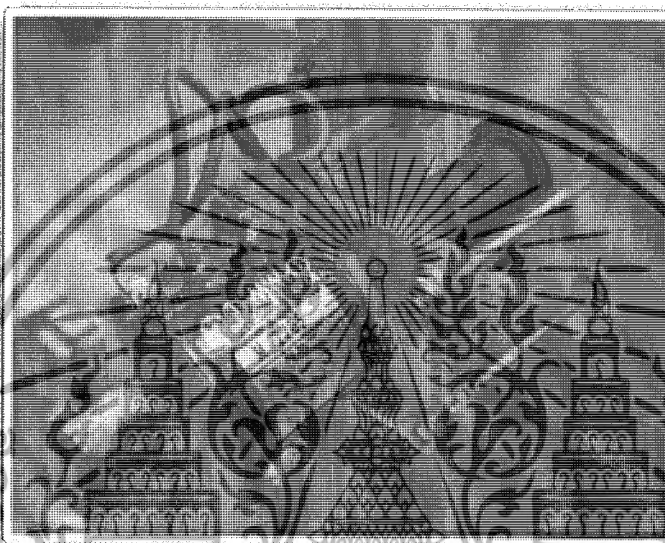


ภาพที่ 4.19 แสดงบอร์ดขับมอเตอร์และวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บอร์ดและวงจรดังแสดงในภาพที่ 4.19 เป็นบอร์ดที่ใช้สำหรับขับมอเตอร์พัดลมตัว วงจรจะใช้ทรานส์ซิสเตอร์ TIP3055 ต่อเป็นแบบคาบิลิตันเพื่อใช้เป็นขยายสัญญาณเพิ่มจากนั้น สัญญาณที่ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่เป็นสัญญาณรูปแบบ PWM (Plus width mod) มาจากพอร์ต P3.0 ของบอร์ด ARM7 สวิตซ์ซึ่งที่ความถี่ 300 Hz ที่ Duty Cycle 100 % มอเตอร์กินกระแส 5A.

4.1.3.4 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงของแผ่นเพลท

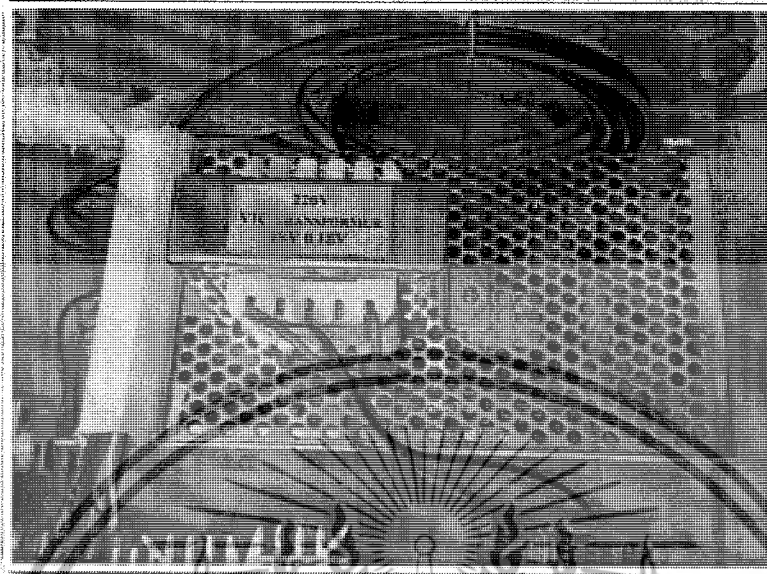


ภาพที่ 4.20 แสดงโฟเทนซิโอมิเตอร์

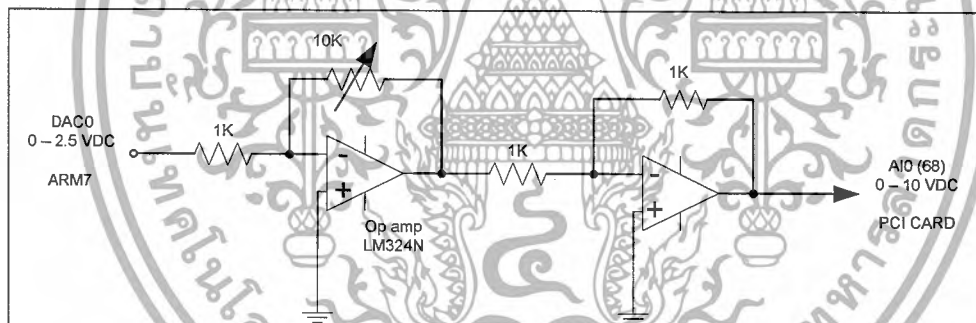
โฟเทนซิโอมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่เชิงมุมชนิดหนึ่งในโครงการนี้นำมา วัดตำแหน่งเชิงมุมของแผ่นเพลทมีหลักการทำงาน คือเมื่อแผ่นเพลทเกิดการเคลื่อนที่แกนที่ยึดติดกับ ตัวของโฟเทนซิโอมิเตอร์จะเคลื่อนที่ตามด้วยทำให้ค่าความต้านทานภายในเกิดเปลี่ยนแปลง เมื่อจ่าย แรงดันไฟตรงเข้าที่ขา 1,3 ทำให้แรงดัน Signal ที่ขา 2 เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรง กับการเคลื่อนที่ของแผ่นเพลทสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณ PV มาจากอุปกรณ์การวัดโฟเทนซิโอมิเตอร์ที่ใช้เป็น ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ 10 รอบ 50 Kohm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

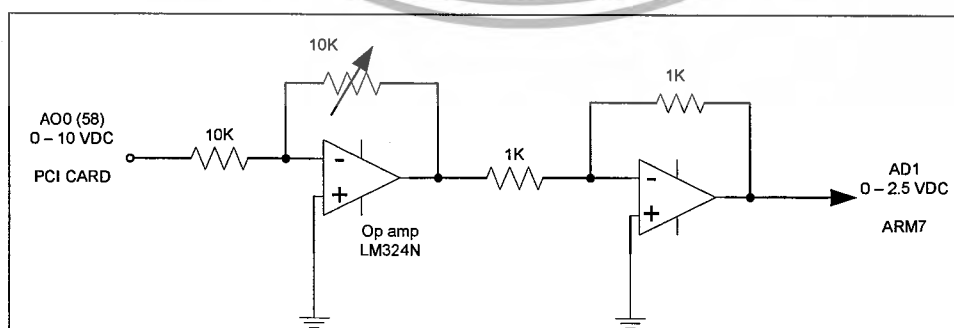
4.1.3.5 พาวเวอร์ซัพพลายและวงจร Signal conditioning



ภาพที่ 4.21 พาวเวอร์ซัพพลาย 12 Vdc

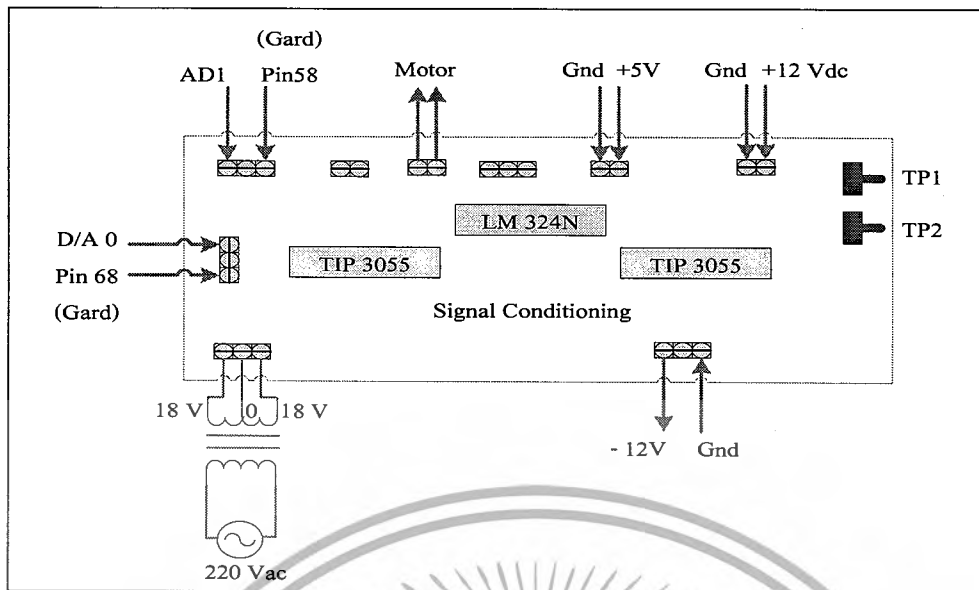


ภาพที่ 4.22 วงจรขยายสัญญาณ PV เข้าตัวควบคุม



ภาพที่ 4.23 วงจรลดทอนสัญญาณ MV เข้าสู่ตัวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.24 แสดงบอร์ด Signal Conditioning

พาวเวอร์ซัพพลายเป็นแบบสวิทช์ที่ใช้ Input Signal 220 Ac Output Signal 12Vdc 12 Amp Model S-145-12 ใช้สำหรับ บอร์ด ARM7 และในการ ควบคุมมอเตอร์จะต้องอาศัยวงจร Signal Conditioning Signal Conditioning เป็นวงจรสำหรับปรับสภาพสัญญาณเพื่อให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้ต่อรวมประกอบด้วยวงจรออปแอมป์ต่อแบบ Inverting และอนุกรมกับ Inverting อีกชุดหนึ่งเพื่อกลับเฟสทำให้แรงดันอยู่ทางด้านบวก ภาพที่ 4.22 เป็นวงจรขยายสัญญาณ PV ก่อนที่เข้า Card PCI1711 ส่วนภาพที่ 4.23 เป็นวงจรลดทอนสัญญาณก่อนที่จะเข้าบอร์ด ARM7

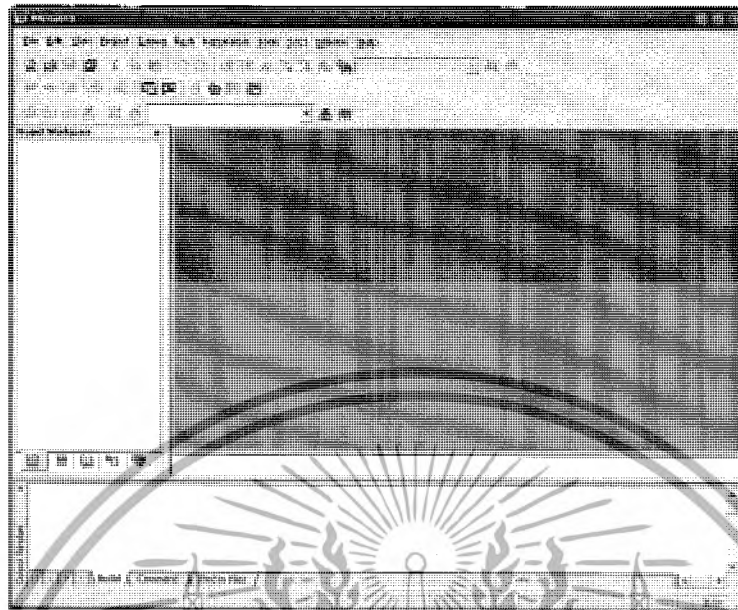
4.2 ซอร์ฟแวร์

4.2.1 โปรแกรม Keil uVision 3

การเขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษาแอสเซมบลีมีให้การทำงานที่รวดเร็วดีแต่กว่าจะเขียนได้ในแต่ละโปรแกรม นั้นค่อนข้างยุ่งยากอีกทั้งยังไม่สามารถเขียนภาษาแอสเซมบลีในระบบใหญ่ ๆ ได้อีกด้วยเมื่อศึกษาแล้วมีโปรแกรมที่ช่วยแปลงภาษา C เป็น HEX code ได้เลย โปรแกรมที่เวลานี้คือ Keil uVision 3 อีกเหตุผลที่เลือกเขียนภาษา C เนื่องจากเป็นภาษาที่เข้าใจได้ง่ายแก้ไขได้สะดวกขั้นตอนในการใช้งาน โปรแกรม Keil uVision 3 สรุปพอสังเขปได้ดังนี้

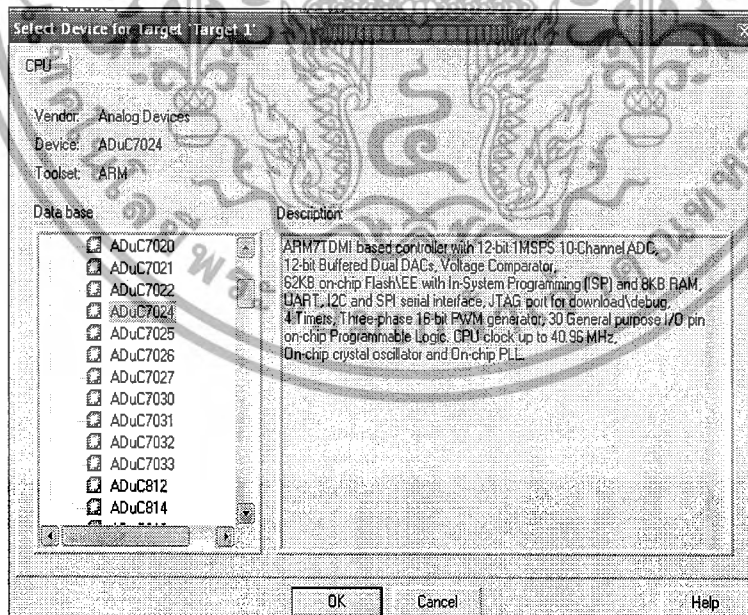
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปิดโปรแกรม Keil uVision 3,



ภาพที่ 4.25 การเปิดโปรแกรม u Vision3

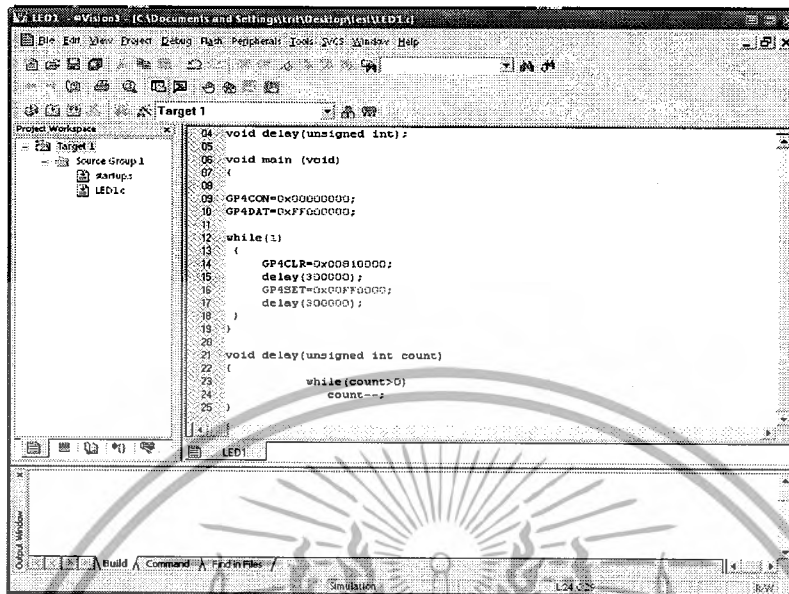
- สร้างไฟล์โปรเจกต์และเลือก ARM7 เบอร์ ADuC7024



ภาพที่ 4.26 การสร้างไฟล์โปรเจกต์และเลือก ARM7 เบอร์ ADuC7024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เขียน source code และเพิ่มเข้าไปใน source file ของโปรเจก



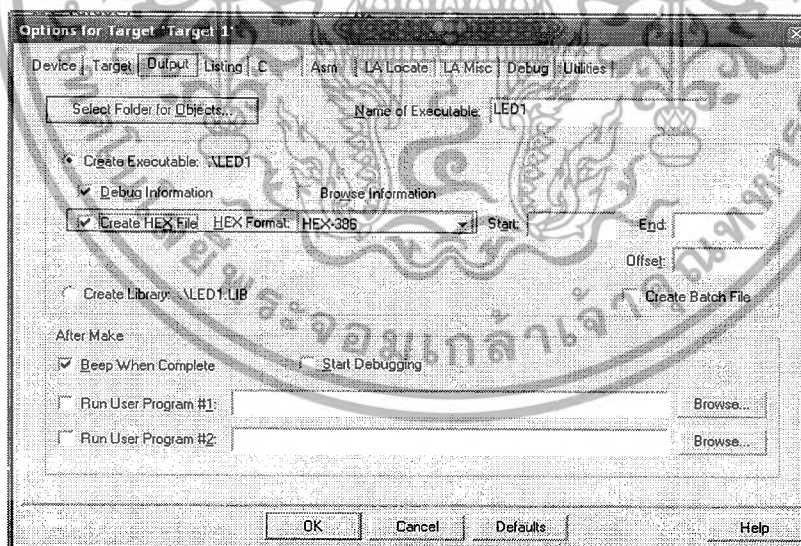
```

04 void delay(unsigned int);
05
06 void main (void)
07 {
08
09   GP4CON=0x00000000;
10   GP4DAT=0xFF000000;
11
12   while(1)
13   {
14     GP4CLR=0x00010000;
15     delay(30000);
16     GP4SET=0x000FF000;
17     delay(30000);
18   }
19 }
20
21 void delay(unsigned int count)
22 {
23   while(count>0)
24     count--;
25 }

```

ภาพที่ 4.27 การเขียน source code และเพิ่มเข้าไปใน source file

- สร้างโปรเจกและ HEX ไฟล์สำหรับ PROM



ภาพที่ 4.28 การสร้างโปรเจกและ HEX ไฟล์สำหรับ PROM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 Matlab & Simulink

การสร้างตัวคอนโทรลเลอร์โดยจะมีการประยุกต์งาน Real Time Windows Target ร่วมกับ Simulink และ Interface กับการ์ด PCI 1711 มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

4.2.2.1 การติดตั้งโปรแกรมเมื่อต้องการใช้งาน Real Time Windows Target

Simulink external model interface

ในหน้าต่าง MATLAB พิมพ์

```
>> mex -setup
```

Matlab แสดงข้อความ

Please choose your compiler for building external interface (MEX) files:

Would you like mex to locate installed compilers [y]/n?

พิมพ์ y

Matlab แสดงข้อความ

Select a compiler:

[1] Lcc-win32 C 2.4.1 in C:\PROGRA~1\MATLAB\R2007a\sys\lcc

[2] Microsoft Visual C++ 2005 in C:\Program Files\Microsoft Visual Studio 8

[3] Microsoft Visual C++ 6.0 in C:\Program Files\Microsoft Visual Studio

[0] None

เลือก compiler พิมพ์

Compiler: 2

Matlab แสดงข้อความ

Please verify your choices:

Compiler: Microsoft Visual C++ 2005

Location: C:\Program Files\Microsoft Visual Studio 8

Are these correct?([y]/n):

พิมพ์ y

Matlab แสดงข้อความ

Trying to update options file: C:\Documents and Settings\xp\Application

Data\MathWorks\MATLAB\R2007a\mexopts.bat

From template:

C:\PROGRA~1\MATLAB\R2007a\bin\win32\mexopts\msvc80opts.bat

Done . . .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Real Time Windows Target Kernel

ในหน้าต่าง Matlab พิมพ์

```
>> rtwintgt -install
```

Matlab แสดงข้อความ

You are going to install the Real-Time Windows Target kernel.

Do you want to proceed? [y] :

พิมพ์ y

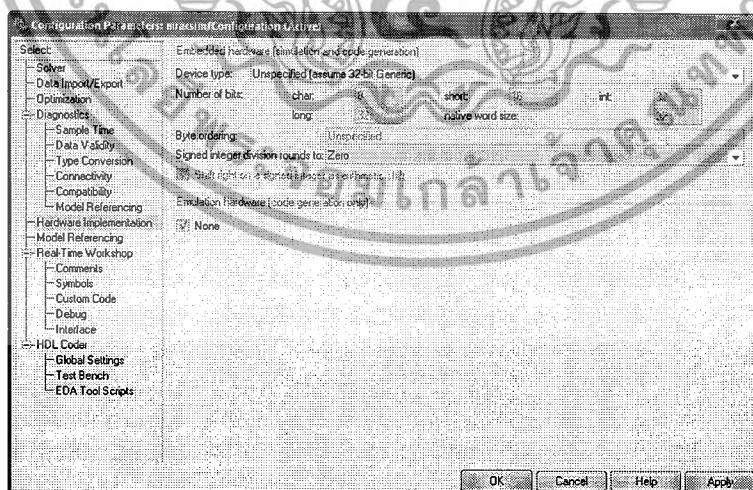
Matlab แสดงข้อความ

The Real-Time Windows Target kernel has been successfully installed.

4.2.2.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ใน Simulink สำหรับ Real Time Workshop

หลังจากที่สร้าง Simulink Model จะต้องกำหนดพารามิเตอร์ในหน้าต่าง Simulink เพื่อให้ Real-Time Workshop สามารถสร้าง Code ภาษา C และสร้าง Real-Time Application ได้ขั้นตอนคือ

- ในหน้าต่าง Simulink ไปที่ Simulation เมนู คลิกที่ Configuration Parameters
- คลิกที่หมวดของ Hardware Implementation
- จากรายการ Device Type เลือก 32-bit Real Time Windows Target
- Emulation hardware เลือก None
- คลิกที่หมวด Real Time Workshop



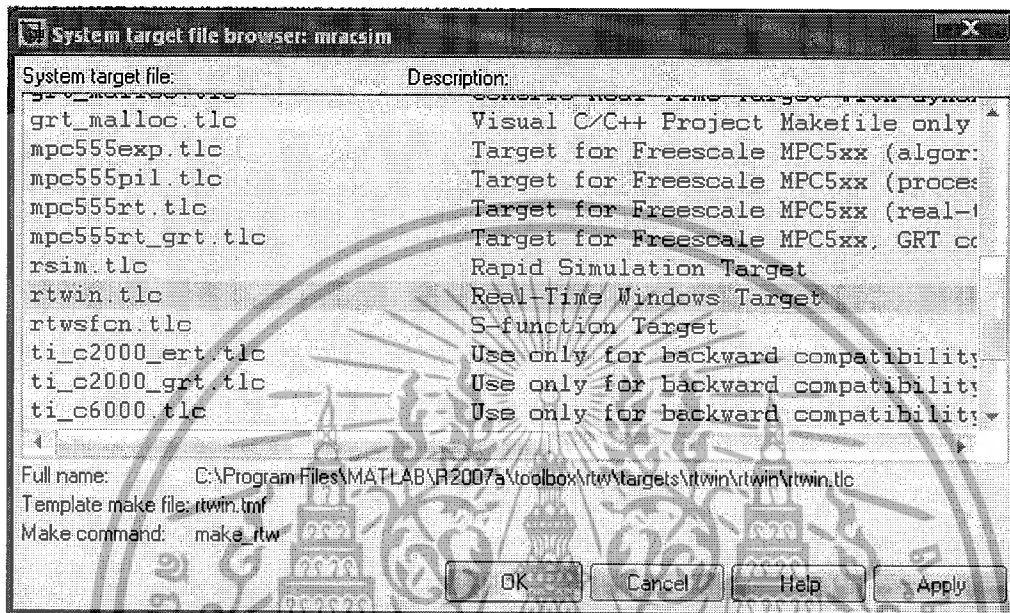
ภาพที่ 4.29 Hardware Implementation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Target selection คลิก Browse ที่รายการ RTW system target file เลือก system target file

- สำหรับ Real Time Windows Target และคลิก Ok

- คลิก Ok เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลงและปิด Dialog box



ภาพที่ 4.30 RTW System Target File

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงการปรับระดับของสัญญาณ MV

STEP INPUT Volt	CARD AO(58) Volt	AD1 Volt
0	0	0
1	0.99	0.25
2	1.98	0.5
3	2.97	0.75
4	3.95	0.99
5	4.94	1.25
6	5.95	1.49
7	6.94	1.75
8	7.95	1.99
9	8.95	2.24
10	9.96	2.49

จากตารางที่ 5.1 แสดงการจ่ายแรงดันจากคอนโทรลเลอร์ 0-10V แล้ว Interface กับการ์ด PCI1711 จ่ายแรงดันออกมาที่ขา 68 หลังจากนั้นสัญญาณจะผ่านวงจรลดทอนสัญญาณดังภาพที่ 4.1 เพื่อปรับระดับแรงดันลงเหลือ 0-2.5V จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การปรับระดับของสัญญาณ มีความเป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงการปรับระดับของสัญญาณ PV76

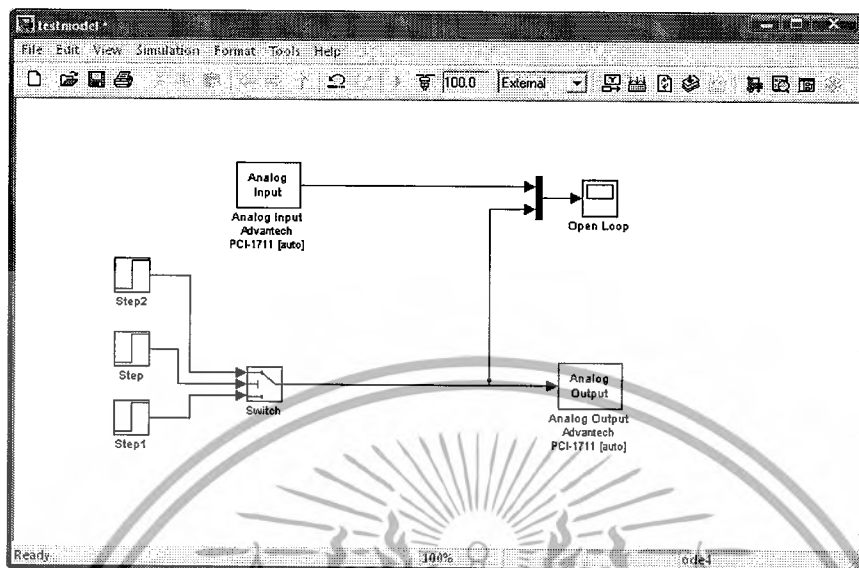
Degree(θ)	AD1	DA0	CARAD AI0(68)
0	1.013 V	0 V	0 V
10	1.032 V	0.1979 V	1.27 V
20	1.050 V	0.572 V	2.372 V
30	1.066 V	0.86 V	3.46 V
40	1.085 V	1.15 V	4.64 V
50	1.101 V	1.40 V	5.65 V
60	1.120 V	1.71 V	6.78 V
80	1.155 V	2.25 V	9.11 V
90	1.171 V	2.48 V	9.94 V

จากตารางที่ 5.2 แสดงข้อมูลสัญญาณแรงดันที่สัมพันธ์กันสามสัญญาณดังนี้

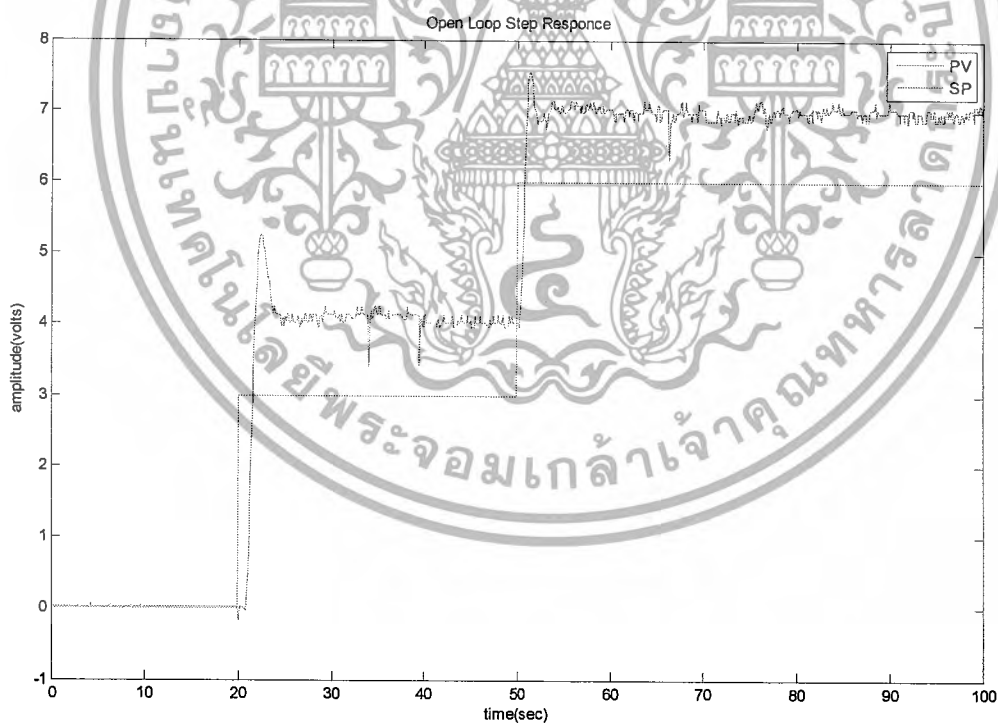
- AD1 เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากโพเทนชิโอมิเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแผ่นผลท
- DA0 เป็นสัญญาณ D2A ที่ได้มาจากคอนโทรลเลอร์โดยการใช้ Software Calibrate โดยแปลงสัญญาณ AD1 จาก 0-90 องศา เป็น 0-2.5V
- AI0 (68) เมื่อ DA0 จ่ายแรงดันไฟฟ้า 0-2.5V สัญญาณไฟฟ้านี้จะเข้าวงจรภาพที่ 4.1 เพื่อปรับระดับสัญญาณให้สูงขึ้นเป็น 0-10V เพื่อที่จะนำสัญญาณป้อนกลับเข้าไปที่คอนโทรลเลอร์ที่ขา AI0(68)ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 Modelling



ภาพที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบเปิด

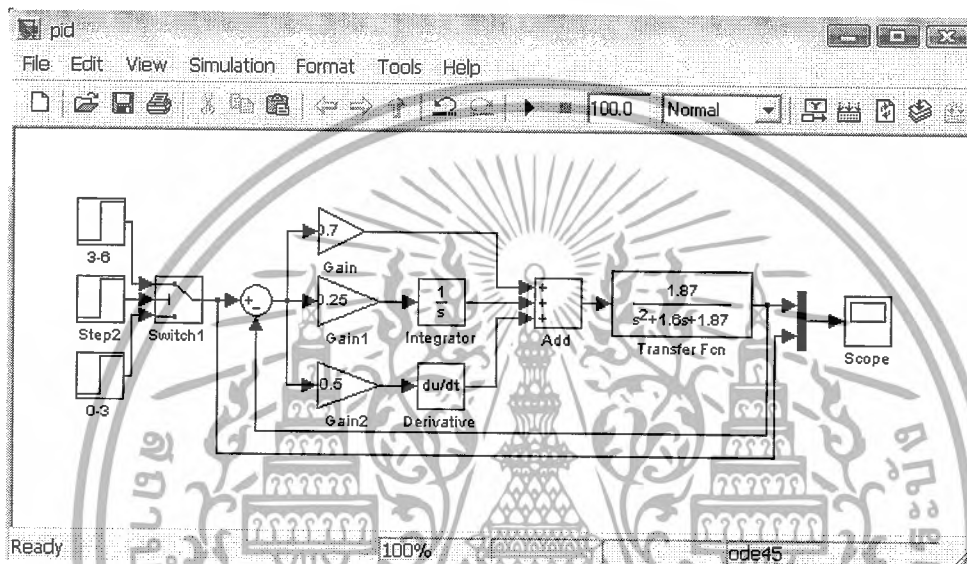


ภาพที่ 5.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

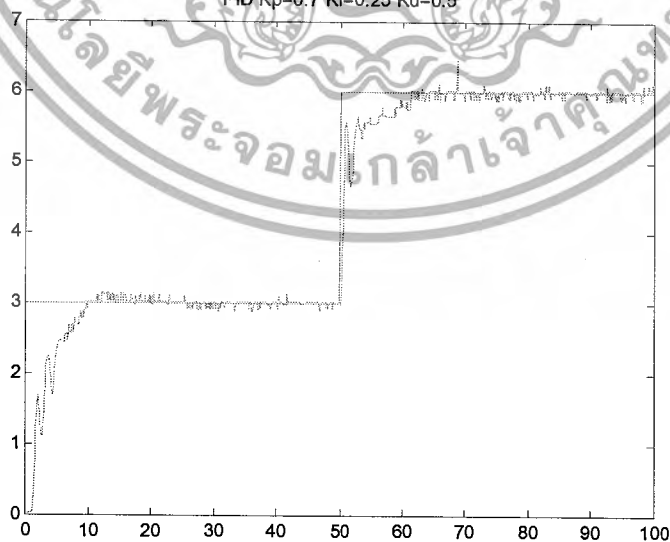
ภาพที่ 5.1 เป็นบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบเปิดและเป็นการจำลองระบบควบคุมเพื่อหาค่าของทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของกระบวนการ โดยจะจ่ายสัญญาณเป็นแบบ Unit Step จะได้ผลการทดลองออกมาแสดงเป็นกราฟดังภาพที่ 5.2 เราจะนำผลตอบสนองช่วงเปลี่ยนเสด็บจาก 3-6 มาพิจารณาหาทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของกระบวนการต่อไป

5.2 PID Control



ภาพที่ 5.3 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดี

PID Kp=0.7 Ki=0.25 Kd=0.5

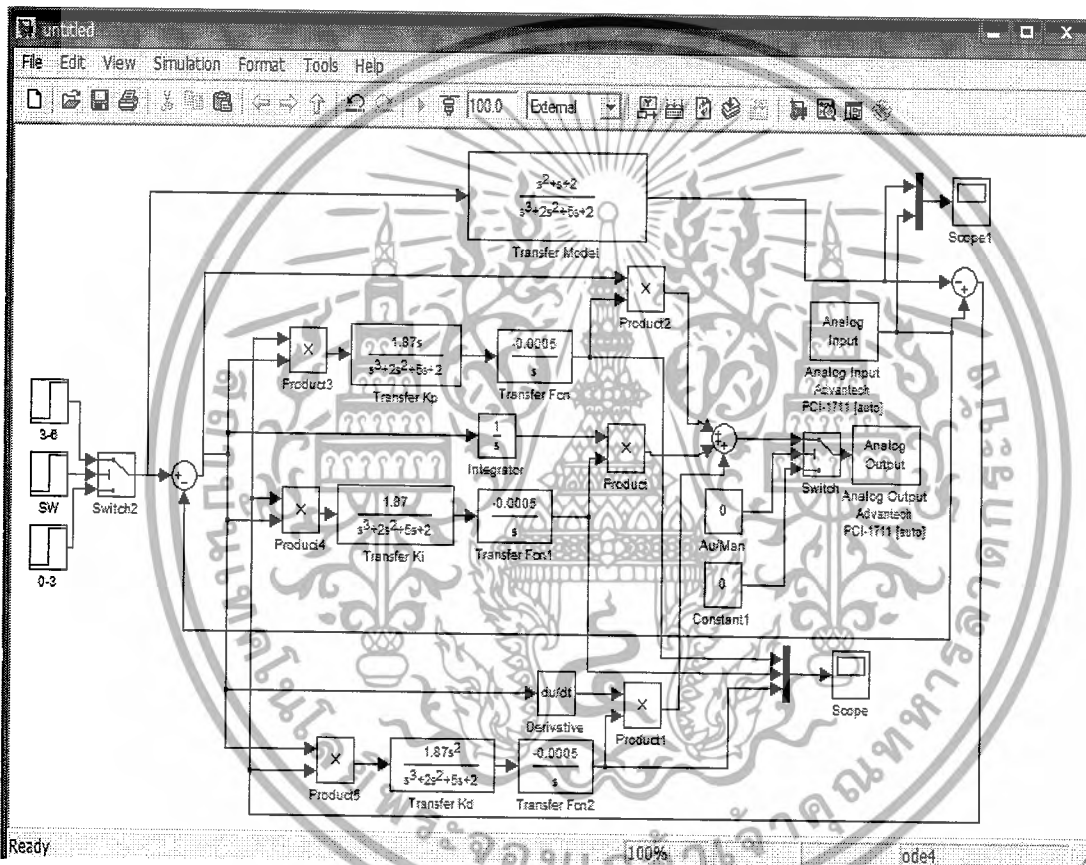


ภาพที่ 5.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ค่า Kp = 0.7, Ki = 0.25, Kd = 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

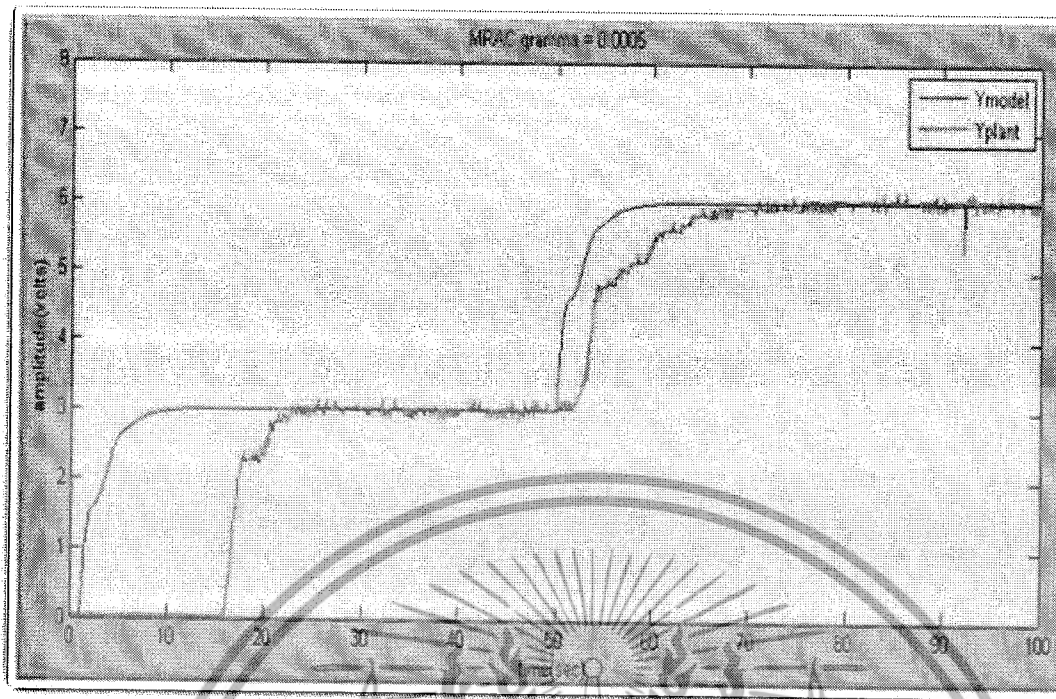
จากภาพที่ 5.3 เป็นบล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากส่วนโปรแกรมย่อย SISO TOOL ใน MATLAB แล้วก็จะคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์จากสมการพีไอดีหลังจากได้ค่าพารามิเตอร์มาเป็นดังนี้ $K_p = 0.7$, $K_i = 0.25$, $K_d = 0.5$ ส่วนภาพที่ 5.4 นั้นเป็นผลตอบสนองต่อกระบวนการ ของตัวคอนโทรลเลอร์แบบพีไอดี เมื่อจ่ายอินพุทแบบ Unit Step

5.3 MRAC

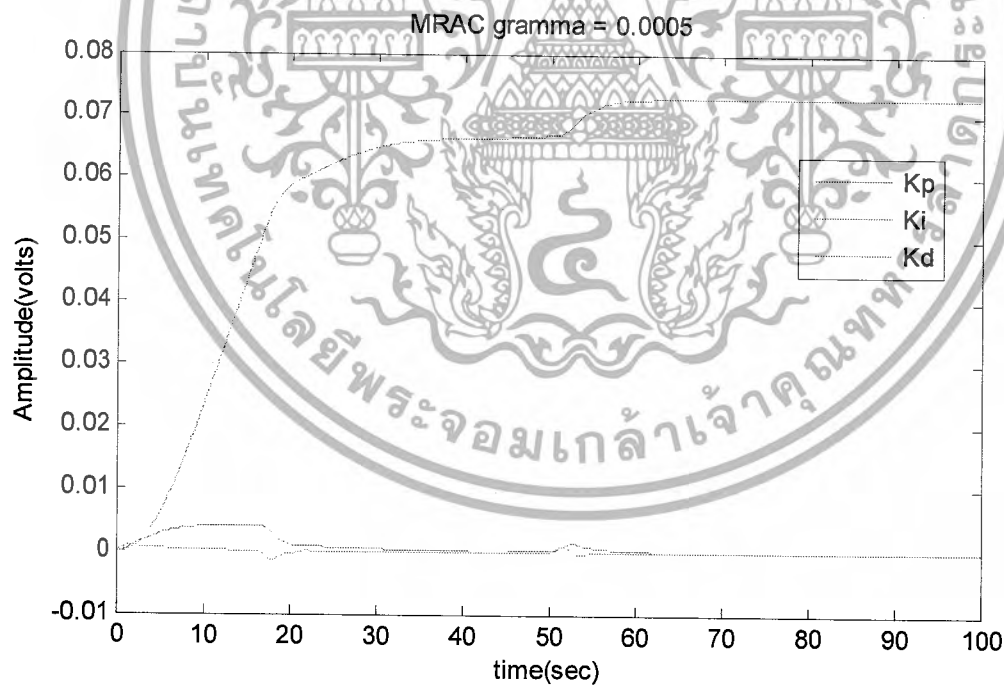


ภาพที่ 5.5 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบ MRAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

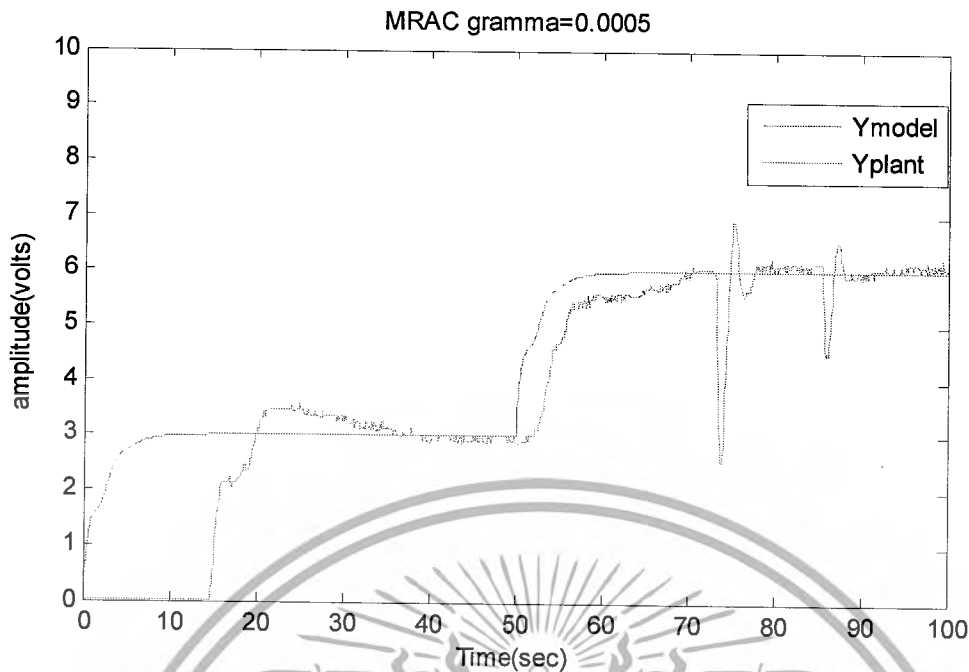


ภาพที่ 5.6 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ MRAC ที่ $\text{gamma} = 0.0005$



ภาพที่ 5.7 กราฟแสดงพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ MRAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.8 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ MRAC ที่ $\text{gamma} = 0.0005$ เมื่อมีสิ่งรบกวนภายนอก

จากภาพที่ 5.5 เป็นการจำลอง ตัวคอนโทรลเลอร์แบบ MRAC โดยเลือกค่าเกนของระบบควบคุมเป็น 0.0005 ซึ่งผลตอบสนองของตัวควบคุมต่อกระบวนการเป็นไปดังภาพที่ 5.6 สามารถพิจารณาได้ว่าในช่วงเสถียรแรกการปรับค่าพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์จะค่อย ๆ ปรับตัวเพื่อให้กระบวนการเข้าสู่รูปแบบต่อจากนั้น เมื่อเสถียรที่สองการปรับตัวของคอนโทรลเลอร์จะเร็วกว่าเดิม ภาพที่ 5.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวควบคุมแบบ MRAC ซึ่งค่าพารามิเตอร์ประกอบไปด้วย K_p , K_i , K_d ตามลำดับส่วนภาพที่ 5.8 เป็นผลตอบสนองของตัวควบคุมเมื่อเกิดสิ่งรบกวนจากภายนอกจากกราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้เมื่อมีสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบก็จะมีความสามารถในการทำให้กระบวนการเข้าสู่รูปแบบอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว

การทดลองของโครงการนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือการหาสมการของแพลนท์จากกราฟทดสอบตัวควบคุมแบบ PID ทดสอบตัวควบคุมแบบ MRAC จากผลการทดลองทำให้ทราบถึงข้อดีของตัวควบคุมแบบ MRAC คือ

ตัวควบคุมแบบ MRAC ไม่ต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์สามารถออกแบบผลตอบสนองของเอาต์พุตแพลนท์ได้

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 สรุป

ในการทดลองการออกแบบตัวควบคุมอ้างอิงโมเดลแบบปรับตัวเองได้ สามารถนำเอาทฤษฎีของ MIT มาออกแบบและสามารถนำไปควบคุมกระบวนการได้ตามวัตถุประสงค์ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น การจำลองโปรแกรม Simulink และทดลองควบคุมกระบวนการจริง นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบระหว่างการออกแบบตัวควบคุมอ้างอิงโมเดลแบบปรับตัวเอง ได้กับตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีทางเดินราก (Root locus) ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นที่น่าพอใจ การทดลองนี้ได้ทำการทดลองควบคุมตำแหน่งของแผ่นเพลทที่ตำแหน่ง 35° และที่ 55° ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามรูปของการแสดงผลการทดลองในบทที่ 5 ข้อดีของตัวควบคุมอ้างอิงโมเดลแบบปรับตัวเองได้คือ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะปรับตัวเองอัตโนมัติตามโครงสร้างของโมเดลอ้างอิง

กระบวนการที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้เลือกใช้กระบวนการพัลลิมและแผ่นเพลทซึ่งจัดเป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง การหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบใช้วิธีของกราฟซึ่งได้กระบวนการเป็นระบบอันดับสอง ส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของกระบวนการคือการนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 มาช่วยในการรับส่งสัญญาณ A/D และ D/A จากการ์ดของ Advantech ซึ่งสามารถเป็นโปรแกรมควบคุมได้

6.2 ปัญหาและอุปสรรค

ห้องปฏิบัติการจะมีผลต่อการควบคุมกระบวนการพัลลิมและแผ่นเพลทดังนั้นห้องจะต้องมีขนาดกว้างพอสมควรจุดวางชุดทดลองควรห่างจากผนังห้องอย่างน้อย 5 เมตร เนื่องจากถ้าอยู่ใกล้ผนังห้องแรงลมที่ไปกระทบที่ผนังห้องจะทำให้กินลมสะท้อนกลับมา ซึ่งจะเป็นตัวรบกวนระบบอยู่ตลอดเวลาทำให้ระบบไม่สามารถเข้าสู่ Set Point ได้

6.3 ข้อเสนอแนะ

สำหรับนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมควรนำตัวคอนโทรลเลอร์ MRAC ที่ได้ออกแบบใน Simulink ไปเขียนอยู่บนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานรวมถึงการสร้างเป็นชุดคอนโทรลเลอร์ ทำให้เป็นสินค้าในเชิงพาณิชย์ได้

บรรณานุกรม

- User Manual. PCI 1711 Series.Adventech
- <http://www.pages.drexel.edu/~kws23/tutorials/MRAC/theory/theory.html>
- <http://www.es.co.th> เป็นเว็บไซต์ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ Arm 7 (ADuC7024)



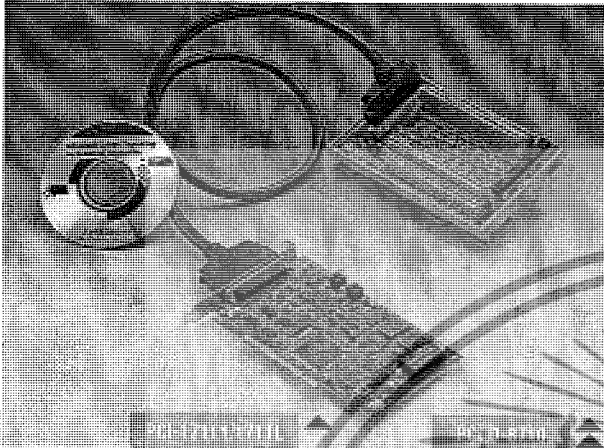
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PCI-1711/1711L

**100 KS/s, 12-bit, 16-ch
S.E. Inputs Low-cost
Multifunction Card**



Features

- 16 single-ended analog inputs
- 12-bit A/D converter, with up to 100 kHz sampling rate
- Programmable gain for each input channel
- Automatic channel/gain scanning
- On-board 1K samples FIFO buffer
- Two 12-bit analog output channels (Only for PCI-1711)
- 16 digital inputs and 16 digital outputs
- Programmable pacer/counter

Introduction

The PCI-1711/1711L is a powerful but low-cost multifunction card for the PCI bus. The PCI-1711 comes with 2 analog output channels, while the PCI-1711L doesn't. Thus, you can choose between PCI-1711 and PCI-1711L according to what you really need for your application, with no extra costs.

Specifications

Analog Input

- Channels 16 Single-Ended
- Resolution 12-bit
- FIFO Size 1K samples
- Sampling Rate* 100 KS/s max.
- Conversion Time 10 μ s

Input range and Gain List	Gain	1	2	4	8	16
Input	± 10 V	± 5 V	± 2.5 V	± 1.25 V	± 0.625 V	
Drift (ppm/ $^{\circ}$ C)	Gain	1	2	4	8	16
	Zero	15	15	15	15	15
	Gain	25	25	25	30	40
Small Signal Bandwidth for PGA	Gain	1	2	4	8	16
	Bandwidth	4.0 MHz	2.0 MHz	1.5 MHz	0.65 MHz	0.35 MHz

- Max. Input Overvoltage 10 μ s
- Input Protect 30 Vp-p
- Input Impedance 2 M Ω /5 pF
- Trigger Mode Software, On-board Programmable Pacer or external

Accuracy	DC	INLE: ± 0.5 LSB
		Monotonicity: 12 bits
AC		Offset error: Adjustable to zero
		Gain error: 0.005% FSR (Gain=1)
		SNR: 68 dB
		ENOB: 11 bits

Programmable Counter / Timer

- Channels 1
- Resolution 16-bit
- Compatibility TTL level
- Base Clock 10 MHz
- Max. Input Frequency 10 MHz

Note:

The sampling rate and throughput depends on the computer hardware architecture and software environment. The rates may vary due to programming language, code efficiency, CPU utilization and so on.

Analog Output (only for PCI-1711)

- Channels 2
- Resolution 12-bit

Output Range (Internal & External Reference)	Internal Reference	0 ~ +5 V, 0 ~ +10 V
	External Reference	0 ~ +x V @ -x V (-10 \leq x \leq 10)
Accuracy	Relative	$\pm 1/2$ LSB
	Differential Non-linearity	$\pm 1/2$ LSB

- Gain Error Adjustable to zero
- Slew Rate 11 V/ μ s
- Drift 40 ppm/ $^{\circ}$ C
- Driving Capability 3 mA
- Throughput 38 KS/s (min.)
- Output Impedance 0.81 W
- Settling Time 26 μ s (to $\pm 1/2$ LSB of FSR)
- Reference Voltage Internal -5 or -10 V
External -10 or +10 V

Digital Input / Output

Input Channels	16	
Input Voltage	Low	0.8 V max.
	High	2.0 V max.
Output Channels	16	
Output Voltage	Low	0.8 V max. @ 0.8 mA (sink)
	High	2.0 V min. @ -0.4 mA (source)

General

I/O Connector Type	68-pin SCSI-II female	
Dimensions	175 mm x 100 mm (6.9" x 3.9")	
Power Consumption	typical	PCI-1711 +5 V @ 850 mA PCI-1711L +5 V @ 700 mA
	Max.	+5 V @ 1.0 A
Temperature	Operation	0 ~ +60 $^{\circ}$ C (32 ~ 140 $^{\circ}$ F) (refer to IEC 68-2-1, 2)
	Storage	-20 ~ +70 $^{\circ}$ C (-4 ~ 158 $^{\circ}$ F)
Relative Humidity	5% ~ 95% RH non-condensing (refer to IEC 68-2-3)	

Ordering Information

- **PCI-1711** 100 KS/s, 12-bit, 16-ch S.E. inputs Low-cost Multifunction Card, user's manual and driver CD-ROM. (cable not included)
- **PCI-1711L** 100 KS/s, 12-bit, 16-ch S.E. inputs Low-cost Multifunction Card w/o analog output, user's manual and driver CD-ROM. (cable not included)
- **PCLD-8710** Industrial Wiring Terminal Board with CJC circuit for DIN-rail mounting (cable not included)
- **PCL-10168** 68-pin SCSI-II cable with male connectors on both ends and special shielding for noise reduction, 1 and 2 m
- **ADAM-3968** 68-pin SCSI-II Wiring Terminal Board for DIN-rail Mounting

Pin Assignments

AI0	68	34	AI1
AI2	67	33	AI3
AI4	66	32	AI5
AI6	65	31	AI7
AI8	64	30	AI9
AI10	63	29	AI11
AI12	62	28	AI13
AI14	61	27	AI15
AIGND	60	26	AIGND
AOD_REF	59	25	AOI_REF
AOD_OUT	58	24	AOI_OUT
AOGND	57	23	AOGND
DI0	56	22	DI1
DI2	55	21	DI3
DI4	54	20	DI5
DI6	53	19	DI7
DI8	52	18	DI9
DI10	51	17	DI11
DI12	50	16	DI13
DI14	49	15	DI15
DGND	48	14	DGND
DO0	47	13	DO1
DO2	46	12	DO3
DO4	45	11	DO5
DO6	44	10	DO7
DO8	43	9	DO9
DO10	42	8	DO11
DO12	41	7	DO13
DO14	40	6	DO15
DGND	39	5	DGND
CNT0 CLK	38	4	PACER OUT
CNT0 OUT	37	3	TRG GATE
CNT0 GATE	36	2	EXT TRG
+12V	35	1	+5V

*: Pins 23-25 and pins 57-59 are not defined for PCI-1711L

Feature Details

Plug-and-play Function

The PCI-1711/1711L fully complies with the PCI Specification Rev 2.1, and thus is a Plug-and-Play device. During card installation, it is virtually unnecessary to set any jumpers or DIP switches. Instead, all bus-related configurations such as base I/O address and interrupts are conveniently taken care of by the Plug-and-Play function.

Flexible Input Types and Range Settings

The PCI-1711/1711L features an automatic channel/gain scanning circuit. This circuit design controls multiplexer switching during sampling. You can set different gain values for each channel according to your needs for the corresponding range of input voltages. The gain values thus selected are stored in the SRAM. This flexible design enables multi-channel and high-speed sampling for high-performance data acquisition (up to 100 KS/s).

Onboard FIFO Memory

The PCI-1711/1711L provides an onboard FIFO (First In First Out) memory buffer, storing up to 1 K/A/D samplings. You can either enable or disable the interrupt request feature of the FIFO buffer. While the interrupt request for FIFO is enabled, you can further specify whether the interrupt request will be sent whenever one sampling takes place or when the FIFO buffer is half saturated. This feature enables a continuous high-speed data transfer with more predictable performance on Windows systems.

Onboard Programmable Counter

The PCI-1711/1711L is equipped with a programmable counter, which can serve as a pacer trigger for A/D conversions. The counter chip is an 82C54 or equivalent, which incorporates three 16-bit counters on a 10 MHz clock. One of the three counters is used as an event counter for input channels. The other two are cascaded into a 32-bit timer for pacer triggering.

Applications

- Process monitoring and control
- Transducer and sensor measurement
- Multi-channel DC voltage measurement





TIP2955
TIP3055

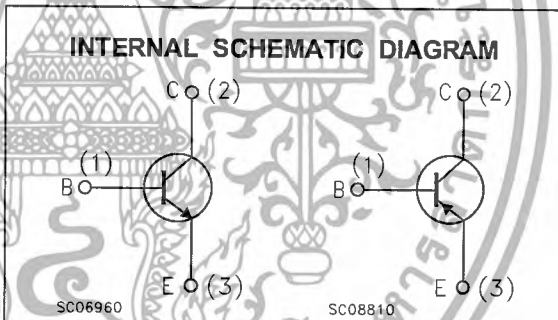
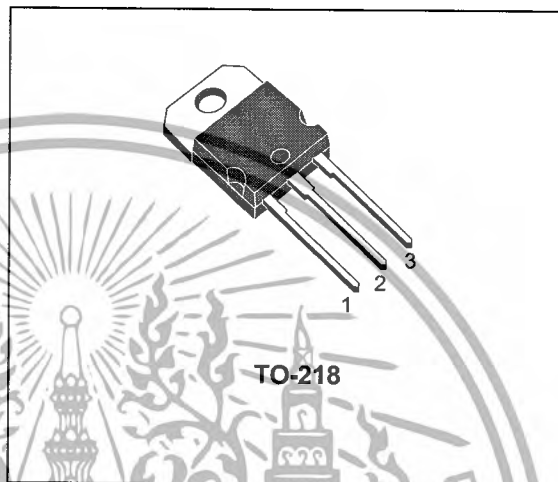
COMPLEMENTARY SILICON POWER TRANSISTORS

- STMicroelectronics PREFERRED SALESTYPES
- COMPLEMENTARY PNP - NPN DEVICES

DESCRIPTION

The TIP3055 is a silicon Epitaxial-Base Planar NPN transistor mounted in TO-218 plastic package. It is intended for power switching circuits, series and shunt regulators, output stages and hi-fi amplifiers.

The complementary PNP type is the TIP2955.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value		Unit
		PNP	TIP2955	
		NPN	TIP3055	
V_{CBO}	Collector-Base Voltage ($I_E = 0$)		100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage ($I_B = 0$)		60	V
I_C	Collector Current		15	A
I_B	Base Current		7	A
P_{tot}	Total Dissipation at $T_c \leq 25^\circ\text{C}$		90	W
T_{stg}	Storage Temperature		-65 to 150	$^\circ\text{C}$
T_j	Max. Operating Junction Temperature		150	$^\circ\text{C}$

For PNP types voltage and current are negative.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TIP2955/TIP3055

THERMAL DATA

$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max	1.4	$^{\circ}C/W$
----------------	----------------------------------	-----	-----	---------------

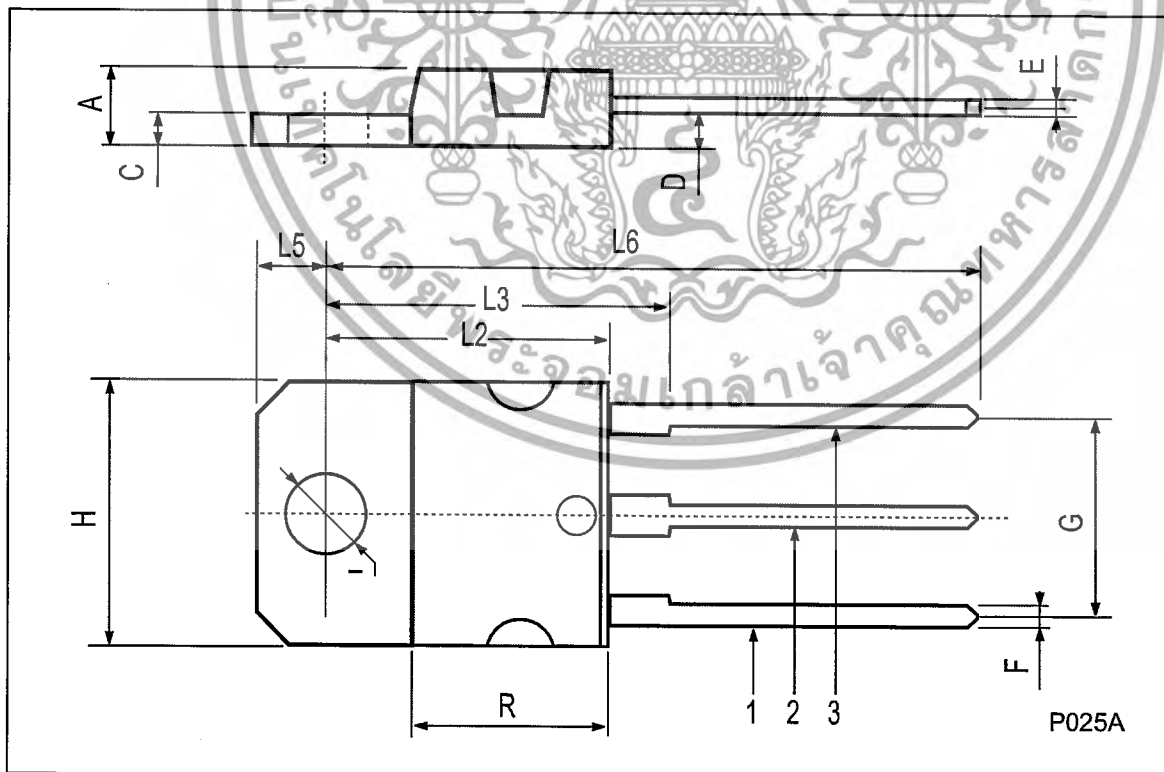
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{case} = 25^{\circ}C$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{CEX}	Collector Cut-off Current ($V_{BE} = -1.5V$)	$V_{CE} = 100 V$ $V_{CE} = 100 V$ $T_J = 150^{\circ}C$			1 5	mA mA
I_{CEO}	Collector Cut-off Current ($I_B = 0$)	$V_{CE} = 30 V$			0.7	mA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current ($I_C = 0$)	$V_{EB} = 7 V$			5	mA
$V_{CE(sus)}^*$	Collector-Emitter Sustaining Voltage ($I_B = 0$)	$I_C = 30 mA$	60			V
$V_{CE(sat)}^*$	Collector-emitter Saturation Voltage	$I_C = 4 A$ $I_B = 0.4 A$ $I_C = 10 A$ $I_B = 3.3 A$			1 3	V V
V_{BE}^*	Base-emitter Voltage	$I_C = 4 A$ $V_{CE} = 4 V$			1.8	V
h_{FE}^*	DC Current Gain	$I_C = 4 A$ $V_{CE} = 4 V$ $I_C = 10 A$ $V_{CE} = 4 V$	20 5		70	
h_{fe}	Small Signal Current Gain	$I_C = 1 A$ $V_{CE} = 10 V$ $f = 1 KHz$	15			
f_T	Transition-Frequency	$I_C = 0.5 A$ $V_{CE} = 10 V$ $f = 1 MHz$	3			MHz
t_{on} t_{off}	RESISTIVE LOAD Turn-on Time Turn-off Time	$I_C = 6 A$ $I_{B1} = - I_{B2} = 0.6 A$ $R_L = 5 \Omega$ $V_{BE(off)} = -4 V$			0.5 0.9	μs μs

* Pulsed: Pulse duration = 300 μs , duty cycle 1.5 %
For PNP type, voltage and current value are negative.

TO-218 (SOT-93) MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.7		4.9	0.185		0.193
C	1.17		1.37	0.046		0.054
D		2.5			0.098	
E	0.5		0.78	0.019		0.030
F	1.1		1.3	0.043		0.051
G	10.8		11.1	0.425		0.437
H	14.7		15.2	0.578		0.598
L2	-		16.2	-		0.637
L3		18			0.708	
L5	3.95		4.15	0.155		0.163
L6		31			1.220	
R	-		12.2	-		0.480
Ø	4		4.1	0.157		0.161



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/ SA534/LM2902

DESCRIPTION

The LM124/SA534/LM2902 series consists of four independent, high-gain, internally frequency-compensated operational amplifiers designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages.

UNIQUE FEATURES

In the linear mode, the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.

The unity gain crossover frequency and the input bias current are temperature-compensated.

FEATURES

- Internally frequency-compensated for unity gain
- Large DC voltage gain: 100dB
- Wide bandwidth (unity gain): 1MHz (temperature-compensated)
- Wide power supply range Single supply: $3V_{DC}$ to $30V_{DC}$ or dual supplies: $\pm 1.5V_{DC}$ to $\pm 15V_{DC}$
- Very low supply current drain: essentially independent of supply voltage (1mW/op amp at $+5V_{DC}$)
- Low input biasing current: $45nA_{DC}$ (temperature-compensated)
- Low input offset voltage: $2mV_{DC}$ and offset current: $5nA_{DC}$
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage: $0V_{DC}$ to $V_{CC}-1.5V_{DC}$ swing

PIN CONFIGURATION

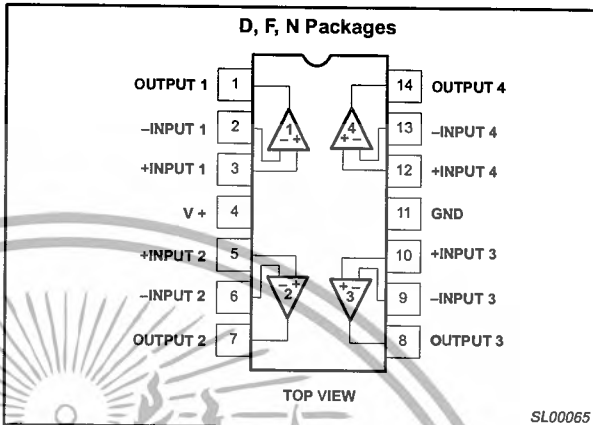


Figure 1. Pin Configuration

ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	LM124N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	LM124F	0581B
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-25°C to +85°C	LM224N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-25°C to +85°C	LM224F	0581B
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-25°C to +85°C	LM224D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0°C to +70°C	LM324N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0°C to +70°C	LM324F	0581B
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0°C to +70°C	LM324D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0°C to +70°C	LM324AN	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0°C to +70°C	LM324AD	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +85°C	SA534N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-40°C to +85°C	SA534F	0581B
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +85°C	SA534D	SOT108-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +125°C	LM2902D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +125°C	LM2902N	SOT27-1

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SYMBOL	PARAMETER	RATING	UNIT
V_{CC}	Supply voltage	32 or ± 16	V_{DC}
V_{IN}	Differential input voltage	32	V_{DC}
V_{IN}	Input voltage	-0.3 to +32	V_{DC}
P_D	Maximum power dissipation, $T_A=25^\circ\text{C}$ (still-air) ¹		
	N package	1420	mW
	F package	1190	mW
	D package	1040	mW
	Output short-circuit to GND one amplifier ² $V_{CC}<15V_{DC}$ and $T_A=25^\circ\text{C}$	Continuous	
I_{IN}	Input current ($V_{IN}<-0.3V$) ³	50	mA
T_A	Operating ambient temperature range		
	LM324/A	0 to +70	$^\circ\text{C}$
	LM224	-25 to +85	$^\circ\text{C}$
	SA534	-40 to +85	$^\circ\text{C}$
	LM2902	-40 to +125	$^\circ\text{C}$
LM124	-55 to +125	$^\circ\text{C}$	
T_{STG}	Storage temperature range	-65 to +150	$^\circ\text{C}$
T_{SOLD}	Lead soldering temperature (10sec max)	300	$^\circ\text{C}$

NOTES:

- Derate above 25°C at the following rates:
F package at $9.5\text{mW}/^\circ\text{C}$
N package at $11.4\text{mW}/^\circ\text{C}$
D package at $8.3\text{mW}/^\circ\text{C}$
- Short-circuits from the output to V_{CC+} can cause excessive heating and eventual destruction. The maximum output current is approximately 40mA, independent of the magnitude of V_{CC} . At values of supply voltage in excess of $+15V_{DC}$ continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction.
- This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input bias clamps. In addition, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This action can cause the output voltages of the op amps to go to the $V+$ rail (or to ground for a large overdrive) during the time that the input is driven negative.

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

V_{CC}=5V, T_A=25°C unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124/LM224			LM324/SA534/LM2902			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _{OS}	Offset voltage ¹	R _S =0Ω		±2	±5		±2	±7	mV
		R _S =0Ω, over temp.			±7			±9	
ΔV _{OS} /ΔT	Temperature drift	R _S =0Ω, over temp.		7			7		μV/°C
I _{BIAS}	Input current ²	I _{IN} (+) or I _{IN} (-)		45	150		45	250	nA
		I _{IN} (+) or I _{IN} (-), over temp.		40	300		40	500	
ΔI _{BIAS} /ΔT	Temperature drift	Over temp.		50			50		pA/°C
I _{OS}	Offset current	I _{IN} (+)-I _{IN} (-)		±3	±30		±5	±50	nA
		I _{IN} (+)-I _{IN} (-), over temp.			±100			±150	
ΔI _{OS} /ΔT	Temperature drift	Over temp.		10			10		pA/°C
V _{CM}	Common-mode voltage range ³	V _{CC} ≤30V	0		V _{CC} -1.5	0		V _{CC} -1.5	V
		V _{CC} ≤30V, over temp.	0		V _{CC} -2	0		V _{CC} -2	
CMRR	Common-mode rejection ratio	V _{CC} =30V	70	85		65	70		dB
V _{OUT}	Output voltage swing	R _L =2kΩ, V _{CC} =30V, over temp.	26			26			V
V _{OH}	Output voltage high	R _L ≤10kΩ, V _{CC} =30V, over temp.	27	28		27	28		V
V _{OL}	Output voltage low	R _L ≤10kΩ, over temp.		5	20		5	20	mV
I _{CC}	Supply current	R _L =∞, V _{CC} =30V, over temp.		1.5	3		1.5	3	mA
		R _L =∞, over temp.		0.7	1.2		0.7	1.2	
A _{VOL}	Large-signal voltage gain	V _{CC} =15V (for large V _O swing), R _L ≥2kΩ	50	100		25	100		V/mV
		V _{CC} =15V (for large V _O swing), R _L ≥2kΩ, over temp.	25			15			
	Amplifier-to-amplifier coupling ⁵	f=1kHz to 20kHz, input referred		-120			-120		dB
PSRR	Power supply rejection ratio	R _S ≤0Ω	65	100		65	100		dB
I _{OUT}	Output current source	V _{IN} + =+1V, V _{IN} - =0V, V _{CC} =15V	20	40		20	40		mA
		V _{IN} + =+1V, V _{IN} - =0V, V _{CC} =15V, over temp.	10	20		10	20		
	Output current sink	V _{IN} - =+1V, V _{IN} + =0V, V _{CC} =15V	10	20		10	20		
		V _{IN} - =+1V, V _{IN} + =0V, V _{CC} =15V, over temp.	5	8		5	8		
		V _{IN} - =+1V, V _{IN} + =0V, V _O =200mV	12	50		12	50		
I _{SC}	Short-circuit current ⁴		10	40	60	10	40	60	mA
GBW	Unity gain bandwidth			1			1		MHz
SR	Slew rate			0.3			0.3		V/μs
V _{NOISE}	Input noise voltage	f=1kHz		40			40		nV/√Hz
V _{DIFF}	Differential input voltage ³				V _{CC}			V _{CC}	V

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Continued)

 $V_{CC}=5V$, $T_A=25^\circ C$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM324A			UNIT
			Min	Typ	Max	
V_{OS}	Offset voltage ¹	$R_S=0\Omega$		± 2	± 3	mV
		$R_S=0\Omega$, over temp.			± 5	
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Temperature drift	$R_S=0\Omega$, over temp.		7	30	$\mu V/^\circ C$
I_{BIAS}	Input current ²	$I_{IN(+)} \text{ or } I_{IN(-)}$		45	100	nA
		$I_{IN(+)} \text{ or } I_{IN(-)}$, over temp.		40	200	
$\Delta I_{BIAS}/\Delta T$	Temperature drift	Over temp.		50		$\mu A/^\circ C$
I_{OS}	Offset current	$I_{IN(+)}-I_{IN(-)}$		± 5	± 30	nA
		$I_{IN(+)}-I_{IN(-)}$, over temp.			± 75	
$\Delta I_{OS}/\Delta T$	Temperature drift	Over temp.		10	300	$\mu A/^\circ C$
V_{CM}	Common-mode voltage range ³	$V_{CC}=30V$	0		$V_{CC}-1.5$	V
		$V_{CC}=30V$, over temp.	0		$V_{CC}-2$	V
CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_{CC}=30V$	65	85		dB
V_{OUT}	Output voltage swing	$R_L=2k\Omega$, $V_{CC}=30V$, over temp.	26			V
V_{OH}	Output voltage high	$R_L \leq 10k\Omega$, $V_{CC}=30V$, over temp.	27	28		V
V_{OL}	Output voltage low	$R_L \leq 10k\Omega$, over temp.		5	20	mV
I_{CC}	Supply current	$R_L=\infty$, $V_{CC}=30V$, over temp.		1.5	3	mA
		$R_L=\infty$, over temp.		0.7	1.2	
A_{VOL}	Large-signal voltage gain	$V_{CC}=15V$ (for large V_O swing), $R_L \geq 2k\Omega$	25	100		V/mV
		$V_{CC}=15V$ (for large V_O swing), $R_L \geq 2k\Omega$, over temp.	15			V/mV
	Amplifier-to-amplifier coupling ⁵	$f=1kHz$ to $20kHz$, input referred		-120		dB
PSRR	Power supply rejection ratio	$R_S=0\Omega$	65	100		dB
I_{OUT}	Output current source	$V_{IN+}=+1V$, $V_{IN-}=0V$, $V_{CC}=15V$	20	40		mA
		$V_{IN+}=+1V$, $V_{IN-}=0V$, $V_{CC}=15V$, over temp.	10	20		
	Output current sink	$V_{IN-}=+1V$, $V_{IN+}=0V$, $V_{CC}=15V$	10	20		mA
		$V_{IN-}=+1V$, $V_{IN+}=0V$, $V_{CC}=15V$, over temp.	5	8		
		$V_{IN-}=+1V$, $V_{IN+}=0V$, $V_O=200mV$	12	50		
I_{SC}	Short-circuit current ⁴		10	40	60	mA
V_{DIFF}	Differential input voltage ³				V_{CC}	V
GBW	Unity gain bandwidth			1		MHz
SR	Slew rate			0.3		V/ μs
V_{NOISE}	Input noise voltage	$f=1kHz$		40		nV/ \sqrt{Hz}

NOTES:

- $V_O \approx 1.4V_{DC}$, $R_S=0\Omega$ with V_{CC} from 5V to 30V and over full input common-mode range ($0V_{DC+}$ to $V_{CC}-1.5V$).
- The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- The input common-mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V. The upper end of the common-mode voltage range is $V_{CC}-1.5$, but either or both inputs can go to +32V without damage.
- Short-circuits from the output to V_{CC} can cause excessive heating and eventual destruction. The maximum output current is approximately 40mA independent of the magnitude of V_{CC} . At values of supply voltage in excess of +15V_{DC}, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.
- Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of coupling increases at higher frequencies.

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902

EQUIVALENT CIRCUIT

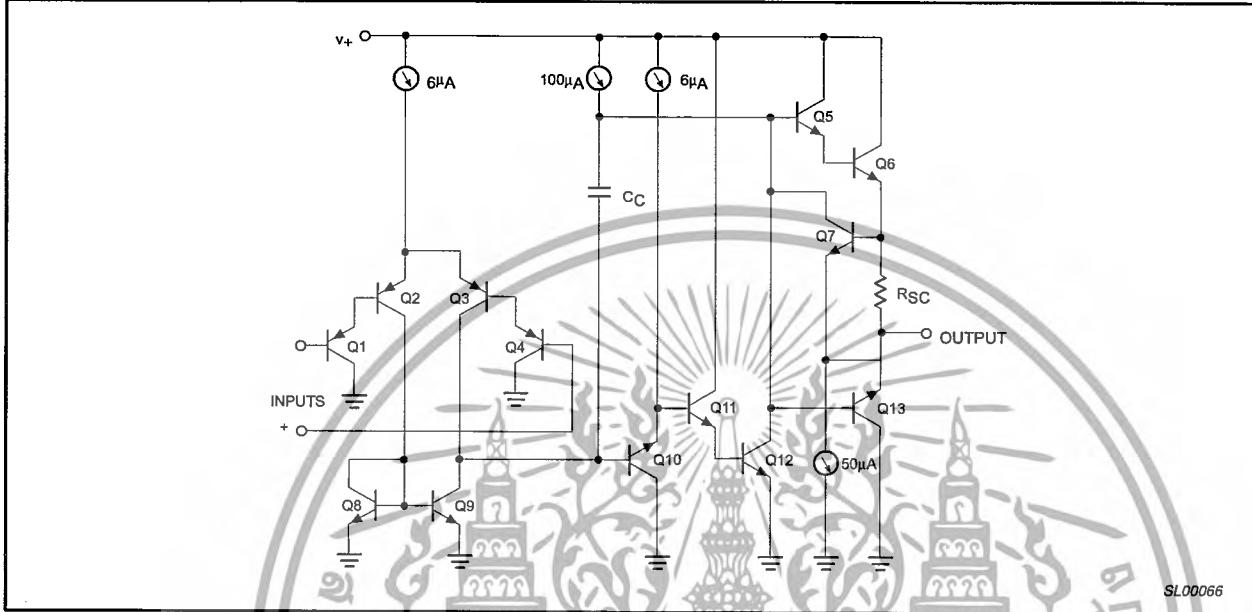


Figure 2. Equivalent Circuit

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

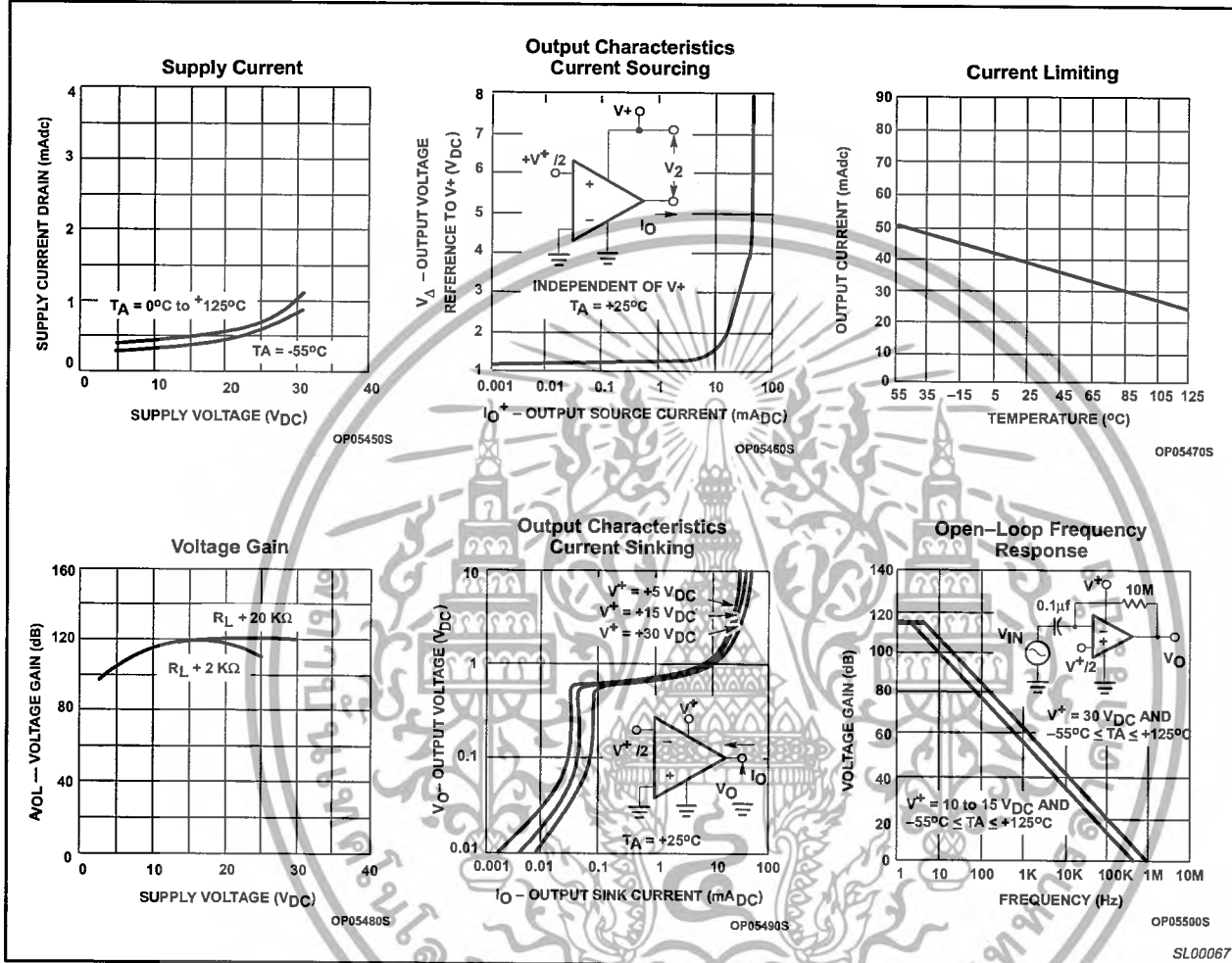


Figure 3. Typical Performance Characteristics

1995 Nov 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 6 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS (Continued)

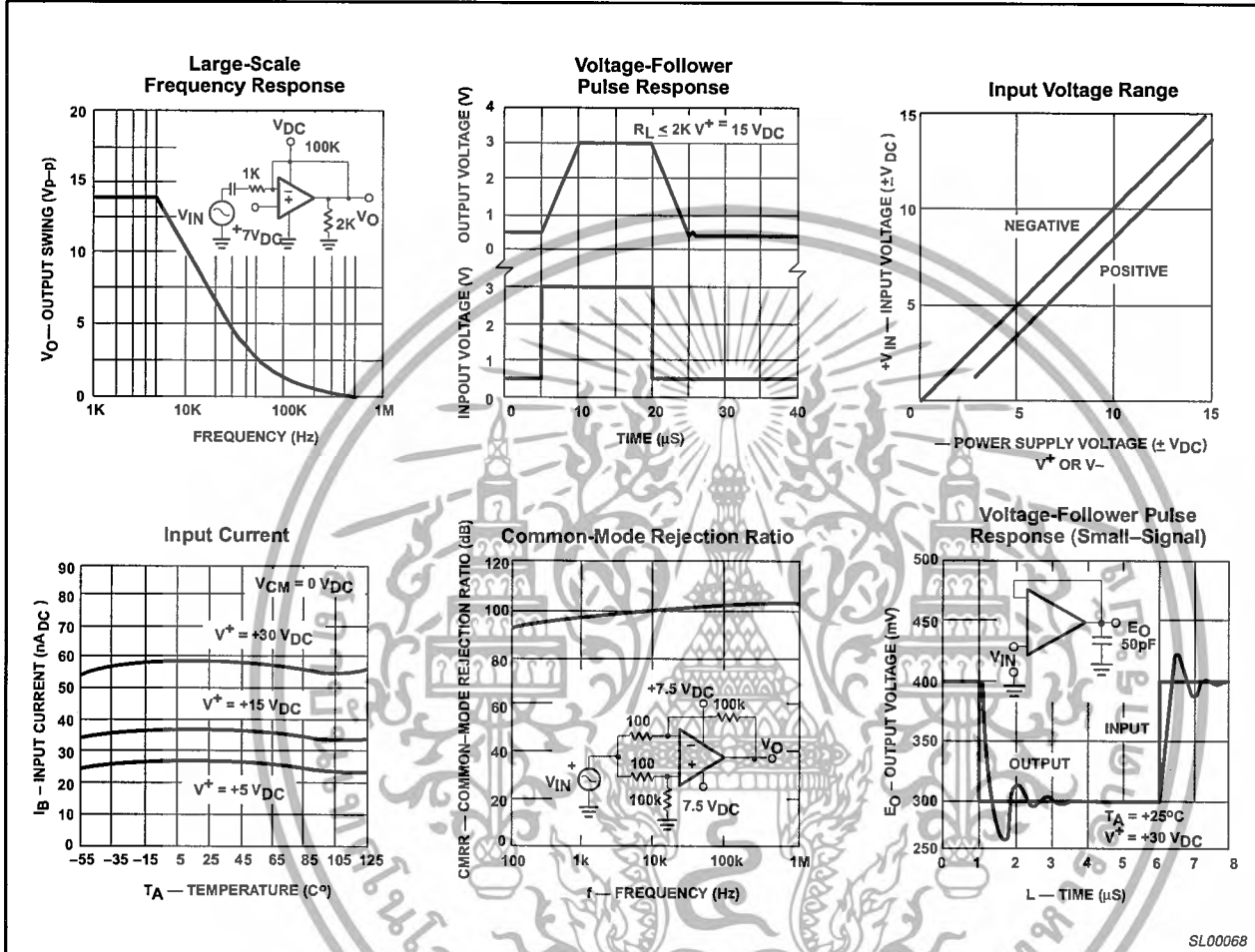


Figure 4. Typical Performance Characteristics (cont.)

TYPICAL APPLICATIONS

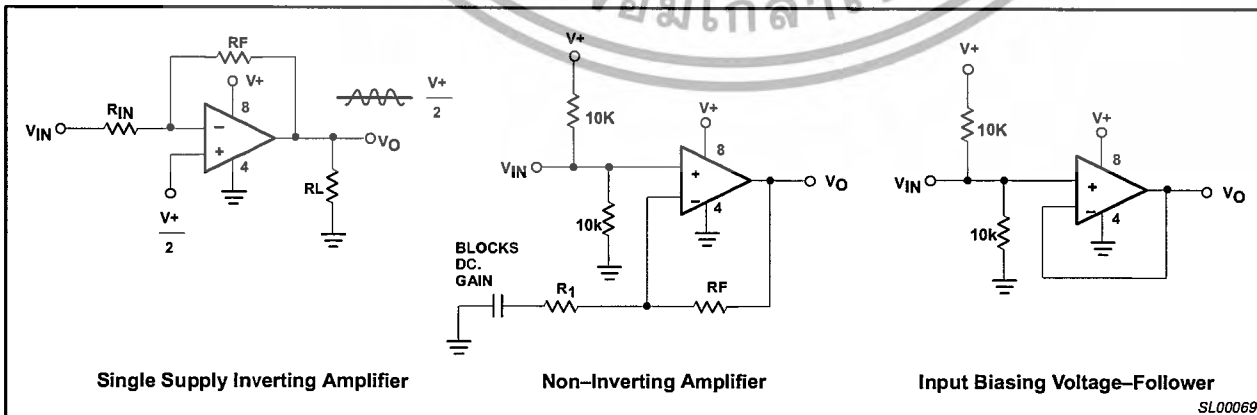


Figure 5. Typical Applications