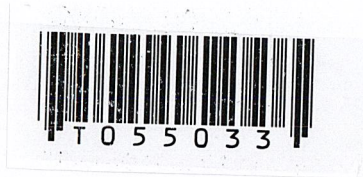


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องควบคุม PID/ON-OFF แบบหลายช่องทาง
MULTICHANNEL PID/ON-OFF CONTROLLER



นายภาณุวัฒน์ เริงสุขพิพัฒนะ
นายเอกชัย ศรีปัญญาหนูช

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

55033

7 เม.ย. 2548

b.....
i.....

MULTICHANNEL PID/ON-OFF CONTROLLER


PANUWAT ROENGSIKPIPATTANA
EKACHAI SRIPANYANUCH

**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
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ภาควิชาวิศวกรรมกรรมกรวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท เครื่องควบคุม PID/ON-OFF แบบหลายช่องสัญญาณ
MULTICHANNEL PID/ON-OFF CONTROLLER
นักศึกษาผู้จัดทำ นายภาณุวัฒน์ เรืองสุขพัฒนะ รหัสประจำตัว 44015438
นายเอกชัย ศรีปัญญา นุช รหัสประจำตัว 44015458
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมกรรมกรวัดคุม
ปีการศึกษา 2546

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กิตติ ตีระเศรษฐ รศ.ประภาส อุดกคิมพันธ์ อาจารย์พิทยา ปานนิล	

วัน/เดือน/ปีที่สอบ วันพุธที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2547
สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมกรรมกรวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว



(รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมกรรมกรวัดคุม

หัวข้อปริิญาานิพนธ์	เครื่องควบคุม PID/ON-OFF แบบหลายช่องสัญญาณ Multichannel PID/ON-OFF Controller	
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายภาณุวัฒน์	เริงสุขพิพัฒนะ
	นายเอกชัย	ศรีปัญญาบุษ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.กิตติ	ดีร์เศรษฐ
	รศ.ประภาส	อุคคกิม่าพันธุ์
	อาจารย์พิทยา	ปานนิล
ปีการศึกษา	2546	

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีนั้น มีปัจจัยหลักที่เป็นส่วนสำคัญของการควบคุมให้ได้ผลผลิตที่ดี คือ เครื่องควบคุมแบบ PID ซึ่งเครื่องควบคุมนี้มีหลายขนาดแต่ละขนาดก็จะมี ความสามารถแตกต่างกันไปตามฟังก์ชันของการทำงาน และราคาที่แตกต่างกันซึ่งมีราคาแพงมากในอุตสาหกรรมขนาดย่อม ซึ่งมีข้อจำกัดทางด้านเงินทุนจะพบปัญหาเรื่องการเลือกใช้งานเครื่องควบคุม ปริิญาานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ออกแบบ และสร้างเครื่องควบคุม PID ที่มีหลายช่องสัญญาณและสามารถเลือกช่องสัญญาณใช้งานได้อย่างอิสระทั้งในส่วนอินพุต และเอาต์พุต อีกทั้งยังสามารถเลือกฟังก์ชันได้ ตามความเหมาะสมของกระบวนการที่ต้องการควบคุม และมีราคาถูกกว่าท้องตลาด

Thesis Title	Multichannel PID/ON-OFF Controller	
Authors	Mr. Panuwat	Roengsukpipattana
	Mr. Ekachai	Sripanyanuch
Thesis Advisor	Assoc. Prof.Dr. Kitti	Tirasesth
	Assoc. Prof. Prapart	Ukakimaparn
	MR. Pittaya	Pannil
Year	2003	

ABSTRACT

In manufacturing process, in order to produce a good products, PID controller is an important factor for controlling the quality of product. There are many size of the controller which are different in both capability and price, they are usually expensive. In small industries which have limit in investment often meet problems when choosing the controllers. This thesis is designed and built the PID controller which has several input channels. It is enable to select channels independently both the input and output and enable to select appropriate function to control the process , finally , it is cheaper.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตาและความช่วยเหลือจาก อาจารย์พิทยา ปานนิล, รศ. ประภาส อุคคกิมพันธ์, รศ. ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์, ผศ.ดร. ธนิตย์ ศรีสุวรรณวัฒน์ และพิภุชณ์ เสมอพิทักษ์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่จัดทำโครงการด้วยดีตลอดมา อีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปการณ์ และเครื่องมือต่างๆ ในการทำปริญญาานิพนธ์ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

และส่วนสำคัญ คือ ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ และคุณพ่อและเพื่อนๆ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่ให้การสนับสนุน และเป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวคิดในการจัดทำโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 เนื้อหาของโครงการ.....	2
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีของการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุม PID.....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control).....	3
2.2.1 การควบคุมอัตโนมัติ.....	3
2.2.2 การตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	4
2.2.3 คุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	5
2.2.4 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	6
2.2.5 ประเภทของระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	9
2.3 กริยาควบคุมแบบต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมอัตโนมัติ.....	13
2.3.1 การควบคุมแบบ ON-OFF หรือ 2 ตำแหน่ง.....	13
2.3.2 การควบคุมแบบ Proportional.....	14
2.3.3 การควบคุมแบบ Integral.....	16
2.3.4 การควบคุมแบบ Proportional + Integral (PI).....	16
2.3.5 การควบคุมแบบ Proportional + Derivative (PD).....	18
2.3.6 การควบคุมแบบ Proportional + Integral + Derivative (PID).....	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทำงานของเครื่องควบคุม.....	21
3.1 กล่าวนำ.....	21
3.2 โครงสร้างโดยรวม.....	21
3.3 การทำงานของเครื่องควบคุม.....	22
3.3.1 ส่วนอินพุต.....	22
3.3.2 ส่วนประมวลผล.....	22
3.3.3 ส่วนคีย์ควบคุม.....	22
3.3.4 ส่วนแสดงผล.....	22
3.3.5 ส่วนเอาต์พุต.....	22
3.4 ฟังก์ชันการทำงาน.....	23
3.4.1 ฟังก์ชัน PID.....	23
3.4.2 ฟังก์ชัน ON-OFF.....	23
3.4.3 ฟังก์ชัน Square Root.....	23
3.4.4 ฟังก์ชัน Auto Manual.....	24
3.4.5 ฟังก์ชัน Revers Direct Action.....	24
3.4.6 ฟังก์ชัน Cascade.....	24
3.4.7 ฟังก์ชัน Ratio.....	24
3.5 รูปแบบการทำงานของเครื่องควบคุม.....	24
บทที่ 4 การออกแบบ และการสร้างเครื่องควบคุม.....	26
4.1 กล่าวนำ.....	26
4.2 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์.....	26
4.2.1 ส่วนอินพุต.....	26
4.2.2 ส่วนคีย์ควบคุม.....	27
4.2.3 ส่วนแสดงผล.....	30
4.2.4 ส่วนประมวลผลและอุปกรณ์เสริม.....	30
4.2.5 ส่วนเอาต์พุต.....	30
4.3 การออกแบบทางด้าน Soft Ware.....	32
4.4 ลักษณะของฮาร์ดแวร์ที่สำเร็จแล้ว.....	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดลอง.....	37
5.1 กล่าวนำ.....	37
5.2 การทดลองส่วนเอาต์พุต.....	37
5.3 การทดลองกรียาควบคุมแบบต่างๆ.....	38
5.3.1 การทดลองกรียาควบคุมแบบ P.....	38
5.3.2 การทดลองกรียาควบคุมแบบ PI.....	39
5.3.3 การทดลองกรียาควบคุมแบบ PD.....	40
5.3.4 การทดลองกรียาควบคุมแบบPID.....	41
5.4 การทดลองกับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ.....	43
5.5 การทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับ.....	46
5.6 สรุปผลการทดลอง.....	47
บทที่ 6 บทสรุปข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา.....	49
6.1 บทสรุป.....	49
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา.....	49
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก.....	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 แสดงผลการทดลองวงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5 V เป็นสัญญาณ ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA.....	37

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การตอบสนองของระบบเพิ่มความเร็วในยานพาหนะ.....	4
2.2 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและส่วนประกอบต่างๆ.....	6
2.3 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและระบบควบคุมทั่วไป.....	7
2.4 สัญญาณที่เข้าหรือออกของ Reference Input Element.....	7
2.5 สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นตัวควบคุม.....	7
2.6 สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นต้นกำลัง.....	8
2.7 ส่วนที่เป็นต้นกำลังของระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอก.....	8
2.8 ตัวเปรียบเทียบค่าหรือ Comparator ของระบบควบคุม.....	9
2.9 ระบบควบคุมอัตโนมัติ ประเภทวงจรมืด หรือประเภทที่มีการป้อนกลับ.....	10
(Close-Loop or Feed back Control System)	
2.10 ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบวงจรมืด หรือแบบไม่มีการป้อนกลับ.....	11
2.11 การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า.....	12
2.12 การควบคุมแบบ Cascade.....	12
2.13 ระบบควบคุมการผสมวัตถุดิบ.....	13
2.14 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง หรือแบบ ON-OFF.....	14
2.15 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Proportional.....	15
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการวัดกับช่วงชักของวาล์วเมื่อมีค่า PB ตั้งแต่ 20%ถึง500%.....	15
2.17 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Integral.....	16
2.18 ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PI.....	17
ข) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step.....	17
ค) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI เมื่ออินพุตเป็นแบบ Unit step.....	17
2.19 ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PD.....	18
ข) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step.....	18
ค) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PD.....	19
2.20 ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PID.....	20
ข) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step.....	20
ค) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PID.....	20
3.1 แสดงโครงสร้างโดยรวม.....	21
3.2 แสดงการทำงาน Standard PID/ON-OFF Controller.....	24

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 วงจรห้องรับสัญญาณมาตรฐาน 1-5 V.....	26
4.2 แสดงคีย์ควบคุมแบบต่างๆ.....	27
4.3 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5 V เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA	30
4.4 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5 V..... เป็นสัญญาณ ON-OFF	32
4.5 แสดง Main Flow Chart.....	33
4.6 แสดง Loop Sup Program.....	34
4.7 แสดงด้านหน้าของ Controller.....	35
4.8 แสดงด้านบนของ Controller.....	35
4.9 แสดงด้านหลังของ Controller.....	36
5.1 แสดงการทดสอบในโปรแกรม Math lab เมื่อกำหนดค่า error คงที่.....	38
5.2 แสดงการทดลองกำหนดค่า $K_p=5$ และ เปลี่ยนค่าเป้าหมายที่ 5, 10, 15% และเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Math lab	38
5.3 แสดงการทดลองกำหนดค่า $K_p=1, T_i=50, T_d=0$ กำหนดค่าเป้าหมายที่ 20%..... และเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Math lab	49
5.4 แสดงการทดลองกำหนดค่า $K_p=1, T_i=9999, T_d=50$ กำหนดค่าเป้าหมายที่ 10%..... และเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Math lab	40
5.5 แสดงการทดลองกำหนดค่า $K_p=1.5, T_i=50, T_d=10$ กำหนดค่าเป้าหมายที่ 20%..... และเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Math lab	41
5.6 แสดงการต่อวงจรควบคุมอุณหภูมิ.....	43
5.7 แสดงกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ.....	43
5.8 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ของ TOSHIBA ที่ $K_p=1, T_i=140$	44
5.9 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ของตัวควบคุมที่สร้าง $K_p=1, T_i=140$	44
5.10 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส ของ TOSHIBA ที่ $K_p=1, T_i=220$	45
5.11 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส ของตัวควบคุมที่สร้าง $K_p=1, T_i=220$	45
5.12 แสดงการต่อวงจรควบคุมระดับน้ำ.....	46
5.13 แสดงขบวนการควบคุมระดับน้ำ.....	46
5.14 แสดงการทดลองควบคุมระดับน้ำที่ Set Point ต่างๆที่ $K_p=1, T_i=80$	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดในการจัดทำปฏิญานิพนธ์

ในปัจจุบันการแข่งขันทางด้านธุรกิจนั้นมีค่อนข้างสูง ทำให้ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพและประสิทธิผลของโรงงาน ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยต้นทุนการผลิต และคุณภาพของสินค้า รวมไปถึงการปรับอัตราการผลิตให้เหมาะสมกับสภาวะความต้องการของตลาด ซึ่งส่วนสำคัญในการดำเนินการให้ได้ตามเป้าหมายตามต้องการ จะต้องมีการควบคุมการผลิตให้เหมาะสม โดยจะต้องเลือกวิธีการควบคุมที่เหมาะสมเมื่อสามารถเลือกวิธีการควบคุมที่เหมาะสมได้ ขั้นตอนต่อไปก็จะเลือกเครื่องควบคุมที่จะนำมาใช้เป็นตัวทำการควบคุมกระบวนการผลิต

เครื่องควบคุมที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีหลากหลายตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ตามความเหมาะสม แต่ในเครื่องควบคุมที่มีขนาดเล็กนั้นจะมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น จำนวนอินพุต-เอาต์พุต, รูปของการควบคุม และฟังก์ชันการทำงานที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการที่ใช้ควบคุมที่ซับซ้อนดังนั้นถ้าผู้ใช้งานต้องการใช้งานในการควบคุมที่มี อินพุต - เอาต์พุต หลายชนิด รูปการควบคุมหลายๆรูป และมีความต้องการควบคุมกระบวนการแบบซับซ้อนจะต้องใช้งานเครื่องควบคุมที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีราคาแพง ทางคณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องควบคุมที่มีหลายรูป การควบคุมที่สามารถเลือกช่องสัญญาณอินพุต-เอาต์พุตได้ และชนิดของสัญญาณได้ตามต้องการรวม ทั้งสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันการทำงานที่กำหนดให้เหมาะสมกับกระบวนการได้ตามต้องการของผู้ใช้งานเพื่อทดแทนเครื่องควบคุมที่มีราคาแพงและเหมาะสมสำหรับผู้ประกอบการที่มีข้อจำกัดทางด้านเงินทุน

1.2 วัตถุประสงค์ของปฏิญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องควบคุม
2. ศึกษาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ และนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาเป็นตัวประมวลผลให้กับเครื่องควบคุมที่ออกแบบได้
3. เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องควบคุมเพื่อการพัฒนาสู่ผลิตภัณฑ์

1.3 ขอบเขตของปริิณญานิพนธ์

1. ศึกษาฟังก์ชันการทำงาน และการใช้งานของเครื่องควบคุมที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน
2. ศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 และการเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษาซี
3. ออกแบบเครื่องควบคุมแบบหลายช่องสัญญาณ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เป็นตัวประมวลผล โดยมีรายละเอียดดังนี้
 - เครื่องควบคุมแบบ 8 ช่องสัญญาณประกอบด้วย PID 6 ช่องสัญญาณ และ ON-OFF 2 ช่องสัญญาณ
 - สัญญาณอินพุต 1 – 5 Vdc จำนวน 8 ช่องสัญญาณ
 - สัญญาณเอาต์พุต 4 – 20 mA จำนวน 6 ช่องสัญญาณ และ Relay จำนวน 2 ช่องสัญญาณ
4. สร้างเครื่องต้นแบบ
5. ทดสอบสมรรถภาพของเครื่องควบคุมต้นแบบ โดยนำเครื่องควบคุมมาควบคุมกระบวนการต่างๆ ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ

1.4 เนื้อหาของปริิณญานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงแนวความคิดในการจัดทำโครงการ วัตถุประสงค์ในการจัดทำโครงการ ขอบเขตของโครงการ และเนื้อหาของปริิณญานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของการควบคุมกระบวนการ กริยาควบคุมแบบต่างๆที่ใช้ในการควบคุมอัตโนมัติ

บทที่ 3 กล่าวถึงการทำงานของเครื่องควบคุม รูปแบบการทำงานและฟังก์ชันการใช้งานของเครื่องควบคุม

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบ และการสร้างเครื่องควบคุม โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ ส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์และการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองกระบวนการด้วยเครื่องควบคุมที่สร้างขึ้น และแสดงผลการทดลอง

บทที่ 6 บทสรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีของการควบคุมกระบวนการ ด้วยตัวควบคุม PID

2.1 กล่าวนำ

การควบคุมกระบวนการ คือ วิธีการควบคุมค่าของกระบวนการให้มีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายที่เราต้องการ หลักการควบคุมนั้นแบ่งได้ 2 ประเภท คือ การควบคุมแบบลูปเปิด (Open loop) และแบบลูปปิด (Close Loop) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นหลายชนิด เช่น การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward Control) การควบคุมแบบคาสเคด (Cascade Control) และการควบคุมแบบสัดส่วน (Ratio Control) เป็นต้น ซึ่งกริยาควบคุมที่ใช้ภายในเครื่องควบคุมส่วนใหญ่ คือ กริยาควบคุมแบบ PID และ ON-OFF เป็นตัวกระทำเพื่อปรับค่ากระบวนการให้ได้ตามต้องการ

2.2 การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control)

2.2.1 การควบคุมอัตโนมัติ

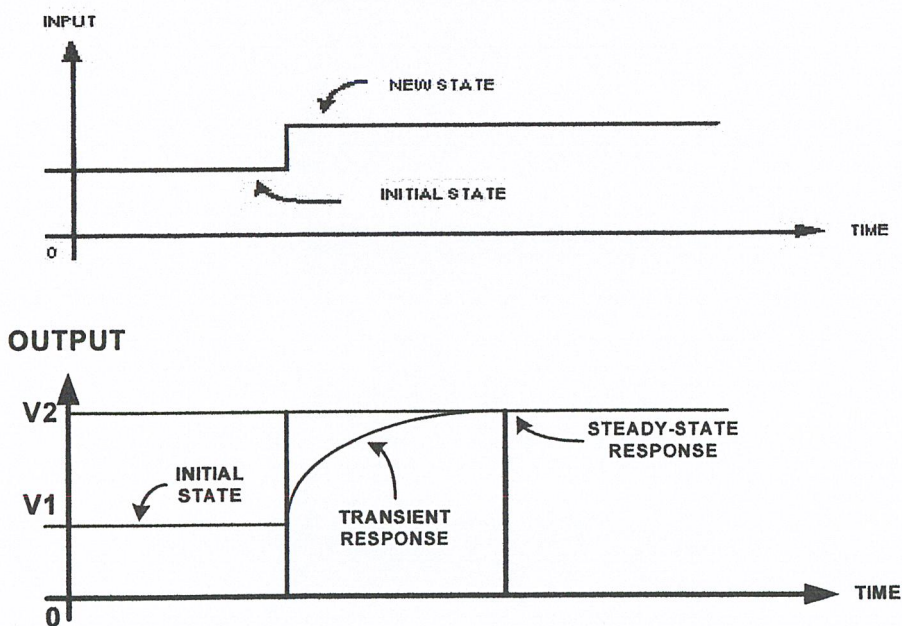
การควบคุมอัตโนมัติของระบบทางกายภาพใดๆ คือ การควบคุมหรือบังคับให้ระบบนั้นทำงานในลักษณะที่จะนำมาซึ่งผลงาน (Output) มีคุณสมบัติสอดคล้องหรือเป็นไปตามเป้าหมาย (Set Point) ด้วยตัวของมันเอง เช่น การควบคุมอัตโนมัติในระบบการทำความเย็น ซึ่งโดยทั่วไปหมายถึง การบังคับให้ระบบทำงานให้ผลงาน คือ ความเย็นเป็นไปตามที่ต้องการ กล่าวคือมีระดับความเย็นหรืออุณหภูมิเป็นไปตามที่ต้องการ ไม่ใช่เย็นไม่พอหรือเย็นเกินไป ด้วยอุปกรณ์หรือส่วนประกอบภายในระบบนั่นเอง แทนที่ผู้ใช้จะคอยเปิดหรือปิดเครื่องปรับอากาศหรือปั๊มเอง เป็นต้น ในระบบควบคุมอัตโนมัติอย่างง่ายๆ สิ่งที่ระบบทำให้ผลงาน และเป้าหมายของระบบ หรือข้อกำหนดที่ส่งเข้าสู่ระบบ (Input) อาจเป็นปริมาณ หรือสัญญาณชนิดเดียวกัน เช่น เป็นอุณหภูมิเหมือนในระบบควบคุมความเย็น แต่ในระบบควบคุมอัตโนมัติทั่วไปเอาต์พุต และอินพุตอาจเป็นปริมาณหรือสัญญาณที่เหมือนกันหรือไม่เหมือนกันก็ได้ เช่น ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat-Exchange) เอาต์พุตของระบบ คือ ความร้อนในขณะที่อินพุตเป็นอัตราการไหลของสารหล่อเย็น

เนื่องจากการควบคุมอัตโนมัติ เป็นการบังคับให้ระบบทำงานให้เอาต์พุตที่เป็นไปในลักษณะที่สอดคล้องกันกับอินพุตจึงอาจกล่าวได้ว่า การศึกษาการควบคุมอัตโนมัติเป็นการศึกษาถึงการตอบสนองของระบบ (System Response) ซึ่งได้แก่ ลักษณะของเอาต์พุตต่อเป้าหมาย หรือข้อกำหนดหรือต่ออินพุตที่จะเข้าสู่ระบบ การตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่เข้ามาสู่ระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น การตอบสนองส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Response) กับการตอบสนองส่วนที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady State Response) ซึ่งโดยทั่วไปการศึกษาระบบควบคุม

อัตโนมัติจะเน้นไปที่ การตอบสนองส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้การวิเคราะห์ระบบควบคุมควบคุมอัตโนมัติเสมือนเป็นการวิเคราะห์ ระบบพลศาสตร์ (Dynamics System) และในบางครั้งนั้นจะพบว่า มีทฤษฎีหรือหลักการของการควบคุมอัตโนมัติบางอย่าง สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบทางพลศาสตร์อื่นๆ เช่น ระบบสั่นสะเทือนหรือในทางกลับกันได้เป็นอย่างดี

2.2.2 การตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติ

ในระบบเพิ่มความเร็วของรถยนต์หรือยานพาหนะอื่นๆ อินพุตของระบบ คือ ตำแหน่งของคันเร่งน้ำมันเอาต์พุตของระบบ คือ ความเร็วของรถยนต์หรือยานพาหนะนั้นๆ เมื่อผู้ขับขี่ซึ่งอาจถือเป็นส่วนหนึ่งของระบบได้ ต้องการจะเพิ่มความเร็วของรถยนต์หรือยานพาหนะของเขา เขาจะส่งสัญญาณที่ต้องการอันนี้เข้าสู่ระบบ โดยการเหยียบคันเร่งน้ำมันให้มากขึ้น (Input ของระบบเปลี่ยนไป) ระบบจะทำงานด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะทำให้ล้อของรถยนต์หรือยานพาหนะนั้นๆ หมุนเร็วขึ้น อันจะทำให้ความเร็ว (Output) ของรถยนต์ หรือยานพาหนะนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น การตอบสนองของระบบขณะนี้เรียกว่า เป็นการตอบสนองส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Response) และเมื่อเวลาผ่านไปชั่วขณะหนึ่ง ความเร็วของยานพาหนะจะคงที่ไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอีกต่อไป การตอบสนองของระบบตั้งแต่นั้นไป เป็นการตอบสนองส่วนที่ไม่มีมีการเปลี่ยนค่าตามเวลา (Steady State Response) ยกเว้นเสียแต่ อินพุตของระบบ คือ ตำแหน่งของคันเร่งน้ำมันจะเปลี่ยนไปเป็นค่าใหม่ หรือระบบถูกรบกวนจากภายนอก เช่น รถขึ้น หรือลงเนิน หรือถูกลมกระโชกแรงมากขึ้น ฯลฯ เหตุการณ์ในระบบตัวอย่างดังที่ได้กล่าวมานี้ อาจแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองได้ดีขึ้น โดยภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การตอบสนองของระบบเพิ่มความเร็วในยานพาหนะ

ระบบอื่นๆ เช่น ระบบควบคุมความดัน ระบบควบคุมความเย็น ฯลฯ ก็เช่นกัน ลักษณะของเอาต์พุต หรือการตอบสนองของระบบต่ออินพุตใหม่ของระบบจะไม่เป็นไปในลักษณะทันทีทันใด ก็จะต้องมีการค่อยๆ เพิ่มหรือค่อยๆ ลด กล่าวคือ ต้องใช้เวลาเสมอ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะระบบใดๆ ก็ย่อมมีความเฉื่อย หรือคุณสมบัติซึ่งเหมือนความเฉื่อยเสมอ และส่วนประกอบต่างๆ ภายในระบบนั้นๆ ย่อมไม่สามารถทำงานได้อย่างเครื่องจักรในอุดมคติ คือ ให้แรง หรือโมเมนต์หรือผลกระทบได้อย่างมากมาย (Infinite) จนทำให้ระบบสามารถเปลี่ยนสถานะ (State) ได้อย่างทันทีทันใด

2.2.3 คุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ

ในการเปรียบเทียบคุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติที่เหมือนกัน 2 ระบบ ว่าระบบไหนดีกว่ากัน จะต้องดูที่การตอบสนอง (Response) ของแต่ละระบบแล้วมาเปรียบเทียบกัน ระบบที่ให้การตอบสนองที่มีความแม่นยำสูง (High Accuracy) ย่อมดีกว่าระบบที่ให้การตอบสนองที่มีการคลาดเคลื่อน (Low Accuracy) ระบบที่ให้การตอบสนองที่ฉับไว (Fast) ย่อมดีกว่าระบบที่ให้การตอบสนองอย่างเฉื่อยช้า (Sluggish) และระบบที่ให้การตอบสนองที่มีเสถียร (Stable) ย่อมดีกว่าระบบที่ให้การตอบสนองที่รุนแรงหรือทำการควบคุมไม่ได้ (Violent or Unstable Response) จึงอาจกล่าวได้ว่า คุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ หมายถึงความแม่นยำ (Accuracy) ความรวดเร็ว (Speed) ความเสถียร (Stability) ของการตอบสนอง ของระบบนั้นๆ

ระบบควบคุมที่ขาดความแม่นยำนั้นนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ และถือว่าเป็นระบบการควบคุมที่สร้างขึ้นหรือทำขึ้นโดยผิดพลาดประสงค์ของการควบคุมและแน่นอน ความแม่นยำในที่นี้ รวมถึงความสม่ำเสมอ คงเส้นคงวา (Consistency) ในเรื่องของการตอบสนองด้วยความรวดเร็ว ของการตอบสนองก็เช่นกัน ระบบที่การตอบสนองที่แม่นยำไม่มีการคลาดเคลื่อนเลย แต่ใช้เวลานานมากกว่าจะถึงเสถียรภาพก็ย่อมเป็นระบบควบคุมที่นำไปใช้งานไม่ได้ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด ได้แก่ ระบบเบรกในรถยนต์ เมื่อผู้ขับขี่ต้องการจะหยุดรถ คือเหยียบคันบังคับเบรกในกรณีฉุกเฉิน รถย่อมหยุดไม่ทันและเกิดอุบัติเหตุได้ การทำงานของระบบเบรกโดยทั่วไปปรกติจะต้องหยุดเมื่อสุดระยะเคลื่อนที่ของคันเหยียบบังคับเบรก เสถียรของการตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของระบบควบคุมนั้นๆ ระบบควบคุมที่มีความเร็วและแม่นยำในการตอบสนอง แต่ในบางลักษณะของอินพุตไม่สามารถที่จะให้การตอบสนองที่เสถียรระบบการควบคุมนั้นก็ใช้งานไม่ได้และชำรุดไปตัวอย่างที่ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของความเสถียร ได้แก่ การทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน แบบจุดระเบิดด้วยกำลังอัด (Compression Ignition หรือเครื่องยนต์ดีเซล) ซึ่งจะต้องมีตัวควบคุม คือ Governor สำหรับควบคุมรอบการทำงานของเครื่องยนต์นั้นเสมอ ถ้าหากการทำงานของ Governor ผิดพลาดหรือเสียไปในจังหวะที่ผู้ขับขี่เร่งเครื่องยนต์มากๆ เป็นระยะเวลาอันยาวนานเครื่องยนต์จะหมุนเร็วขึ้นทุกขณะจนตัวเครื่องยนต์พังเองเพราะชิ้นส่วนต่างๆ ไม่สามารถทนต่อแรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยไม่มีขีดจำกัดได้

จึงเห็นว่า ความแม่นยำ ความรวดเร็ว และความมีเสถียรภาพ นอกจากจะเป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติแล้วยังเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติทุกระบบ จะขาดอันใดอันหนึ่งไปไม่ได้ จึงไม่ควรที่จะสรุปว่าความแม่นยำดีกว่าความรวดเร็ว ความรวดเร็วดีกว่า

ความมีเสถียรภาพ หรือกลับกันในระบบควบคุมอัตโนมัติหนึ่งๆ ผู้ออกแบบหรือผู้สร้างระบบควบคุมนั้นๆ จะต้องคำนึงถึงทั้ง 3 องค์ประกอบ คือ พยายามที่จะทำให้ได้ระบบควบคุมที่ทำงานหรือให้การตอบสนองที่แม่นยำที่สุด รวดเร็วที่สุด และเสถียรที่สุด ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำได้ลำบาก เพราะขณะที่พยายามให้ระบบควบคุมมีการตอบสนองที่รวดเร็ว โดยทั่วไปจะทำให้ระบบเสถียรภาพหายไป หรือขณะที่พยายามให้ระบบนั้นมีการตอบสนองที่แม่นยำมากขึ้น โดยทั่วไปก็จะมีผลกระทบทำให้การตอบสนองล่าช้าลง

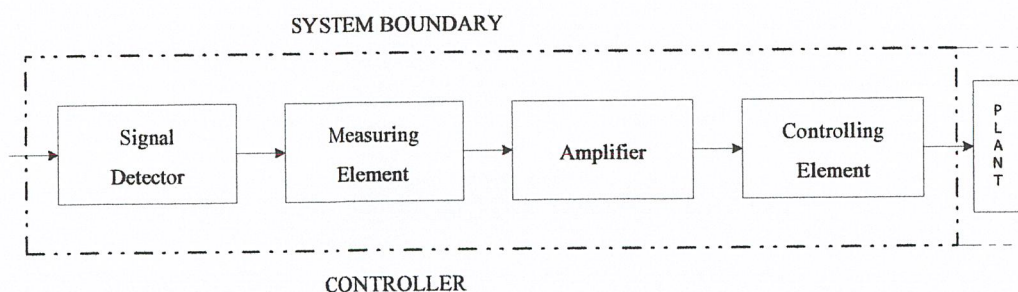
2.2.4 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ

ระบบควบคุมอัตโนมัติ ประกอบด้วย ระบบย่อย หรือส่วนประกอบใหญ่ๆ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller) และส่วนที่เป็นกระบวนการ (Process)

2.2.4.1 ส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller)

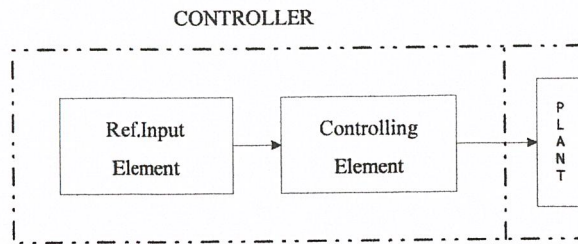
ส่วนที่เป็นตัวควบคุมนั้น หมายถึง ส่วนที่ทำหน้าที่แปรสัญญาณจากภายนอก ที่ส่งเข้ามาสู่ระบบ หรือ อินพุตให้เป็นสัญญาณอื่นที่เหมาะสม และมีกำลังพอ เพื่อไปบังคับให้ส่วนที่เป็นต้นกำลังทำงานเพื่อให้ระบบควบคุมทั้งระบบทำงาน ในระบบควบคุมความเร็วของรถยนต์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนที่เป็นตัวควบคุม จะเริ่มต้นจากคันเร่งน้ำมัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ (Signal Detector) จากภายนอก และตัววัดระดับสัญญาณ (Measuring Device) ไปในตัวด้วยแล้ว ส่งสัญญาณนั้นไปยังคาบยูเรเตอร์หรือหัวฉีดโดยอาศัยสายคันเร่ง หรือ Linkages ต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณ (Signal Amplifier) คาบยูเรเตอร์หรือหัวฉีดก็จะทำงานโดยเปิดลิ้นให้ส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศไหลลงสู่ Intake Manifold หรือ ในกรณีของหัวฉีด จะฉีดน้ำมันเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้น คาบยูเรเตอร์หรือหัวฉีดจึงทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม (Controlling Element)

จึงอาจกล่าวได้ว่า โดยทั่วไปส่วนที่เป็นตัวควบคุมประกอบด้วย ตัวรับสัญญาณ หรือ Signal Detector หรือ Receiver ตัววัดระดับสัญญาณหรือ Measuring Device และตัวขยายสัญญาณหรือ Signal Amplifier หรือ Amplifier และตัวควบคุมหรือ Controlling Element ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงหรือลักษณะของสัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 2.2



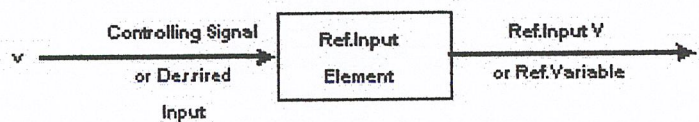
ภาพที่ 2.2 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและส่วนประกอบต่างๆ

ในการแทนระบบควบคุมด้วยภาพ (Diagram) ตัวรับสัญญาณหรือ Signal Detector ตัววัดระดับสัญญาณหรือ Measuring Device ตัวขยายสัญญาณหรือ Amplifier อาจแสดงได้โดยรวมเข้าด้วยกัน เรียกว่า Reference Input Element ฉะนั้น ส่วนที่เป็นตัวควบคุมหรือ Controller ดังแสดงในภาพที่ 2.2 จึงนิยมแทนด้วยภาพที่ 2.3



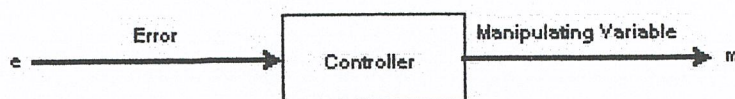
ภาพที่ 2.3 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและระบบควบคุมทั่วไป

และเรียกสัญญาณที่เข้าสู่ระบบที่ Reference Input Element ว่า Command Signal หรือ Command Variable หรือ Desired Input ซึ่งโดยทั่วไปใช้ V เป็นสัญลักษณ์ และเรียกสัญลักษณ์ที่ออกไปจาก Reference Input Element ว่า Reference Input หรือ Reference Variable ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ คือ r ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สัญญาณที่เข้าหรือออกของ Reference Input Element

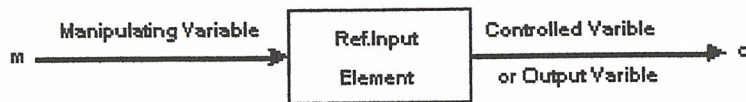
ส่วนสัญญาณที่ออกจาก Controlling Element และเข้าสู่ส่วนที่เป็นต้นกำลัง หรือกระบวนการ (Plant) ของระบบ ซึ่งในระบบควบคุมความเร็วได้แก่ น้ำมันที่ไหลออกจากคาบูเรเตอร์ หรือหัวฉีด เข้าสู่เครื่องยนต์นั้นเรียกว่า Manipulating Variable ใช้สัญลักษณ์ คือ m ฉะนั้น สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นตัวควบคุม จึงอาจแสดงได้ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นตัวควบคุม

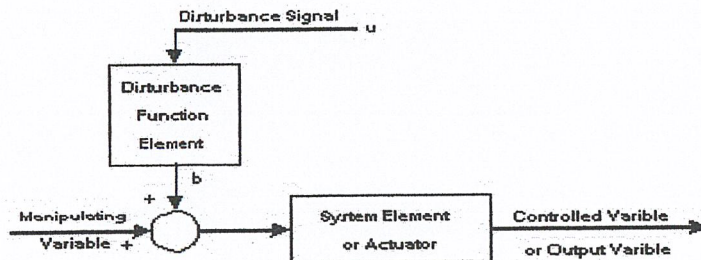
2.2.4.2 ส่วนที่เป็นกระบวนการ (Process)

ส่วนที่เป็นกระบวนการ คือ ส่วนของระบบควบคุมอัตโนมัติที่รับสัญญาณ Manipulating Variable (MV) จากส่วนที่เป็นตัวควบคุมแล้วทำงานให้ได้เอาต์พุต หรือ Control Variable (C) ของระบบตามที่ต้องการ ในระบบควบคุมระดับของเหลว ส่วนที่เป็นกระบวนการต้นกำลังได้แก่ Control Valve ซึ่งเมื่อได้รับ Manipulating Variable คือ สัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA แล้วทำงานให้ระดับของเหลว (Control Variable) เป็นไปตามที่ต้องการ อาจเขียนแสดงได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นต้นกำลัง

เนื่องจากในระบบควบคุมทั่ว ๆ ไป สัญญาณที่เข้าสู่ตัวทำงาน ซึ่งเรียกว่า System Element หรือ Actuator มักจะประกอบด้วยสัญญาณอื่น เนื่องมาจากการรบกวนจากภายนอกซึ่งเรียกว่า External Disturbance ส่วนที่เป็นต้นกำลังจึงประกอบด้วย ตัวรวมสัญญาณ หรือ Signal Summing Element ซึ่งทำหน้าที่รวมสัญญาณจากภายนอกเข้ากับ Manipulating Variable แล้วจึงส่งต่อไปยัง Actuator ดังแสดงในภาพที่ 2.7



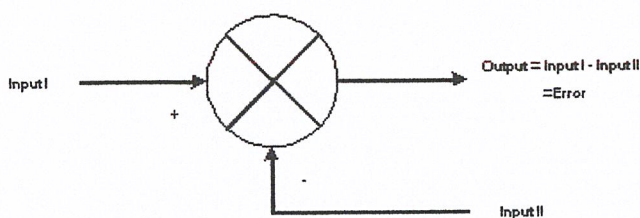
ภาพที่ 2.7 ส่วนที่เป็นต้นกำลังของระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอก

โดยที่ Disturbance Function Element หรือ Disturbance Element ทำหน้าที่เช่นเดียวกับ Reference Input Element คือ ส่ง วัด และขยาย (หรือลด) ขนาด หรือ เปลี่ยนภาพ ในระบบเพิ่มความเร็วของ รอยนต์ Disturbance Signal ได้แก่ Vacuum Advance นั่นเอง ส่วนสัญญาณที่ออกจาก Disturbance Element ซึ่งจะรวมกับ Manipulating Variable (m) เรียกว่า Disturbance Variable ที่ใช้สัญลักษณ์ b

จะเห็นว่า ข้อแตกต่างของส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller) กับส่วนที่เป็นต้นกำลัง (Plant) ก็คือ ส่วนที่เป็นตัวควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของทั้งระบบ ให้เป็นไปตามเป้าหมายของระบบควบคุม แต่เอาต์พุตของส่วนนี้ คือ Manipulating Variable ไม่สามารถทำงานให้ระบบได้จึงต้องอาศัย

ส่วนที่เป็นต้นกำลังอีกต่อหนึ่ง สำหรับส่วนที่เป็นต้นกำลังจะทำหน้าที่ผลิตกำลังให้เป็นไปตามระดับความแรงของสัญญาณ Manipulating Variable จากส่วนตัวควบคุมเพื่อให้ได้เอาต์พุตของระบบ หรือ Controlled Variable กล่าวคือ ส่วนที่เป็นต้นกำลัง หรือ ต้นกำลัง (Plant) จะทำงานในลักษณะแปรสภาพหรือส่งพลังงาน เช่น เครื่องยนต์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสภาพพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล คือ รอบเครื่องยนต์ และแรงบิด (Speed and Torque)

อุปกรณ์อื่นที่ใช้ในระบบควบคุมที่พบเสมอและสำคัญมาก ได้แก่ ตัวเปรียบเทียบค่า หรือ Comparator ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณแล้วให้ความแตกต่างของสัญญาณ ที่มาเปรียบเทียบเป็นเอาต์พุต ซึ่งเรียกว่า ค่าผิดพลาด (Error) ตัวเปรียบเทียบสัญญาณทำงานโดยอาศัยหลักการ และใช้สัญลักษณ์ เป็นวงกลม เช่นเดียวกับตัวรวมสัญญาณ เพียงแต่ให้สัญญาณหลักเป็นบวก และให้สัญญาณที่มาเปรียบเทียบเป็นลบ และเขียนสัญลักษณ์ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ตัวเปรียบเทียบค่าหรือ Comparator ของระบบควบคุม

ตัวเปรียบเทียบค่า หรือ Comparator จะพบเสมอในเรื่องของระบบควบคุมประเภทของ วงปิด (Close-loop Control System) หรือที่เรียก ๆ กันว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทที่มีการป้อนกลับ (Feed back Control System) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

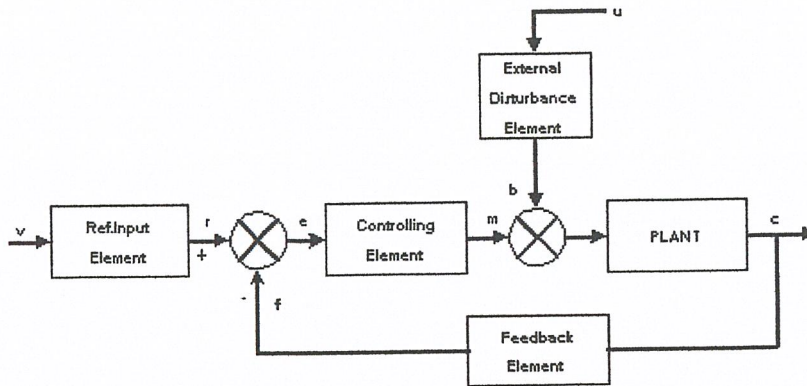
2.2.5 ประเภทของระบบควบคุมอัตโนมัติ

การควบคุมอัตโนมัติในระบบทางกายภาพต่างๆ ซึ่งเรียกว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทวงปิด หรือมีการป้อนกลับ และประเภทวงเปิด หรือไม่มีการป้อนกลับ

2.2.5.1 ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทวงปิด หรือประเภทที่มีการป้อนกลับ

(Close-Loop or Feedback Control System)

ระบบการควบคุมประเภทนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 เป็นระบบการควบคุมที่เอาต์พุตของระบบหรือ Controlled Variable ถูกป้อนกลับมายังส่วนที่เป็นตัวควบคุม ของระบบเพื่อมาเปรียบเทียบกับค่า Reference Variable (R) โดยอาศัยตัวเปรียบเทียบค่าตลอดเวลา

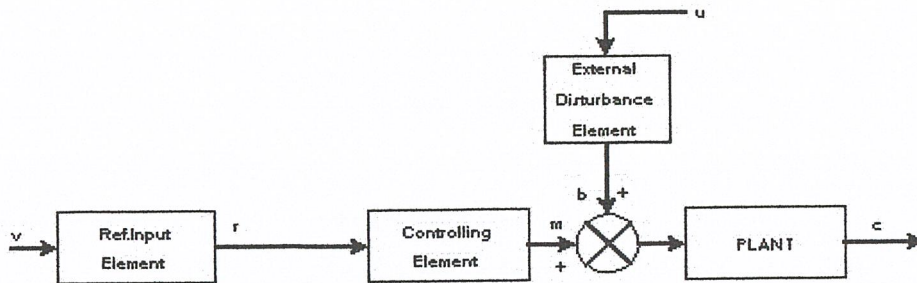


ภาพที่ 2.9 ระบบควบคุมอัตโนมัติ ประเภทวงปิด หรือประเภทที่มีการป้อนกลับ

และเนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว ลักษณะของ Controlled Variable และ Reference Variable จะไม่เหมือนกัน ใน Feedback Loop จึงมักประกอบด้วย Feedback Element ซึ่งทำหน้าที่ รับ วัด ขยายหรือ ลด หรือ เปลี่ยนสภาพ Controlled Variable ให้เป็น Feedback Variable

ในช่วง Transient Response ของระบบการควบคุมประเภทนี้ Error (หรือที่บางครั้งเรียกว่า Actuating Signal) ซึ่งมีสัญลักษณ์ e จะเปลี่ยนค่าตลอดเวลา ถึงแม้ Reference Variable จะไม่เปลี่ยนค่าก็ตาม เนื่องจาก Feed back Variable เปลี่ยนค่าตลอดเวลา เพราะ Controlled Variable เปลี่ยนค่าตลอดเวลา ฉะนั้นส่วนที่เป็น Final Element หรือ ส่วนที่เป็นตัวปรับตัวแปรกระบวนการของระบบควบคุมประเภทนี้ โดยทั่วไปแล้วจะทำงานด้วยอัตราที่ไม่คงที่ (ยกเว้นในระบบควบคุมแบบ เปิด- ปิด หรือ On-Off Control ตัวอย่างของระบบการควบคุมประเภทที่มีป้อนกลับ ได้แก่ การกระทำต่างๆ ของคน เช่น การรับประทานอาหาร ระบบประสาทจะทำหน้าที่เป็น Feed back Element คือ แปรสัญญาณความอึดจากกระเพาะอาหาร แล้วส่งไปยังสมอง สมองก็จะทำหน้าที่เป็น Comparator เปรียบเทียบระดับความอึด หากเปรียบเทียบแล้วปรากฏว่ายังไม่อึด สมองก็จะสั่งให้กล้ามเนื้อ และแขนทำงานต่อไป คือ ส่งอาหารเข้าปากต่อไป ข้อสังเกตที่เห็นได้จากกระบวนการเหล่านี้ก็คือ ถ้าคนคนหนึ่งหิวมาก เขาจะรับประทานอาหารได้อย่างรวดเร็ว มุมมาม และจะค่อย รับประทานอาหารช้าลงเมื่ออึด หรือถึง Steady State แล้ว และอีกตัวอย่างหนึ่งของการควบคุมประเภทนี้ได้แก่ การเดินของคน จะเห็นว่าการทำงานของระบบนี้ มีตาเป็น Feed back Element หากเจอหลุม ก้อนหิน หรือ สิ่งกีดขวางใดๆ ที่ตาสังเกตเห็น ตาจะส่งสัญญาณไปยังสมอง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบ และ Controller Element คือ สมองก็จะบังคับให้กล้ามเนื้อเท้า และขาทำงาน คือ เดินหลบสิ่งกีดขวางเหล่านั้น แต่ยังคงมุ่งไปที่เป้าหมายเดิม เป็นเช่นนี้เรื่อยไป

2.2.5.2 ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบวงเปิด หรือแบบไม่มีการป้อนกลับ (Open-Loop Control System)



ภาพที่ 2.10 ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบวงเปิด หรือแบบไม่มีการป้อนกลับ

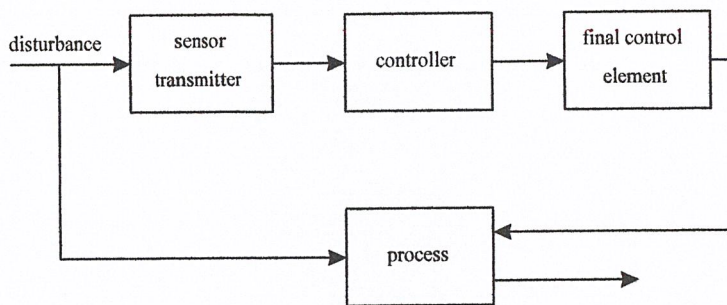
ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 เป็นเรื่องของการควบคุมที่ไม่มีการเปรียบเทียบสภาพของเอาต์พุตของระบบ หรือ Controlled Variable กับ Reference Variable ของระบบ กล่าวคือ Error หรือ Actuating Signal มีค่าคงที่ตลอดเวลา และโดยทั่วไปเรื่องของกระบวนการจะทำงานที่อัตราคงที่นั่นข้อสังเกตที่สำคัญของระบบควบคุมประเภทนี้ก็คือ ความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุตของระบบเพราะในทางปฏิบัติระบบจะถูกรบกวนจากภายนอกเสมอ ทำให้ส่วนที่เป็นตัวรับค่าตัวแปรกระบวนการไม่สามารถทำงานได้ตามที่ Controller สั่งมาแต่จะเอาการรบกวนเข้ามา และไม่มีการแก้ไขกลับไป (Feed back) ที่ส่วนที่เป็นตัวควบคุมอีกแต่อย่างใด

ตัวอย่างของระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทนี้ ได้แก่การทำงานของเครื่องซักผ้า ซึ่งทำงานเป็นจังหวะๆ คือ เต็มน้ำ ซัก รีดน้ำ แล้วเติมน้ำใหม่ รีดน้ำหรือ ฯลฯ แล้วหยุดเครื่องตามแต่ที่ผู้ผลิต หรือผู้ใช้ตั้งค่าเอาไว้ หรือโปรแกรมเอาไว้ เครื่องก็จะไม่ปรับตัวเองให้การทำงานให้เหมาะสมกับความสะอาด หรือสปรกของค่าในเครื่องเลย อีกตัวอย่างหนึ่ง ได้แก่ การทำงานของระบบสัญญาณไฟจราจร ที่เปลี่ยนไฟเขียวเพื่อเป็นไฟแดงตามทางแยก ผลักกันข้างละ 1-2 นาที แล้วแต่การตั้งเครื่องการทำงานของระบบสัญญาณไฟจราจรนั้นๆ จะถือว่าเป็นแบบมีการป้อนกลับได้ก็ต่อเมื่อมีการนำเอาสภาพความแออัดของรถยนต์ หรือยานพาหนะบนถนนแต่ละแยกไปบังคับการทำงาน of ระบบ เช่น นับจำนวนรถยนต์ หรือยานพาหนะ ทุกด้านตลอดเวลา แล้วเอาผลไปเปรียบเทียบกัน หรือในการให้อาหารทารกก็เช่นกัน ถือว่าเป็นระบบควบคุมที่ไม่มีการป้อนกลับ เพราะการให้อาหาร (Input ของระบบ) กับความหิวความอิ่มของทารก (Output) ไม่มีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ ความอิ่มของทารกไม่ได้นำมาบังคับการนำเอาอาหารเข้าปากทารกเลย ผู้ให้อาหารได้คะแนนในการให้อาหารครั้งที่แล้วว่าให้ไปนานแล้วจึงควรให้อาหารครั้งใหม่ได้ และสำหรับปริมาณอาหารที่คะแนนเอาไว้เช่นกัน ยกเว้น ในกรณีผู้ให้อาหารทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบค่า (Comparator) ด้วย โดยจะทำการสังเกตอาการกับกิริยาของการรับประทานอาหารของทารกว่า ทารกเริ่มอิ่มแล้วหรือไม่ จึงจะถือได้ว่าเป็นระบบวงจรมีการป้อนกลับ จึงสังเกตได้ว่า ความแม่นยำของ Controlled Variable หรือ เอาต์พุตของระบบเทียบกับ Reference Variable ของระบบในระบบควบคุมอัตโนมัตินี้จะขึ้นอยู่กับ การตั้ง การปรับ การคาดการล่วงหน้า (Calibration and Programming) เป็นสำคัญ มิฉะนั้นระบบจะทำงานอย่างผิดพลาดและไร้ประโยชน์ ฉะนั้นระบบควบคุมแบบนี้จะทำงาน โดยอาศัยจังหวะ หรือเวลาเป็นหลักเสมอ ทั้งนี้เพราะเวลาเป็นตัวแปรที่มีอยู่

(Available) และคงที่ (Consistent) เสมอ อย่างไรก็ตาม ระบบการควบคุมอัตโนมัติแบบวงจรมืด หรือแบบที่ไม่มีการป้อนกลับหากนับผู้ใช้ระบบ (System-Operator) ร่วมเข้ากับตัวเครื่องด้วย ระบบใหม่ที่ได้จะได้เป็นระบบควบคุมประเภทวงจรมืด กล่าวคือ การปิดหรือการป้อนกลับเกิดที่ตัวผู้ใช้เครื่อง เช่น ระบบสัญญาณไฟจราจรดังที่ได้กล่าวมา โดยจะมีเจ้าพนักงานจราจรเป็นผู้บังคับสัญญาณไฟ แทนการผลัดเปลี่ยนกันเองตามจังหวะเวลา (Timer) ที่ตั้งไว้ หรือ ผู้ให้อาหารทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบค่าในการให้อาหารทารกดังกล่าวแล้วด้วย

2.2.5.3 การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward Control)

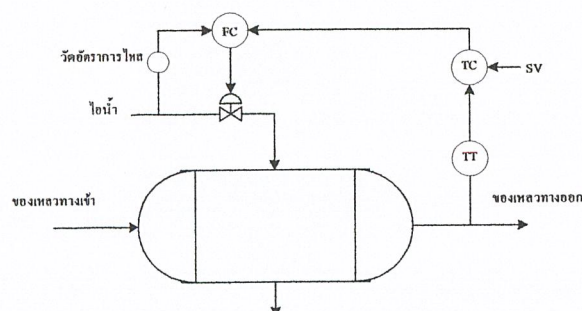
การควบคุมชนิดนี้จะสนใจกับสิ่งรบกวนที่มากระทำกับโปรเซสแล้วนำค่าของสิ่งรบกวนไปทำการคำนวณหาค่าที่จะนำไปปรับโปรเซส ก่อนที่ตัวแปรโปรเซสจะเปลี่ยนแปลงในการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของสิ่งรบกวนกับค่าเป้าหมาย และสัญญาณวัด



ภาพที่ 2.11 การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า

2.2.5.4 Cascade Control

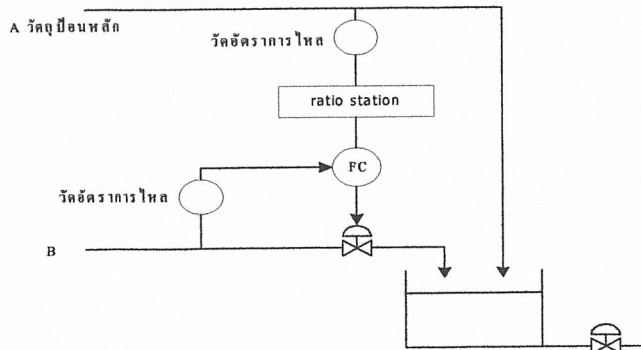
จะใช้งานเมื่อผลของการควบคุมแบบลูปเดียวไม่เป็นที่พอใจ ระบบควบคุมแบบ Cascade จะมีการควบคุมอยู่ 2 ลูป เป็นลูปควบคุมหลัก และลูปควบคุมรอง ซึ่งจะใช้เอาต์พุตของลูปหลักไปเป็นอินพุตให้กับลูปรอง



ภาพที่ 2.12 การควบคุมแบบ Cascade

2.2.5.5 Ratio Control

การควบคุมแบบ Ratio นี้จะใช้ควบคุมอัตราส่วนของตัวแปรหลายตัวให้คงที่ จะต้องกำหนดตัวแปรหนึ่งให้เป็นหลักแล้วให้ตัวแปรอื่นแปรตาม เช่น การควบคุมระหว่างอากาศ และเชื้อเพลิง ในเตาเผา และการผสมสี เป็นต้น



ภาพที่ 2.13 ระบบควบคุมการผสมวัตถุดิบ

2.3 กริยาควบคุมแบบต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมอัตโนมัติ

1. ตัวควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง (Two-position) หรือแบบ On-Off
2. ตัวควบคุมแบบ Proportional
3. ตัวควบคุมแบบ Integral
4. ตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral หรือ ตัวควบคุมแบบ PI
5. ตัวควบคุมแบบ Proportional + Derivative หรือ ตัวควบคุมแบบ PD
6. ตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral + Derivative หรือ ตัวควบคุมแบบ PID

2.3.1. การควบคุมแบบ ON-OFF หรือ 2 ตำแหน่ง

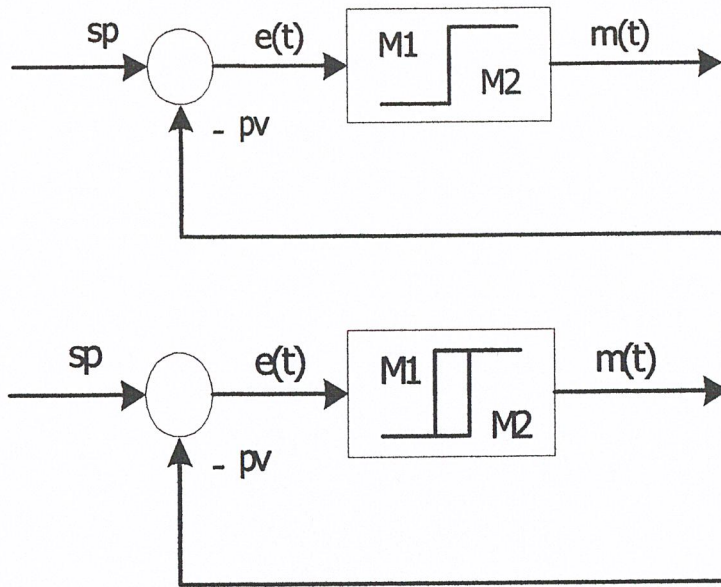
ในระบบควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง การควบคุมจะทำงานในตำแหน่งที่คงที่เพียง 2 ตำแหน่งเท่านั้น ในบางครั้งจึงมีชื่อเรียกว่า ON และ OFF การควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง หรือแบบ ON-OFF นี้จะเป็นการควบคุมแบบง่ายๆ และราคาไม่แพง ดังนั้นจึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานควบคุมทางอุตสาหกรรม และในกรณีที่เกิดจากการ Oscillate นั้นเป็นที่ยอมรับได้

กำหนดให้สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น $m(t)$ และสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเป็น $e(t)$ ฉะนั้นในการควบคุมแบบ 2 ตำแหน่งนั้น สัญญาณ $m(t)$ จะมีค่าอยู่เพียงค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดเท่านั้น โดยจะขึ้นอยู่กับว่าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเป็น + หรือเป็น - นั่นคือ

$$m(t) = M_1 \quad \text{สำหรับ } e(t) > 0 ; \text{ โดยที่ } M_1 \text{ และ } M_2 \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$= M_2 \quad \text{สำหรับ } e(t) < 0$$

ภาพที่ 2.14 แสดงถึง Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง และสำหรับช่วงซึ่งสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปก่อนเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง (Switching) ของการควบคุม นั้นเรียกว่า Differential Gap ดังแสดงในภาพที่ 2.14 ช่วง Differential Gap นี้บางครั้งเป็นการทำให้เกิดขึ้นเพื่อป้องกันการ ON-OFF บ่อยเกินไป



ภาพที่ 2.14 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง หรือแบบ ON-OFF

2.3.2 การควบคุมแบบ Proportional

ในกระบวนการบางอย่างการควบคุมแบบ 2 ตำแหน่งจะไม่ใช่วิธีที่ดี ดังนั้นถ้าต้องการความแน่นอนในการควบคุมพลังงานไหลเข้าเพื่อให้เป็นสัดส่วน (Proportional) กับค่าที่ต้องการ เราต้องใช้การควบคุมแบบ Proportional ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม (หรือเอาต์พุตของตัวควบคุม) $m(t)$ กับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ คือ

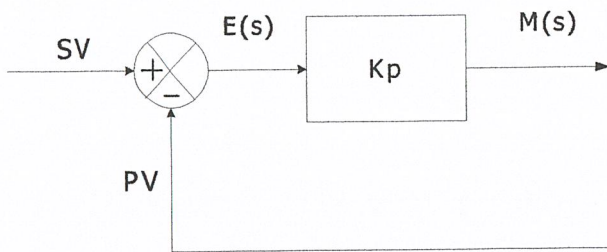
$$m(t) = K_p e(t)$$

หรือ

$$\frac{m(s)}{e(s)} = K_p$$

โดยที่ K_p จะอยู่ในเทอมของ Proportional Sensitivity หรือ Gain

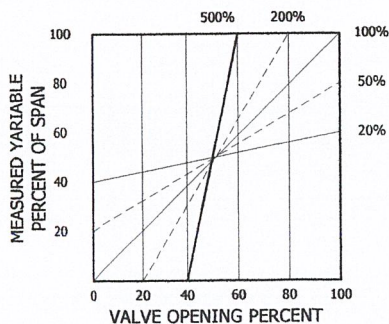
ตัวควบคุมแบบ Proportional จึงต้องเป็นแอมพลิฟายที่สามารถปรับค่าของ Gain ได้ภาพที่ 2.15 แสดงถึง Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Proportional



ภาพที่ 2.15 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Proportional

สมมติว่า เอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุม นำไปควบคุมช่วงชักของวาล์วในการควบคุมแบบ Proportional นั้น โดยทั่วไปแล้วช่วงชักของวาล์วจะถูกแบ่งเป็นส่วนๆ เท่ากับจำนวนส่วนของการเพิ่มที่ลดส่วนในช่วงการวัด เช่น ถ้าช่วงของการวัดมีค่า 100°F ค่าของการวัดจะเปลี่ยนแปลงทีละ 1°F ซึ่งหมายถึงว่า ช่วงของการวัดจะถูกแบ่งออกเป็น 100 ส่วน ดังนั้นช่วงชักวาล์วจะถูกแบ่งออกเป็น 100 ส่วนด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการวัดกับช่วงชักของวาล์วแบบอื่น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.16 ซึ่งมี Proportional Bands (PB) ต่างๆ กันตั้งแต่ 20% ถึง 500%



ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการวัด กับช่วงชักของวาล์ว เมื่อมีค่าPBตั้งแต่20%ถึง 500%

ตัวควบคุมแบบ Proportional คือ แอมพลิฟายด์วาล์วหนึ่งที่ต่ออยู่ระหว่างอุปกรณ์วัดกับวาล์วควบคุม เมื่อปรับค่าของ Proportional Band ก็เท่ากับปรับค่าของ Gain ของแอมพลิฟายด์ ทั้งนี้เพราะค่าของ Gain คือ ส่วนกลับของ Proportional Band การปรับค่าของ Gain จะทำให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการวัดกับช่วงของวาล์วเปลี่ยนแปลงไปตามความต้องการได้

การเกิด Offset เป็นคุณลักษณะของระบบควบคุมแบบ Proportional ทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของระบบควบคุมแบบ Proportional นั้นไม่สามารถควบคุมระบบที่มี Load เปลี่ยนแปลงได้ดีเท่าที่ควร และในกรณีที่ Load คงที่แต่เปลี่ยนค่าของระดับของเหลวที่ถูกควบคุมไปก็เช่นเดียวกัน คือ จะเกิดมี Offset ขึ้น และเมื่อระบบควบคุมที่มีการควบคุมแบบ Proportional เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่นั้น Offset จะต้องมีขนาดไม่เกินครึ่งหนึ่งของ Proportional Band แล้ววาล์วควบคุมก็จะเปิดเต็มที่หรือปิดสนิท และ

ตัวควบคุมก็จะไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้อีก ดังนั้นการควบคุมแบบ Proportional โดยทั่วๆ ไป จึงเหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการ Proportional Band แคบๆ

2.3.3 การควบคุมแบบ Integral

ในการควบคุมแบบ Integral ค่าของเอาต์พุตของตัวควบคุม $m(t)$ จะมีความสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อน K_p ดังนี้

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i e(t)$$

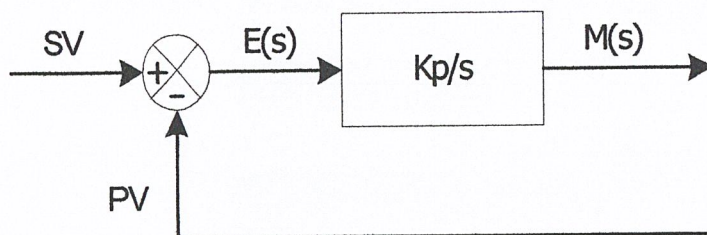
$$\text{หรือ} \quad m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

โดยที่ K_i เป็นค่าที่คงที่สามารถปรับค่าได้

Transfer Function ของตัวควบคุมแบบ Integral คือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

Block Diagram ของตัวควบคุม Integral แสดงดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Integral
 กรียาการควบคุมแบบ Integral นี้ บางครั้งเรียกว่า Reset Control

2.3.4 การควบคุมแบบ Proportional + Integral (PI)

กรียาการควบคุมแบบ PI สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

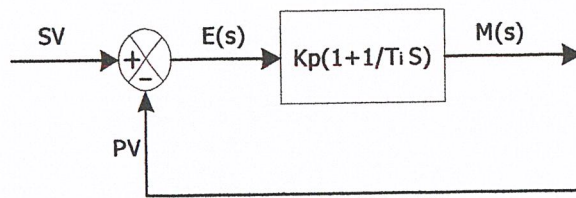
$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \left(\int_0^t e(t) dt \right)$$

หรือ
$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

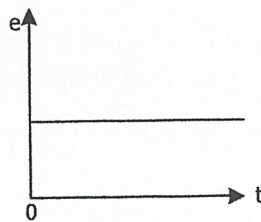
โดยที่ K_p เป็นค่าของ Proportional Sensitivity หรือ Gain

T_i เป็นค่าของ Integral Time

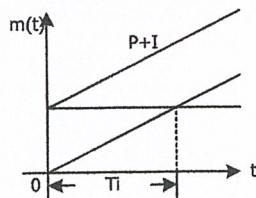
ทั้ง K_p และ T_i เป็นค่าที่ปรับได้ ค่าส่วนกลับของ T_i นั้นจะเรียกว่า “Reset rate” ภาพที่ 2.18 (ก) แสดงถึง Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral ถ้าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ เป็นสัญญาณแบบ Unit step ดังแสดงในภาพที่ 2.18 (ข) แล้ว สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI จะแสดงได้ดังภาพที่ 2.18 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2.18 ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PI

ข) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step

ค) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI เมื่ออินพุตเป็นแบบ Unit step

2.3.5 การควบคุมแบบ Proportional + Derivative (PD)

กริยาการควบคุมแบบ PD สามารถเขียนให้อยู่ในภาพของสมการได้ดังต่อไปนี้

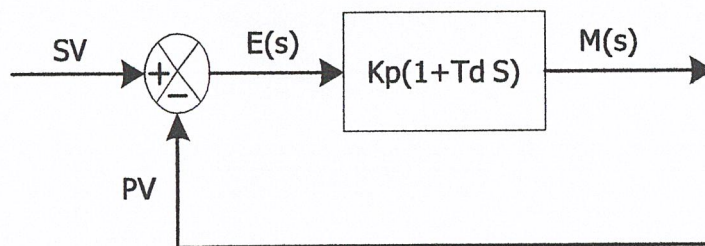
$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

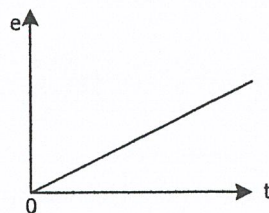
โดยที่ K_p เป็นค่าของ Proportional Sensitivity หรือ Gain

T_d เป็นค่าของ Derivative Time

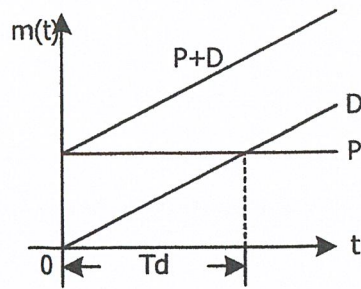
ค่าของ K_p และ T_d นั้นจะเป็นค่าที่สามารถปรับได้ และในบางครั้งจะเรียกกริยาควบคุมแบบ Derivative ว่า “rate Control” ทั้งนี้เพราะขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน ภาพที่ 2.19 (ก) แสดงถึง Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PD ถ้าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ เป็น unit ramp ดังแสดงในภาพที่ 2.19 (ข) แล้วสัญญาณเอาต์พุต $m(t)$ ของตัวควบคุมแบบ PD จะเป็นดังภาพที่ 2.19 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2.19 ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PD

ข) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step

ค) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PD

กระบวนการจำนวนมากอาจจะมี ความจุ และความต้านทานมากกว่าหนึ่ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นในกระบวนการจึงอาจทำให้เกิดมี Time Lag ที่มีค่ามากพอได้ กระบวนการที่มีปัญหาเกี่ยวกับ Time Lag มากๆ คือ กระบวนการที่เกี่ยวกับความร้อนการควบคุมแบบ Derivative นี้จะแก้ไขเกี่ยวกับระบบที่มี Time Lag มากๆ ได้ ในบางครั้งกริยาควบคุมแบบ Derivative นี้เรียกว่า กริยาควบคุมแบบ “คาดการณ์ ล่วงหน้า”

2.3.6 การควบคุมแบบ Proportional + Integral + Derivative (PID)

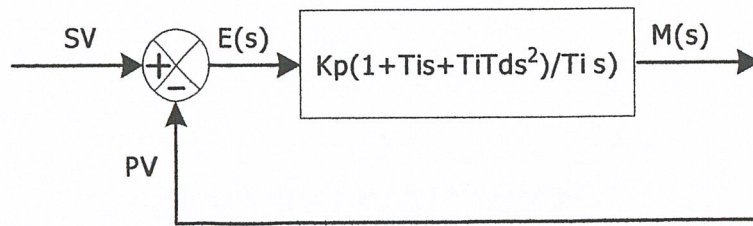
การควบคุมแบบ PID นี้ได้จากการเอากริยาควบคุมแบบ Proportional กริยาการควบคุมแบบ Integral และกริยาควบคุมแบบ Derivative เข้าด้วยกัน กริยาการควบคุมแบบ PID ของตัวควบคุมอัตโนมัติสามารถแสดงในภาพของสมการต่อไปนี้

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

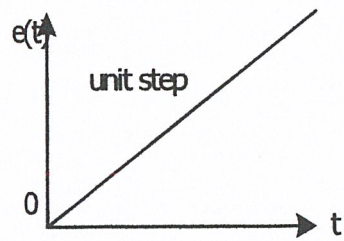
Transfer function คือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

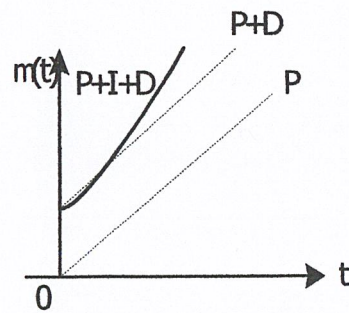
Block Diagram อินพุต และเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PID แสดงได้ดังภาพที่ 2.20



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2.20 ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PID

ข) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step

ค) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PID

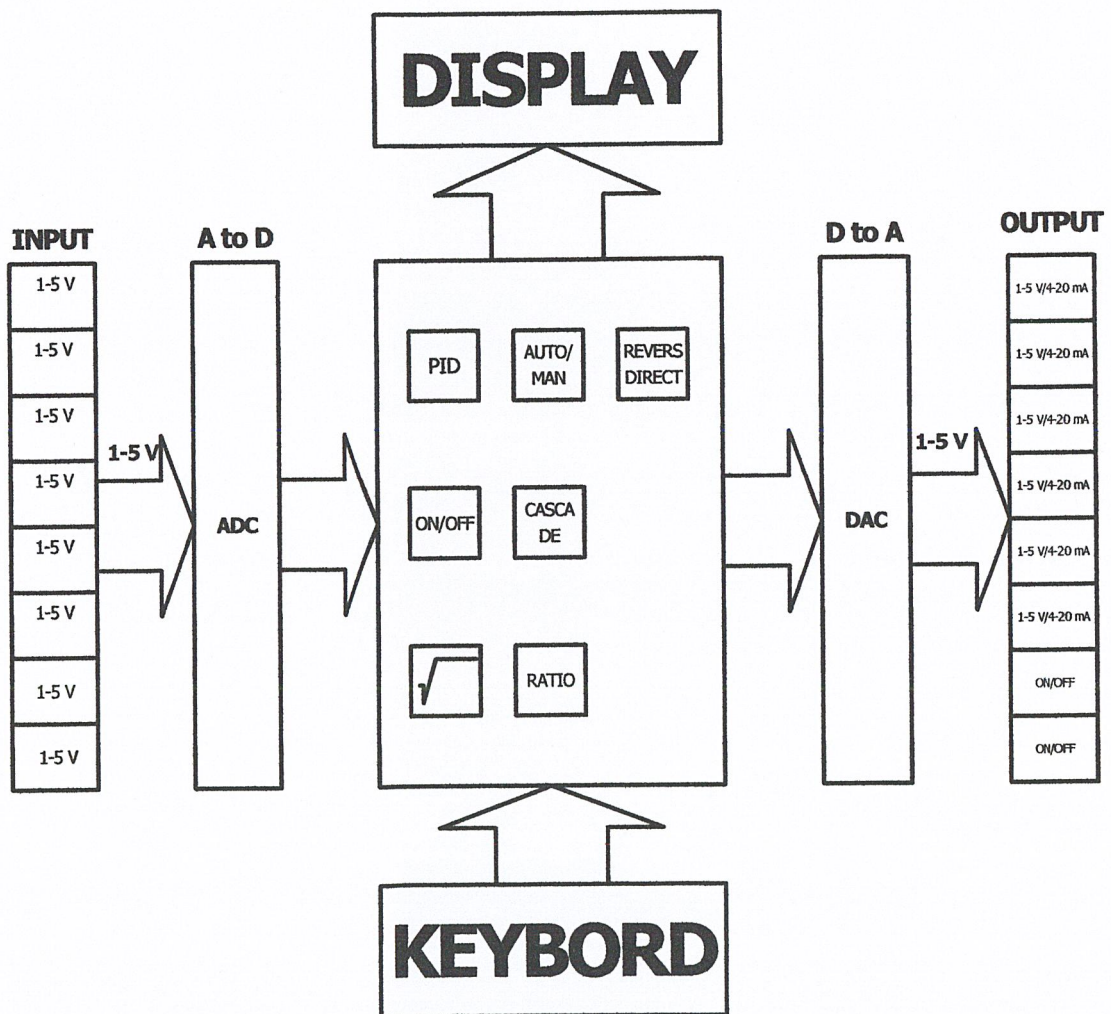
บทที่ 3

การทำงานของเครื่องควบคุม

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้อธิบายถึงหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องควบคุมทุกส่วนประกอบ เช่น สัญญาณที่ใช้ในส่วนของอินพุต-เอาต์พุต ในส่วนประมวลผล และได้อธิบายฟังก์ชันการทำงานรวมถึงโหมดการทำงานของเครื่องควบคุม เช่น การทำงานแบบ Standard PID Controller, Remote SV setting PID control, Auto/Manual Station และ Cascade PID controller

3.2 โครงสร้างโดยรวม



ภาพที่ 3.1 แสดงโครงสร้างโดยรวม

3.3 การทำงานของเครื่องควบคุม

เครื่องควบคุมนี้มีการทำงาน แบบ 8 ลูปการควบคุม คือ สามารถควบคุมได้ 8 Setpoint จึงแบ่งส่วนพิจารณาออกเป็น 3 ส่วน คือ

3.3.1 ส่วนอินพุต

ส่วนอินพุตจะแบ่งเป็น 8 ช่องสัญญาณ โดยจะเป็นช่องรับสัญญาณแรงดันมาตรฐาน 1-5 V ทั้ง 8 ช่องสัญญาณ แรงดันที่เป็นอินพุตจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลก่อนส่งให้กับหน่วยประมวลผล โดยสามารถกำหนดช่องรับสัญญาณอินพุตได้อย่างอิสระ เช่น ลูปควบคุมที่ 1 ใช้ช่องสัญญาณอินพุตช่องที่ 4 และ ลูปควบคุมที่ 4 ใช้ช่องสัญญาณอินพุตช่องที่ 5 เป็นต้น

3.3.2 ส่วนประมวลผล

ส่วนประมวลผล ทำหน้าที่คำนวณการทำงานตามฟังก์ชันที่เลือกไว้เพื่อที่จะใช้งานซึ่ง ฟังก์ชันที่มีให้เลือกใช้ คือ 1.PID, 2. ON-OFF, 3. Square Root, 4. Auto/Manual, 5. Revers/Direct Action, 6. Cascade, 7. Ratio เมื่อเลือกฟังก์ชันที่ต้องการแล้วจะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้กับฟังก์ชันนั้นด้วย โดยจะเริ่มคำนวณเมื่อส่วนอินพุตส่งสัญญาณ 1-5 V ผ่านมายัง A/D เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อนำไปคำนวณ เมื่อคำนวณเสร็จแล้วส่วนประมวลผลจะส่งสัญญาณดิจิตอลผ่าน D/A เพื่อเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาลอกแล้วส่งไปส่วนเอาต์พุต

3.3.3 ส่วนคีย์ควบคุม

จะใช้ในการเลือกฟังก์ชันหรือกำหนดค่าคุณสมบัติต่างๆ ให้กับตัวคอนโทรลเลอร์โดยจะใช้เป็นแบบ คีย์เมตริกซ์ขนาด 4x4 (4หลัก 4 แถว)

3.3.4 ส่วนแสดงผล

จะใช้จอ LCD เป็นตัวแสดงผลค่าต่างๆของเครื่องควบคุม สำหรับ LCD จะใช้ขนาด 4x20 ก็คือ 4 บรรทัด บรรทัดละ 20 ตัวอักษร

3.3.5 ส่วนเอาต์พุต

จะรับสัญญาณ Analog มาจาก DAC ซึ่งเป็นค่า MV ที่ใช้ควบคุมมาทำการแปลงให้เป็นกระแส 4-20 mA จำนวน 6 ช่องสัญญาณ และเป็น Relay Output อีก 2 ช่องสัญญาณ โดยที่ลูปควบคุมแต่ละลูปสามารถกำหนดช่องสัญญาณเอาต์พุตได้อย่างอิสระเหมือนกับอินพุต

3.4 ฟังก์ชันการทำงาน

3.4.1 ฟังก์ชัน PID

PID คือ กริยาควบคุมอัตโนมัติที่เป็นตัวปรับค่าของกระบวนการ โดยส่งสัญญาณออกไปควบคุมกระบวนการให้ได้ตามค่าเป้าหมาย ตามสมการ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

สมการที่นำไปเขียนใน Microcontroller คือ

$$M_v = M_{v-1} + K_p (e_n - e_{n-1}) + \frac{K_p}{T_i} T e_n + \frac{K_p}{T} T_d (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})$$

T = Sampling Time

จากสมการพบว่ามีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง คือ K_p , T_i , T_d เป็นตัวแปรที่ทำให้สัญญาณ M_v ที่ได้ไปควบคุมกระบวนการให้ได้เท่ากับค่าเป้าหมาย ค่าพารามิเตอร์นั้นสามารถคำนวณได้หลายวิธี เช่น วิธีการของ Zigler Nicole หรือ Reaction Curve เป็นต้น

3.4.2 ฟังก์ชัน ON-OFF

คือ กริยาควบคุมอัตโนมัติที่ส่งสัญญาณออกไปควบคุมกระบวนการให้ได้ค่าตามค่าเป้าหมาย แบบ แบบ 2 ตำแหน่ง เมื่อนำค่าความผิดพลาดมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย และจะบวกค่า Gap เข้าไปด้วย เพื่อเพิ่มช่วงเวลาในการตัดต่อการทำงานให้มากขึ้น โดยมีการเทียบค่าตามสมการ

$$P_v < \left(S_v - \frac{Gap}{2} \right) ; M_v = 1$$

$$P_v > \left(S_v + \frac{Gap}{2} \right) ; M_v = 0$$

3.4.3 ฟังก์ชัน Square Root

เนื่องจากค่า PV ที่วัดจากกระบวนการที่เป็นการวัดอัตราการไหล จะมีค่าเป็นกำลังสองของค่าจริง ดังนั้นเมื่อต้องการนำค่า PV ไปคำนวณจะต้องทำการถอด Square Root ก่อนจึงนำไปคำนวณ

3.4.4 ฟังก์ชัน Auto Manual

คือ ฟังก์ชันที่ใช้เลือกสัญญาณจากส่วนประมวลให้มีลักษณะอัตโนมัติ(Auto) หรือ สามารถเลือกค่าปรับสัญญาณได้ตามความเหมาะสมกับกระบวนการ(Manual)

3.4.5 ฟังก์ชัน Revers Direct Action

คือ ฟังก์ชันที่เป็นตัวปรับสัญญาณจากส่วนประมวลให้เหมาะสมกับ Final control element เช่น วาล์ว ซึ่งมี 2 ลักษณะ คือ Air to Close และ Air to Open ฟังก์ชัน Reverse จะทำการกลับสัญญาณจากส่วนประมวลให้เป็นไปตามสมการ

$$MV=100-MV$$

3.4.6 ฟังก์ชัน Cascade

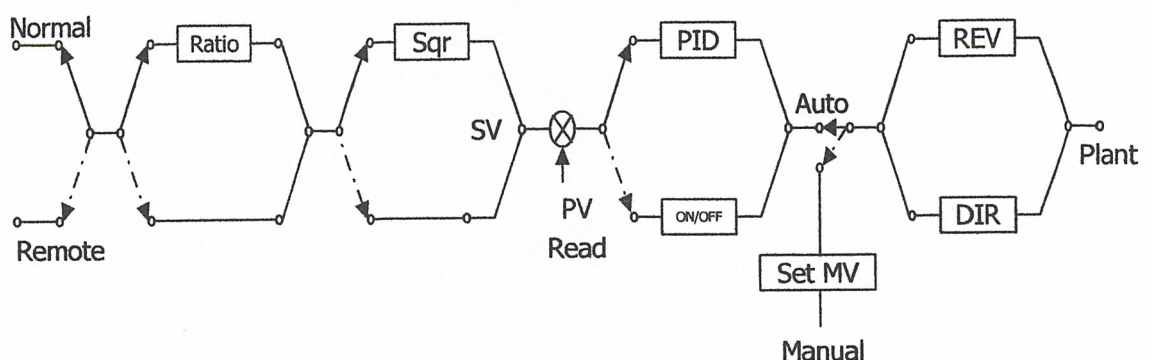
คือ การแบ่งรูปการควบคุมออกเป็น Master, Slave โดยสัญญาณเอาต์พุตจากรูป Master จะเป็นค่าเป้าหมายของรูปการควบคุม Slave

3.4.7 ฟังก์ชัน Ratio

คือฟังก์ชันสำหรับการควบคุมค่าเป้าหมายให้แปรไปตามอัตราส่วนของตัวแปรตัวอื่นจะใช้กับส่วนของ remote setpoint เช่น ต้องการผสมสาร ก และสาร ข ให้มีอัตราส่วน 1:10 จะต้องทำการวัดปริมาณของสาร ก แล้ว ป้อนเป็นค่าเป้าหมายให้รูปที่ควบคุมสาร ข โดยต้องใส่ค่าอัตราส่วนเท่ากับ 10

3.5 รูปแบบการทำงานของเครื่องควบคุม

ออกแบบโปรแกรมให้แต่ละ Loop ทำงานตาม Block Diagram ดังรูปต่อไปนี้



ภาพที่ 3.2 แสดงการทำงานของ Standard PID/On-off Controller

จากรูปใน Block แรกจะเป็นการเลือกที่จะใช้โหมดการทำงานของ Normal หรือโหมดการทำงานของ Remote ส่วนใน Block 2 นั้นจะเป็นการเลือกที่จะใช้ Function ของ Ratio หรือไม่ ถ้าจะใช้งานก็โปรแกรมให้ใช้งาน Block ของ Ratio แต่ถ้าไม่ใช้งานก็ไม่ต้องเลือกใช้งาน ส่วนใน Block 3 นั้นจะเป็นการเลือกที่จะใช้ Function ของ Sqr หรือไม่ ถ้าจะใช้งานก็โปรแกรมให้ใช้งาน Block ของ Sqr แต่ถ้าไม่ใช้งานก็ไม่ต้องเลือกใช้งาน ต่อมาก็นำสัญญาณ SV ไปลบกับสัญญาณ PV แล้วนำผลของสัญญาณที่ลบกันไปเข้าสู่โหมดการทำงานของ PID ซึ่งต้องโปรแกรมให้ใช้งาน Block ของ PID แต่ถ้าต้องการเข้าสู่โหมดการทำงานของ ON/OFF ต้องโปรแกรมให้ใช้งาน Block ของ ON/OFF ซึ่งในส่วนที่ได้อธิบายผ่านไปนั้นจะเป็นการทำงานโดยรวมของโหมด Auto และสามารถทำงานในโหมด Manual ก็ได้ ซึ่งใน Block สุดท้ายจะเลือกโดยใช้แบบ REV หรือ DIR โดยจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับ PLANT ที่ต้องการจะควบคุม

บทที่ 4

การออกแบบและการสร้างเครื่องควบคุม

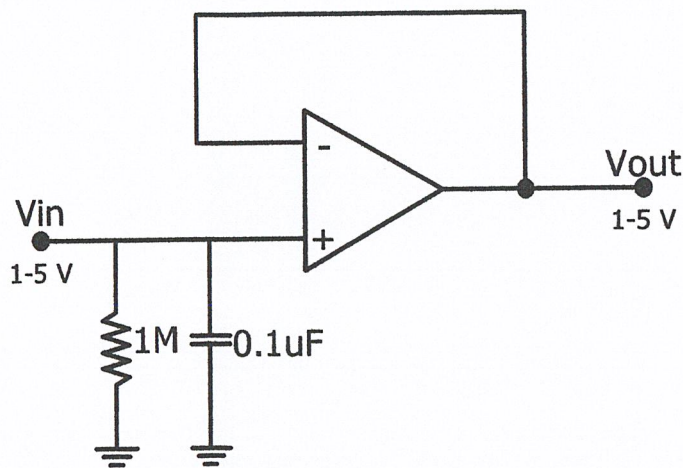
4.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบเครื่องควบคุมนี้ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนของ Hard ware และส่วนของ Soft ware ส่วนของ hare ware จะประกอบด้วย 5 ส่วนย่อยๆ คือ Input, CPU, Key, Display และ Output ส่วนของ Software ก็จะหมายถึง Block Diagram ที่บอกถึงการออกแบบโปรแกรม คร่าวๆ

4.2 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์

4.2.1 ส่วนอินพุต







ประกอบด้วยส่วนรับสัญญาณ 8 ส่วน คือ



ภาพที่ 4.1 วงจรช่องรับสัญญาณมาตรฐาน 1-5 V

อินพุตของตัวควบคุมจะรับสัญญาณแรงดันมาตรฐาน 1-5 V เข้ามาก่อนที่จะส่งต่อให้ ADC ทำการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยที่แรงดันที่อินพุตเข้ามาทาง Buffer และผ่าน R/C เพื่อลดสัญญาณรบกวน

4.2.2 ส่วนของคีย์ควบคุม

P I D S E T	I N P U T C H A N N A L	O U T P U T C H A N N A L	↑
ON-OFF S E T	 1	 1	 1
CASCADE R A T I O	 2	 2	 2
S C A L L A L A R M	A U T O M A N	R E V D I R	R U N O F F

ภาพที่ 4.2 แสดงคีย์ควบคุมแบบต่างๆ

การออกแบบและการทำงานของคีย์

ในการออกแบบส่วนของคีย์ควบคุมจะมีอยู่ด้วยกัน 16 คีย์ การทำงานจะมี 2 หน้าหลักๆ คือ 1 ใช้เป็นคีย์ที่เป็นฟังก์ชัน 2 ใช้เป็นคีย์ทำงานทั่วไป รายละเอียดของแต่ละคีย์มีดังนี้

P I D
S E T

1. เป็นคีย์ฟังก์ชันที่ใช้ในการเข้าและออกสู่การตั้งค่า Parameter ต่างๆของลูปควบคุมแบบ PID ลูปที่ 1-6 เช่นการปรับแต่งค่า Kp, Ti และ Td

O N - O F F
S E T

2. เป็นคีย์ฟังก์ชันที่ใช้ในการเข้าและออกสู่การตั้งค่า Gap ของลูปควบคุมแบบ ON-OFF ลูปที่ 7 และ 8

C A S C A D E
R A T I O

3. เป็นคีย์ฟังก์ชันที่ใช้ในการเข้าและออกสู่การตั้งค่าเกี่ยวกับชนิดของการควบคุมถึงจะตั้งเป็นการทำงานแบบ Cascade หรือเป็น Ratio Control ก็ได้ ฟังก์ชันนี้จะใช้ได้กับลูปควบคุมแบบ PID ลูปที่ 1-6 เท่านั้น

S C A L L
A L A R M

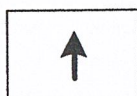
4. เป็นคีย์ฟังก์ชันที่ใช้ในการเข้าและออกสู่การตั้งค่า scale และ alarm ของลูปควบคุมแบบ PID และ ON-OFF ทั้ง 8 ลูป

INPUT
CHANNEL

5. เป็นคีย์ที่ใช้ในการเลือกช่องสัญญาณอินพุตของเครื่องควบคุมแต่ละลูบ โดยจะใช้ตั้งค่าอินพุตได้เฉพาะตอนที่ลูบยังไม่ถูก run เท่านั้น

OUTPUT
CHANNEL

6. เป็นคีย์ที่ใช้ในการเลือกช่องสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องควบคุมแต่ละลูบ โดยจะใช้ตั้งค่าเอาต์พุตได้เฉพาะตอนที่ลูบยังไม่ถูก run เช่นกัน



7. เป็นคีย์ที่ใช้เปลี่ยนลูบที่จะดู เช่น ถ้ากำลังดูลูบที่ 1 อยู่และอยากดูลูบที่ 3 ก็ต้องกดปุ่มนี้อีก 2 ครั้ง



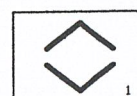
8. เป็นคีย์ที่ใช้ทำงาน 2 ลักษณะคือ

- 1.) ในหน้าจอหลัก คีย์นี้จะทำหน้าที่เพิ่มค่า SV ขึ้นอย่างช้าๆ
- 2.) ในหน้าจอของฟังก์ชันต่างๆ คีย์นี้จะทำหน้าที่เพิ่มค่า Parameter ที่มี Pointer ชี้อยู่อย่างช้าๆเช่นกัน

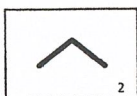


9. เป็นคีย์ที่ใช้ทำงาน 2 ลักษณะคือ

- 1.) ในหน้าจอหลัก คีย์นี้จะทำหน้าที่ลดค่า SV ลงอย่างช้าๆ
- 2.) ในหน้าจอของฟังก์ชันต่างๆ คีย์นี้จะทำหน้าที่ลดค่า Parameter ที่มี Pointer ชี้อยู่อย่างช้าๆเช่นกัน

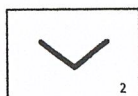


10. จะเป็นคีย์ที่ใช้ร่วมกับคีย์ที่ 8 และ 9 เพื่อให้เกิดการเพิ่มค่าหรือลดค่าได้อย่างรวดเร็วขึ้น



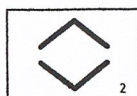
11. เป็นคีย์ที่ใช้งาน 2 ลักษณะคือ

- 1.) ในหน้าจอหลัก คีย์นี้จะทำหน้าที่เพิ่มค่า MV ขึ้นอย่างช้าๆ
- 2.) ในหน้าจอของฟังก์ชันต่างๆ คีย์นี้จะทำหน้าที่เลื่อน Pointer ขึ้นด้านบน 1 บรรทัด แต่ถ้า Pointer อยู่ด้านบนสุดแล้ว ถูกกดอีก Pointer ก็จะกระโดดลงไปเริ่มต้นที่บรรทัดล่างสุดอีก



12. เป็นคีย์ที่ใช้ทำงาน 2 ลักษณะคือ

- 1.) ในหน้าจอหลัก คีย์นี้จะทำหน้าที่ลดค่า MV ลงอย่างช้าๆ
- 2.) ในหน้าจอของฟังก์ชันต่างๆ คีย์นี้จะทำหน้าที่เลื่อน Pointer ลงด้านล่างทีละ 1 บรรทัด แต่ถ้า Pointer อยู่ด้านล่างสุดแล้ว ถูกกดอีก Pointer ก็จะกระโดดขึ้นไปเริ่มต้นที่บรรทัดบนสุดอีก



13. เป็นคีย์ที่ใช้ร่วมกับคีย์ที่ 11 และ 12 เพื่อที่จะทำให้เพิ่มค่าหรือลดค่า MV ได้อย่างรวดเร็วในหน้าจอหลักเท่านั้น



14. เป็นคีย์ที่ใช้ในการตั้งค่ารูป เพื่อจะเลือกว่าจะให้ MV มีค่าไปตามกริยาควบคุม PID หรือ ON-OFF หรือไม่ ถ้าจะให้เป็นไปตามกริยาควบคุมก็กดปุ่ม AUTO แต่ถ้าจะปรับแต่งค่า MV เองก็กดปุ่ม MAN



15. เป็นคีย์ที่ใช้ในการตั้งค่ารูป เพื่อกำหนด action ของตัวควบคุม จะเป็นแบบ Direct หรือ Reverse

R U N
O F F

16. เป็นคีย์ที่ใช้ในการเปิดหรือปิดการทำงานของแต่ละอุปกรณ์

4.2.3 ส่วนแสดงผล

หน่วยแสดงผลแบบ LCD ออกแบบให้ใช้งานกับ LCD ขนาด 4 บรรทัด 20 ตัวอักษรเพราะว่าจะแสดงค่าต่างๆได้ละเอียดใน Display เดียว ใช้การเชื่อมต่อแบบ 8 บิต

4.2.4 ส่วนประมวลผลและอุปกรณ์เสริม

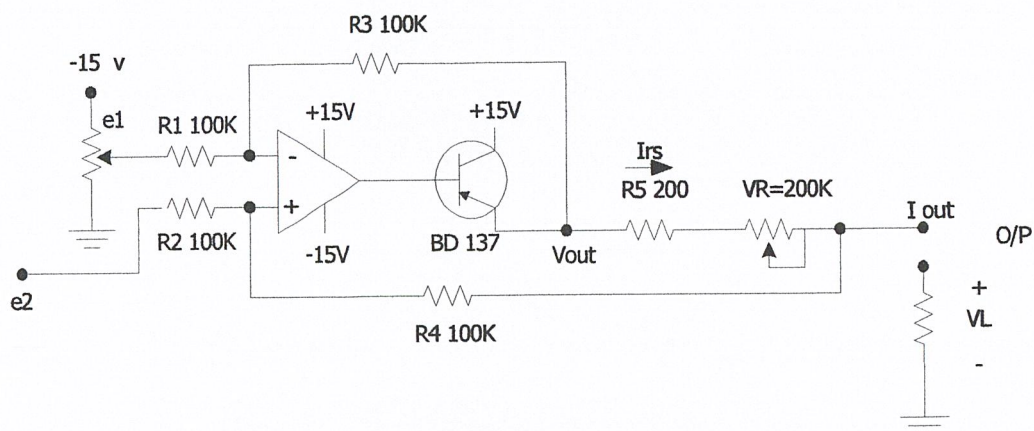
ในส่วนนี้ถือว่าเป็นหัวใจของเครื่องควบคุมเลขก็ได้ จะประกอบด้วย CPU และอุปกรณ์เสริมต่างๆดังนี้

- CPU 89C51 RD2
- ADC 10bit 8ch
- DAC 8bit 8ch
- Max-232
- 7805 power supply

4.2.5 ส่วนเอาต์พุต

ประกอบด้วย 8 ช่องสัญญาณ คือ

1. ช่องส่งสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA จำนวน 6 ช่องสัญญาณ



ภาพที่ 4.3 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5 V เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA

หลักการงานจะรับสัญญาณมาตรฐาน 0-5 V ที่ส่งมาจาก หน่วยประมวลผล และผ่านวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้า 0-5 V เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง 4-20 mA ดังแสดงในภาพที่ 4.3 วงจรขยายความแตกต่างแรงดันไฟฟ้าดังในภาพที่ 4.3 ถ้าความต้านทานไฟฟ้า R_1, R_2, R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากันทั้งหมดในการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าใช้วิธีการทับซ้อน (Superposition) ซึ่งจะได้

$$V_{out} = V_L + e_2 - e_1$$

แรงดันตกคร่อม R_s คือ

$$\begin{aligned} V_{RS} &= V_{OUT} - V_L \\ &= (V_L + e_2 - e_1) - V_L \\ &= e_2 - e_1 \end{aligned}$$

และมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_s คือ $I_{RS} = \frac{V_{RS}}{R_s}$ และ $I_L = I_{RS} = \frac{e_2 - e_1}{R_s}$

$$\text{จาก } I_L = I_{RS} = \frac{e_2 - e_1}{R_s}$$

$$e_2 = e_m$$

$$I_L \cdot R_s = e_m - e_1$$

$$\text{ที่ } e_m = 0V; I_L = 4mA$$

$$(4mA)R_s = 5V - e_1 \quad e_1 = -1.25V \quad (4.1)$$

$$\text{ที่ } e_m = 5V; I_L = 20mA$$

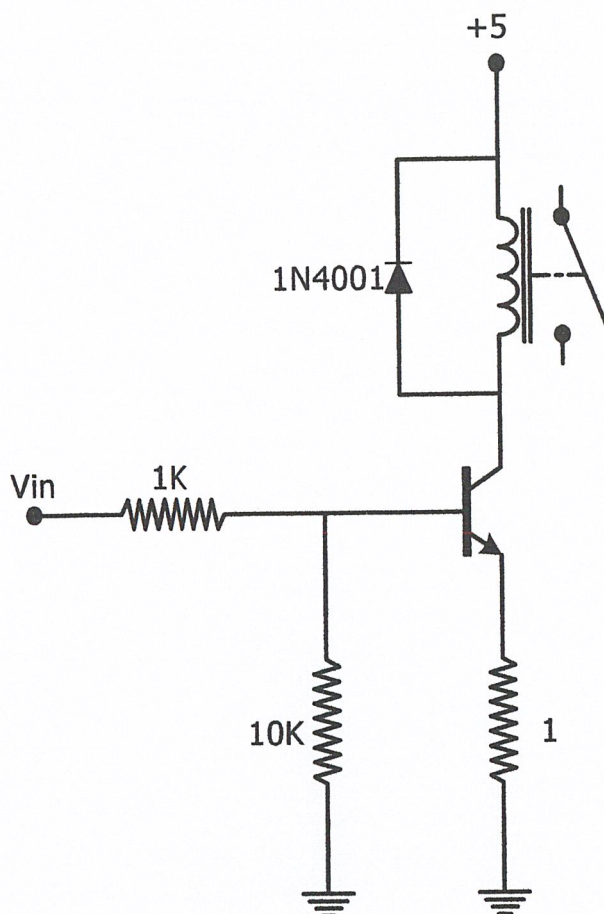
$$(20mA)R_s = 5V - e_1 \quad (4.2)$$

นำสมการ (4.1) ลบด้วยสมการ (4.2)

$$\text{จะได้ } R_s = 312.5 \Omega$$

แทนค่า R_s ลงในสมการที่ (3.1) จะได้ $e_1 = -1.25V$

2. ช่องส่งสัญญาณ ON-OFF จำนวน 2 ช่องสัญญาณ



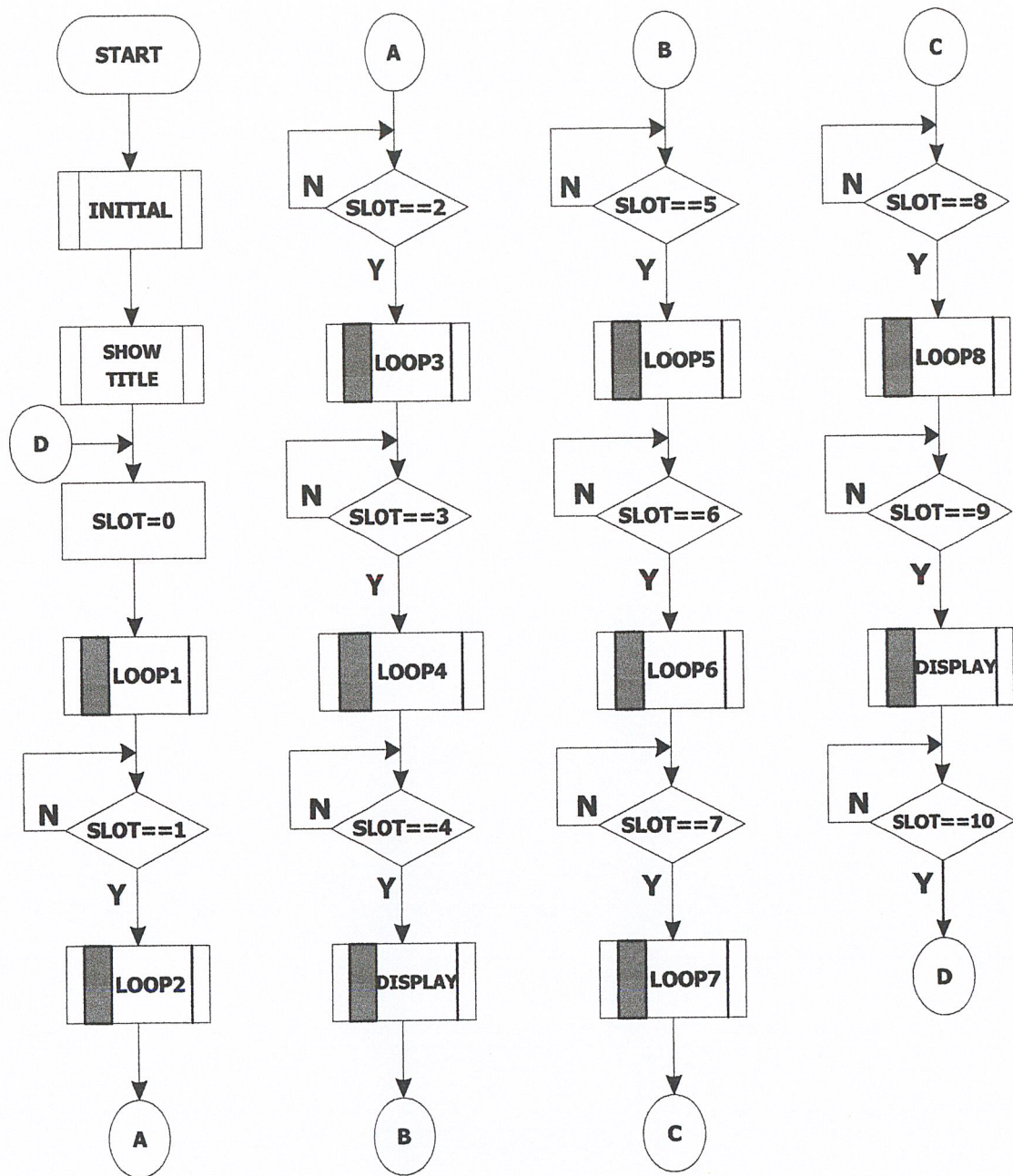
ภาพที่ 4.4 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5 V เป็นสัญญาณ ON - OFF

4.3 การออกแบบทางด้าน Soft Ware

โปรแกรมในการใช้ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ทำงานเป็นตัวควบคุม ในที่นี่จะใช้ภาษา C ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายและมีคำสั่งต่างๆให้เลือกมากมาย สะดวกในการใช้สมการศาสตร์ โปรแกรมของเครื่องควบคุมนี้จะออกแบบให้มีการทำงานแบบ time slot ดังแสดงให้เห็นใน flow chart และ loop sup program

4.3.1 Main Flow Chart

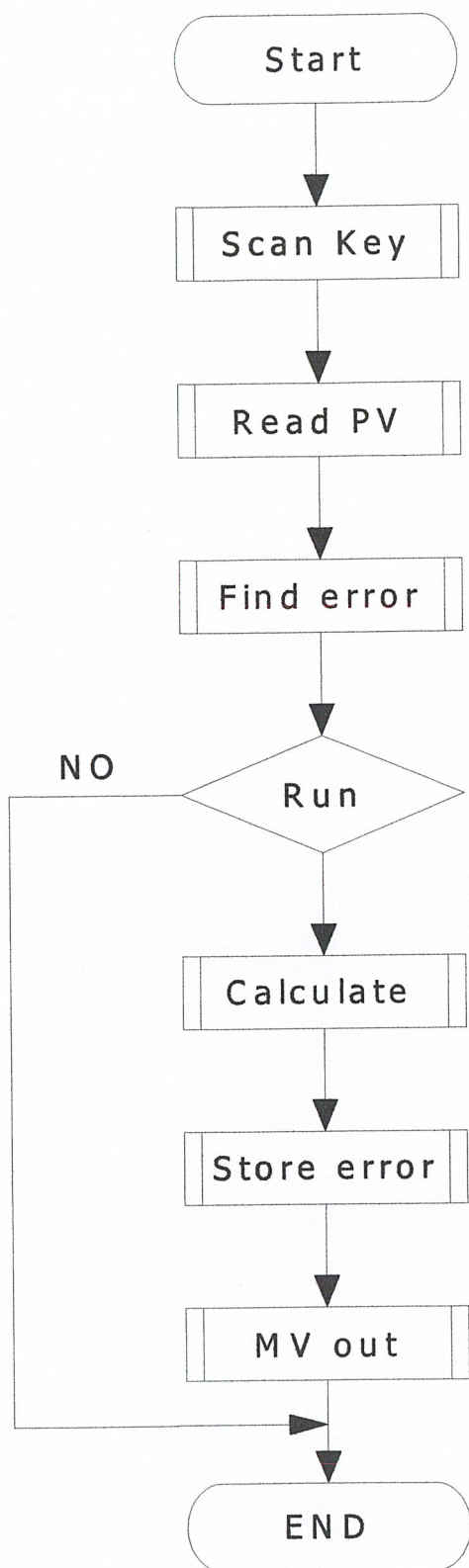
สำหรับ main flow chart การออกแบบจะใช้หลักการของ time slot คือ จะแบ่งการทำงานของ แต่ละส่วนออกจากกันด้วยเวลาที่แน่นอน ในที่นี่แต่ละ loop จะใช้เวลา 0.05 sec หรือ 50 msec และ loop ที่ใช้ในการแสดงผลบนจอ LCD อีก 2 loop loop ละ 50 msec เช่นกันดังนั้นจะได้ scan time ทั้งหมดของ ระบบเท่ากับ $10 \text{ loop} \times 50 \text{ msec} = 0.5 \text{ sec}$



ภาพที่ 4.5 แสดง Main Flow Chart

4.3.2 Loop Sub Program

สำหรับ loop sub program เริ่มต้นก็จะทำการเรียกโปรแกรม scan key จากนั้นก็จะอ่านค่า PV ที่ได้จาก ADC มาเก็บ ทำการคำนวณหาค่า error จากนั้นก็จะตรวจสอบดูว่า loop ถูก run อยู่ไหมถ้าไม่ก็จะจบในส่วนของ loop sub program แต่ถ้า loop run อยู่ ก็จะทำการคิดหาค่า MV ตามสมการ PID หรือ ON-OFF ออกมา ทำการเก็บค่า error แล้วจึงส่งค่าตามที่ได้ออกไปยัง DAC

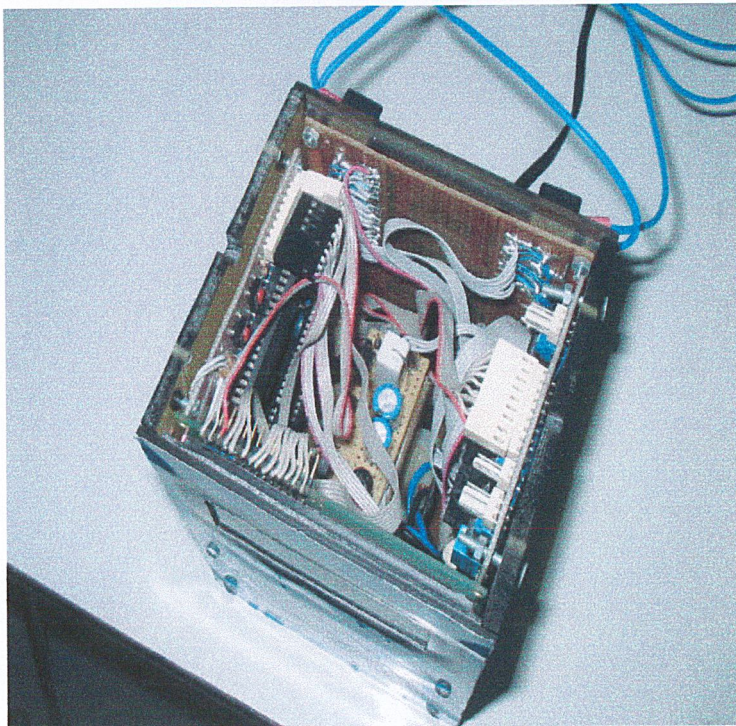


ภาพที่ 4.6 แสดง Loop Sub Program

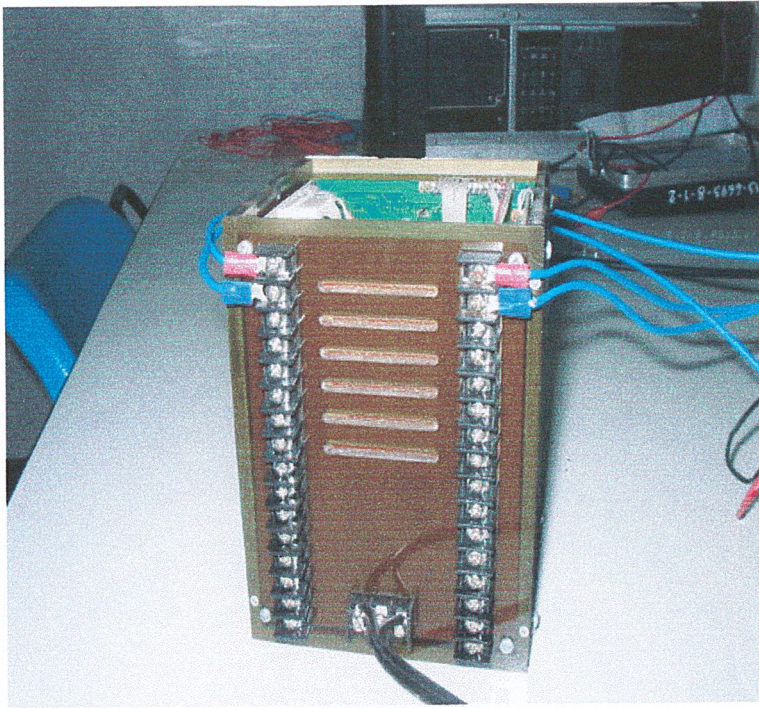
4.4 ลักษณะของฮาร์ดแวร์ที่สำเร็จแล้ว



ภาพที่ 4.7 แสดงด้านหน้าของ Controller



ภาพที่ 4.8 แสดงด้านบนของ Controller



ภาพที่ 4.9 แสดงด้านหลังของ Controller

บทที่ 5

การทดลอง

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและบันทึกผลการทดลองของส่วนอินพุต คือ 1. วงจรแปลงสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA เป็นแรงดัน 0-5 V 2. วงจรแปลงค่าจาก RTD มาเป็นแรงดัน 0-5 V ส่วนเอาต์พุต คือ วงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5 V เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA การทดสอบปฏิกิริยาควบคุมแบบ P, PI, PD, PID และนำเครื่องควบคุมไปควบคุมกระบวนการระดับและบันทึกผลของการทดลอง

5.2 การทดลองส่วนเอาต์พุต

วงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5 V เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA

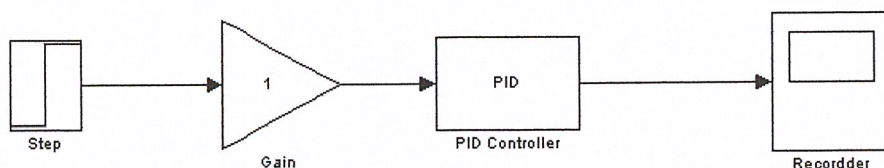
ทำการทดลองโดยป้อนแรงดันคงที่และเปลี่ยนระดับแรงดันต่างๆตั้งแต่ 0-5 V ตามตารางที่ 5.3 แล้ววัดสัญญาณที่เอาต์พุตของวงจร

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองวงจรเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-5 V เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA

Input (V)	Output (mA)
0.000mV	4.086
0.5000	5.677
1.0000	7.269
1.5000	8.857
2.0000	10.448
2.5000	12.041
3.0000	13.634
3.5000	15.288
4.0000	16.820
4.5000	18.418
5.0000	20.015

5.3 การทดลองกิริยาควบคุมแบบต่างๆ

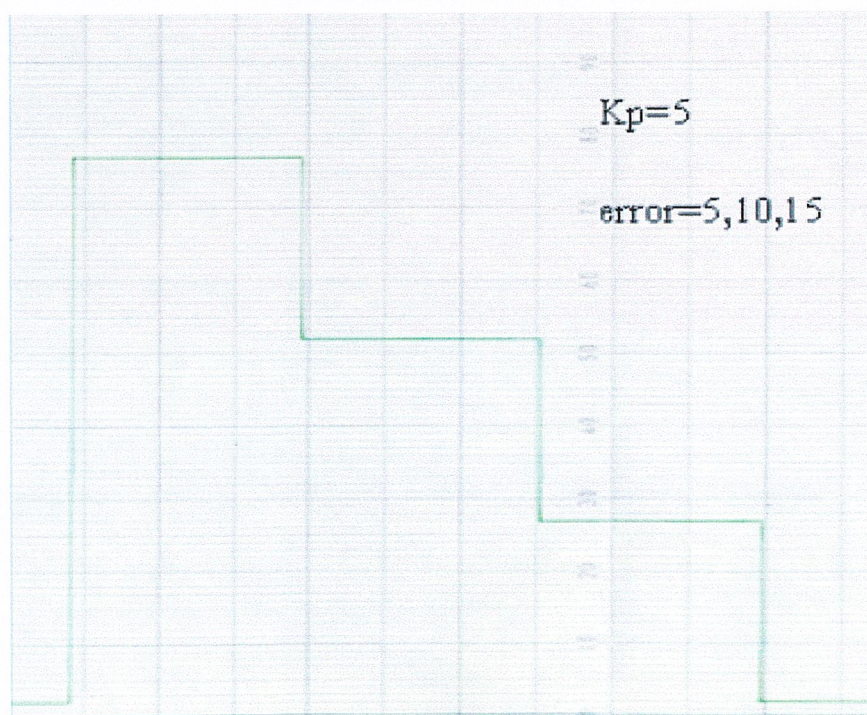
ทำการทดลองโดยกำหนดค่า error คงที่ สามารถทำได้โดยป้อนแรงดันคงที่ และนำแรงดันคงที่นั้นมาลบกับค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ จะได้ค่า error คงที่ แล้วส่งสัญญาณไปส่วนประมวลผลและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้ตรงตามกิริยาควบคุมแบบที่ต้องการทดสอบ แล้วใช้ Recorder วัดสัญญาณของกิริยาควบคุมแล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองด้วยโปรแกรม Math lab ดังภาพที่ 5.1

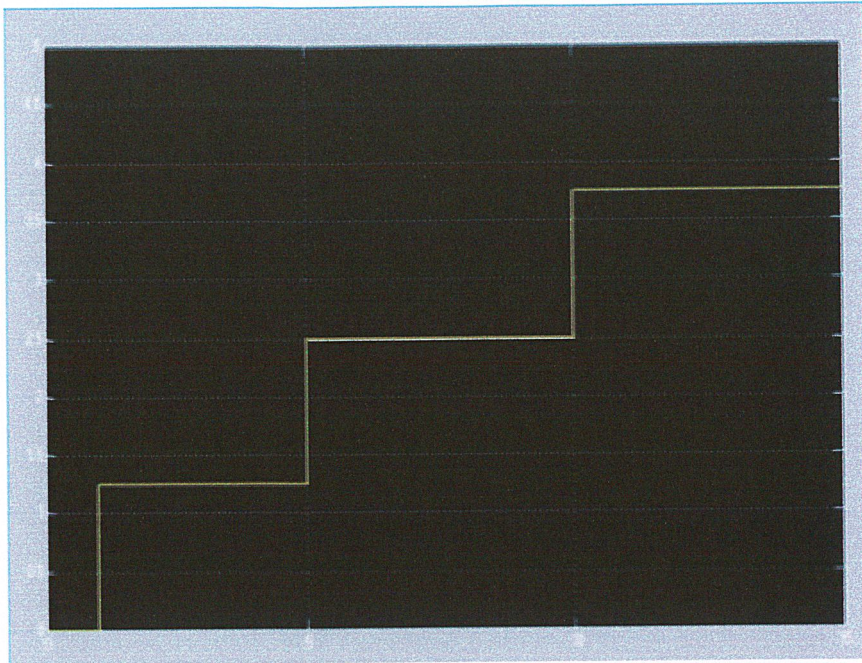


ภาพที่ 5.1 แสดงการทดสอบในโปรแกรม Math lab เมื่อกำหนดค่า error คงที่

5.3.1 การทดลองกิริยาควบคุมกิริยาควบคุม P

กำหนดค่า $K_p=5$, $T_i=9999$, $T_d=0$ กำหนดแรงดันคงที่ 0 Volt กำหนดค่าเป้าหมายที่ 5, 10, 15% ตามลำดับ และบันทึกผลการทดลองของ MV ด้วย Recorder

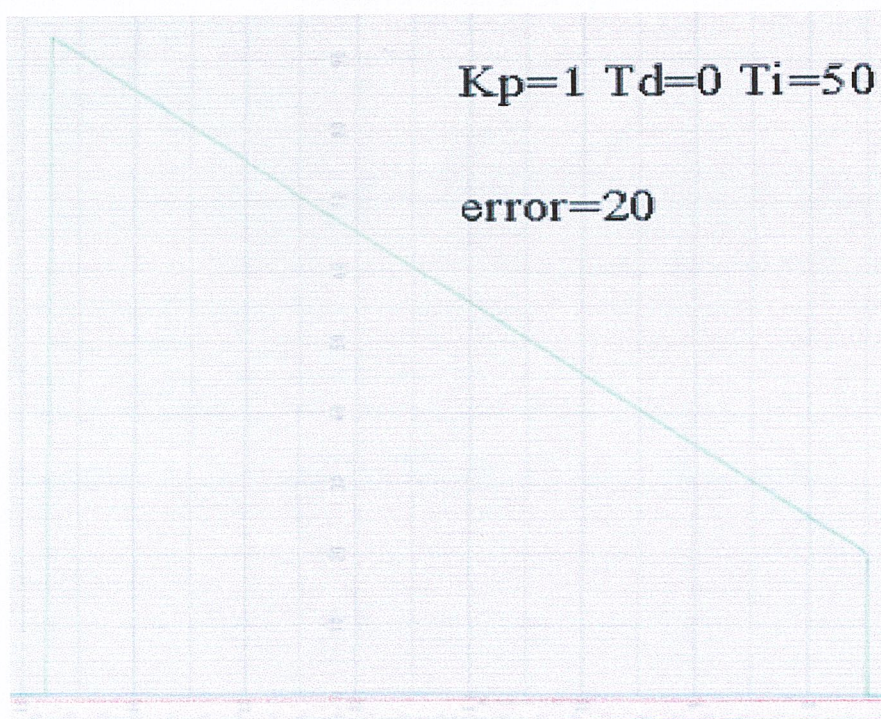


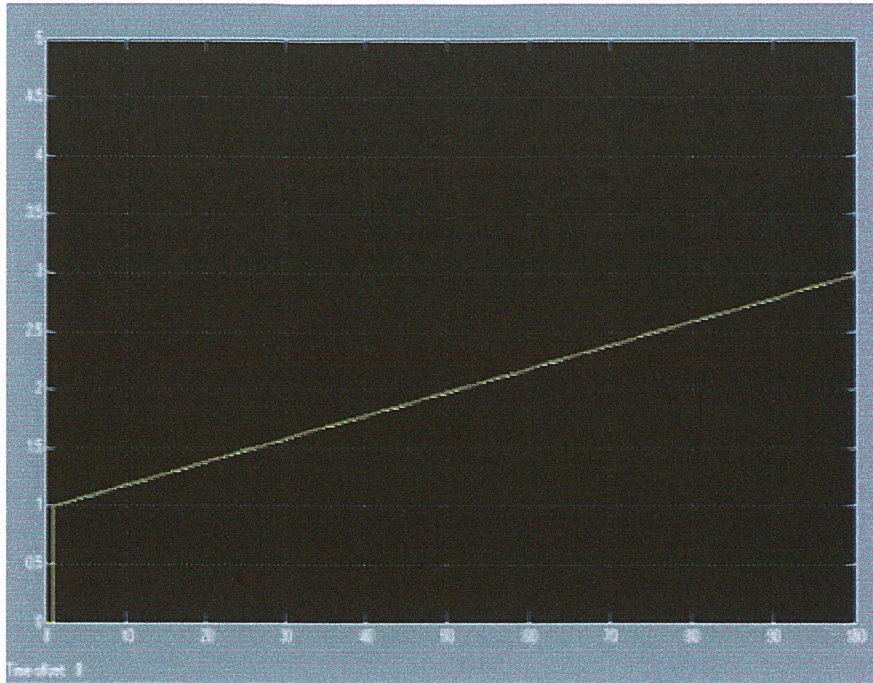


ภาพที่ 5.2 แสดงการทดลองกำหนดค่า $K_p = 5$ และเปลี่ยนค่าเป้าหมายที่ 5, 10, 15% และเทียบกับค่าที่ได้ จากโปรแกรม Math lab

5.3.2 การทดลองกริยาควบคุมกริยาควบคุมแบบ PI

กำหนดค่า $K_p=1$, $T_i=50$, $T_d=0$ กำหนดแรงดันคงที่ 0 Volt กำหนดค่าเป้าหมายที่ 20% และ บันทึกผลการทดลองของ MV ด้วย Recorder

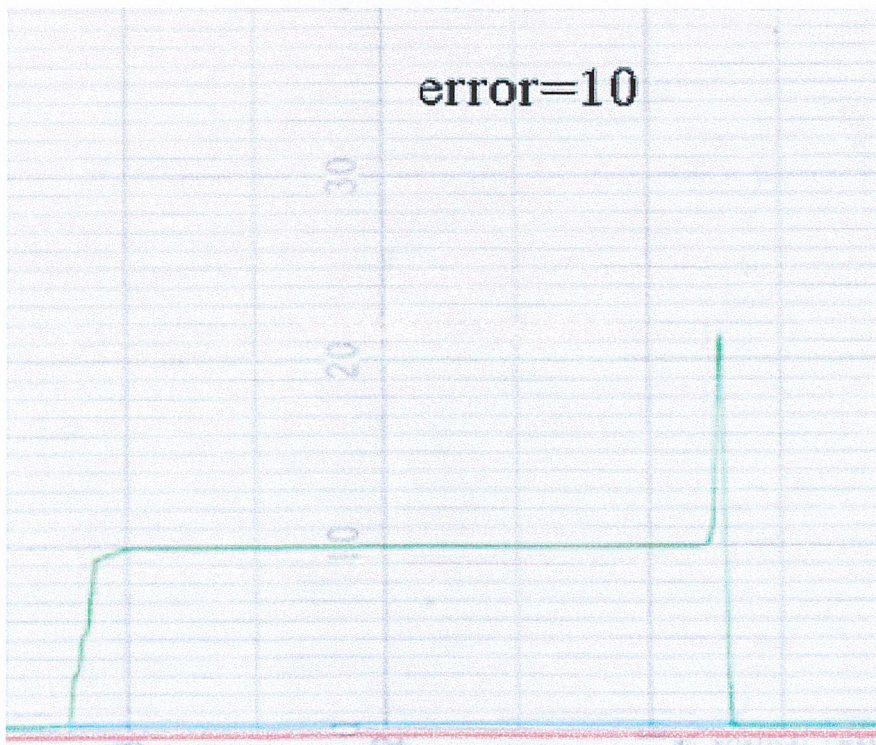


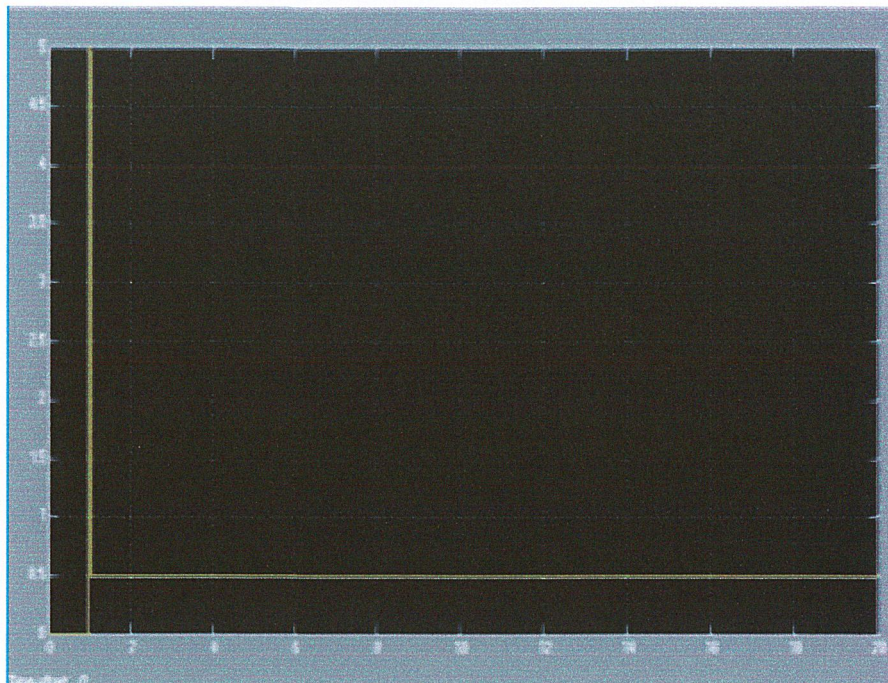


ภาพที่ 5.3 แสดงการทดลองกำหนดค่า $K_p=1$, $T_i=50$, $T_d=0$ กำหนดค่าเป้าหมาย ที่ 20% และเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Math lab

5.3.3 การทดลองกริยาควบคุมแบบ PD

กำหนดค่า $K_p=1$, $T_i=9999$, $T_d=5$ กำหนดแรงดันลงที่ 0 Volt กำหนดค่าเป้าหมายที่ 10%

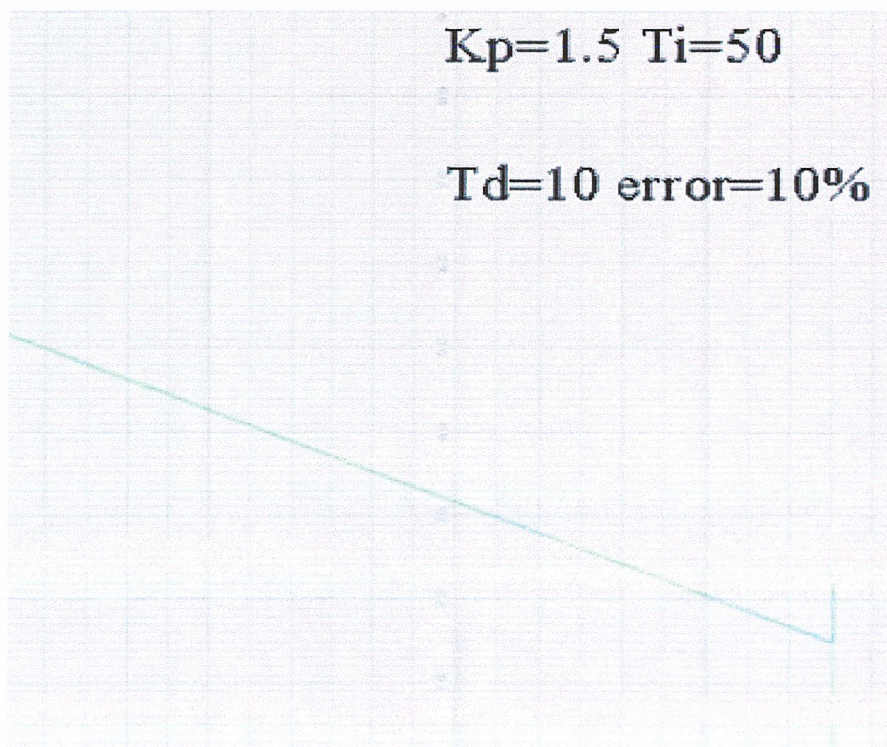


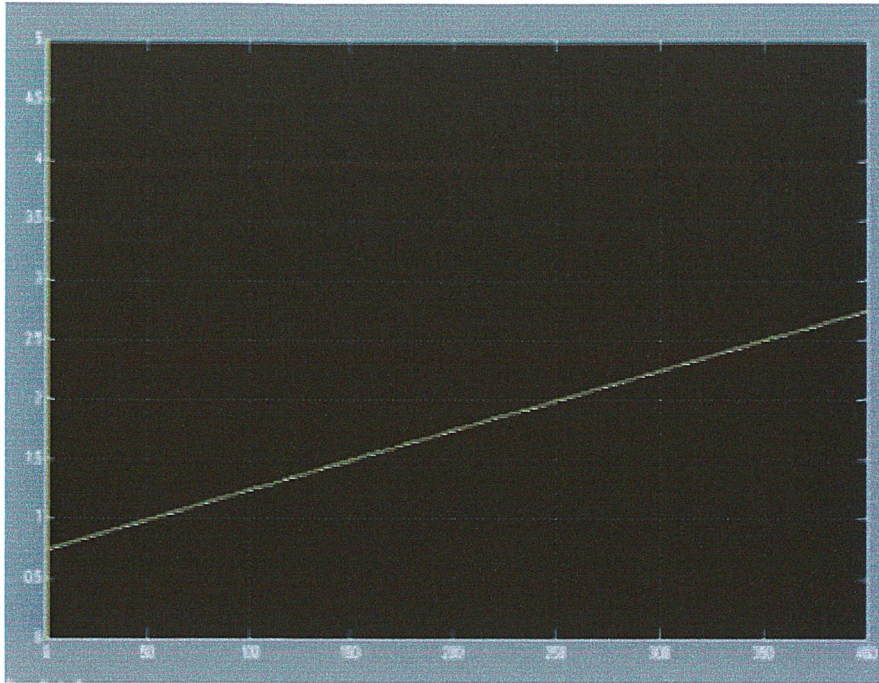


ภาพที่ 5.4 แสดงการทดลองกำหนดค่า $K_p = 1$, $T_i = 9999$, $T_d = 50$ กำหนดค่าเป้าหมายที่ 10% และเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Math lab

5.3.4 การทดลองกิริยาควบคุมแบบ PID

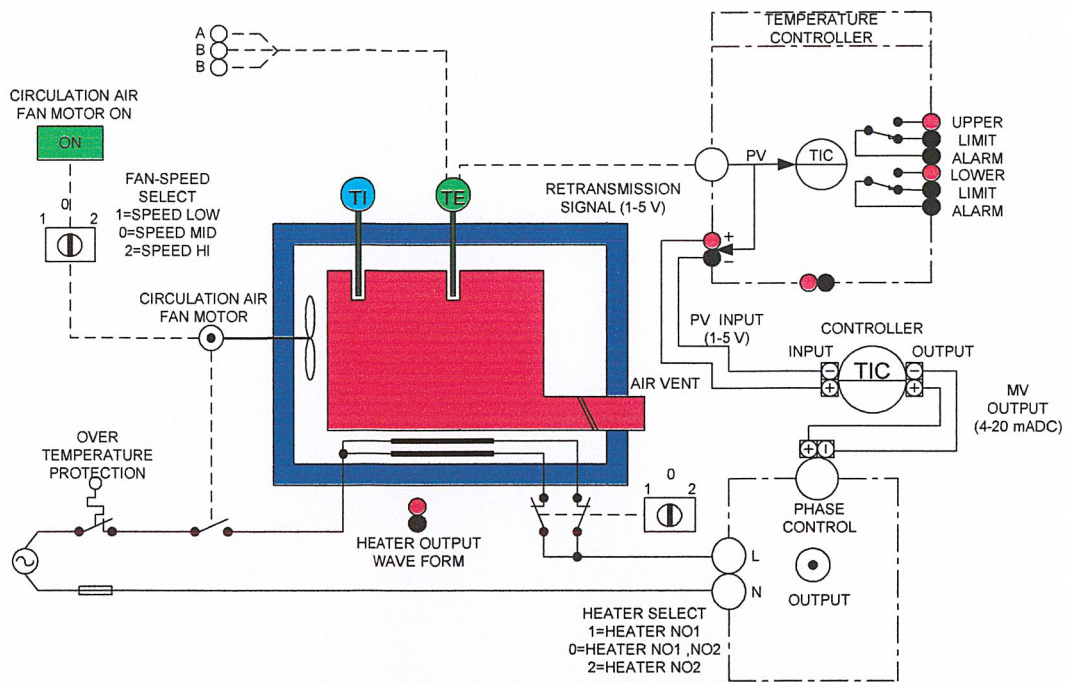
กำหนดค่า $K_p = 1.5$, $T_i = 50$, $T_d = 10$ กำหนดแรงดันคงที่ 0 Volt กำหนดค่าเป้าหมายที่ 10%



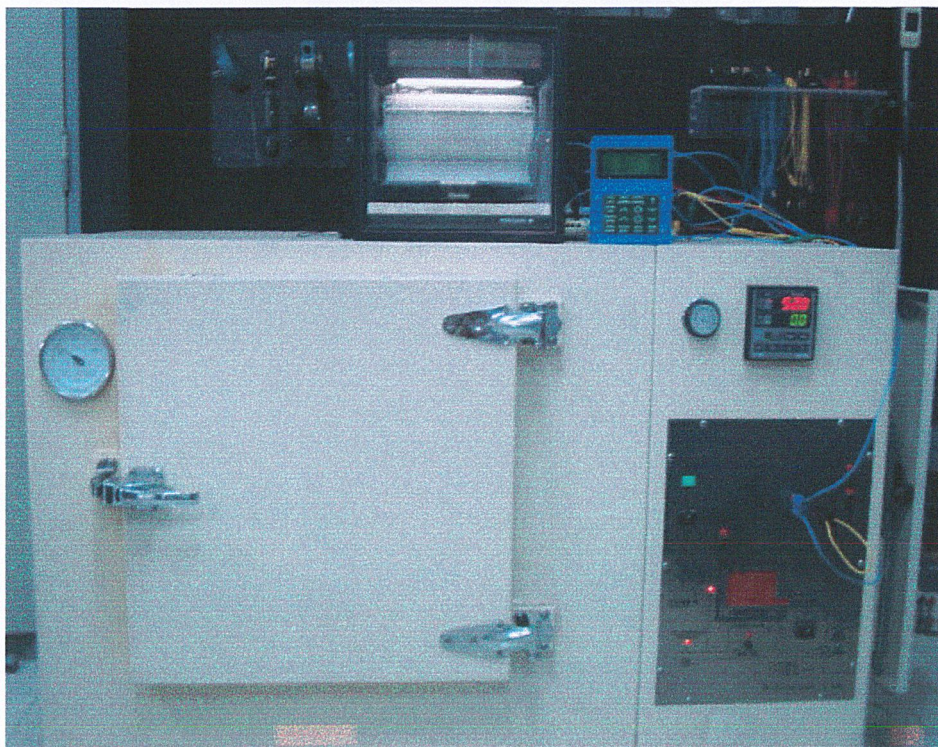


ภาพที่ 5.5 แสดงการทดลองกำหนดค่า $K_p=1.5$, $T_i=50$, $T_d=10$ กำหนดค่าเป้าหมายที่ 20% และเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Math lab

5.4 การทดลองกับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ

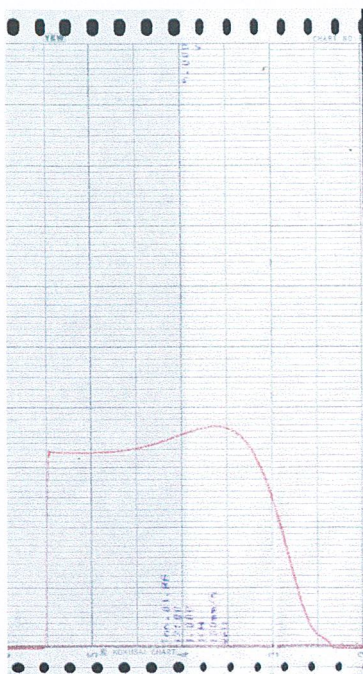


ภาพที่ 5.6 แสดงการต่อวงจรการควบคุมอุณหภูมิ

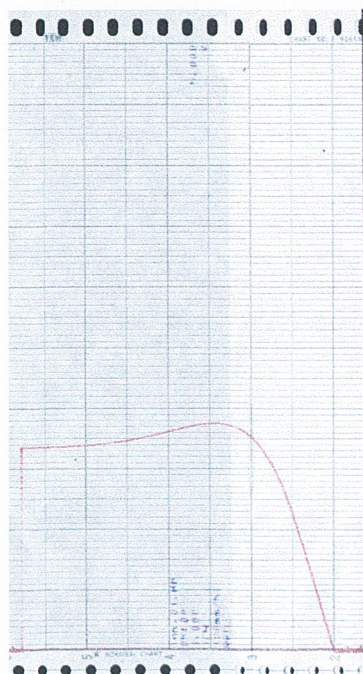


ภาพที่ 5.7 แสดงขบวนการควบคุมอุณหภูมิ

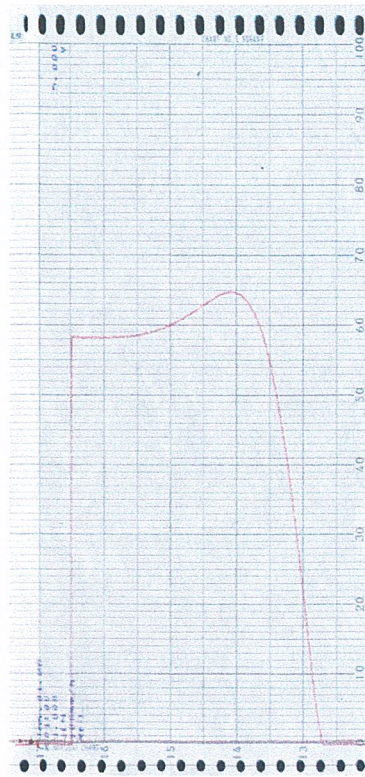
ในการทดลองใช้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นมา ควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส โดยจะนำผลการทดลองที่ได้เทียบกับตัวควบคุม TOSHIBA รุ่น AC201 จะได้ผลการทดลองดังนี้



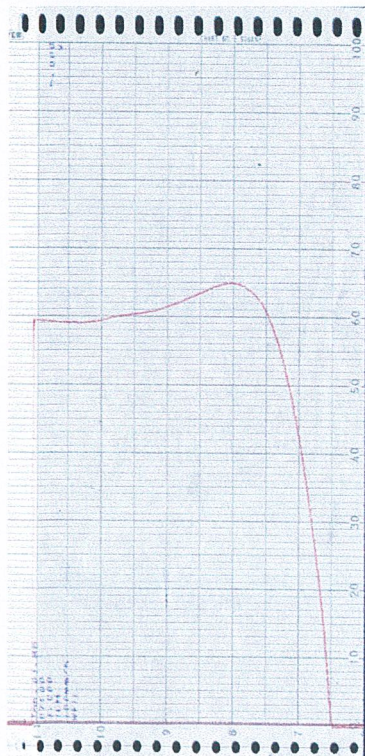
ภาพที่ 5.8 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ของ TOSHIBA ที่ $K_p=1$, $T_i=140$



ภาพที่ 5.9 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ของตัวควบคุมที่สร้าง $K_p=1$, $T_i=140$

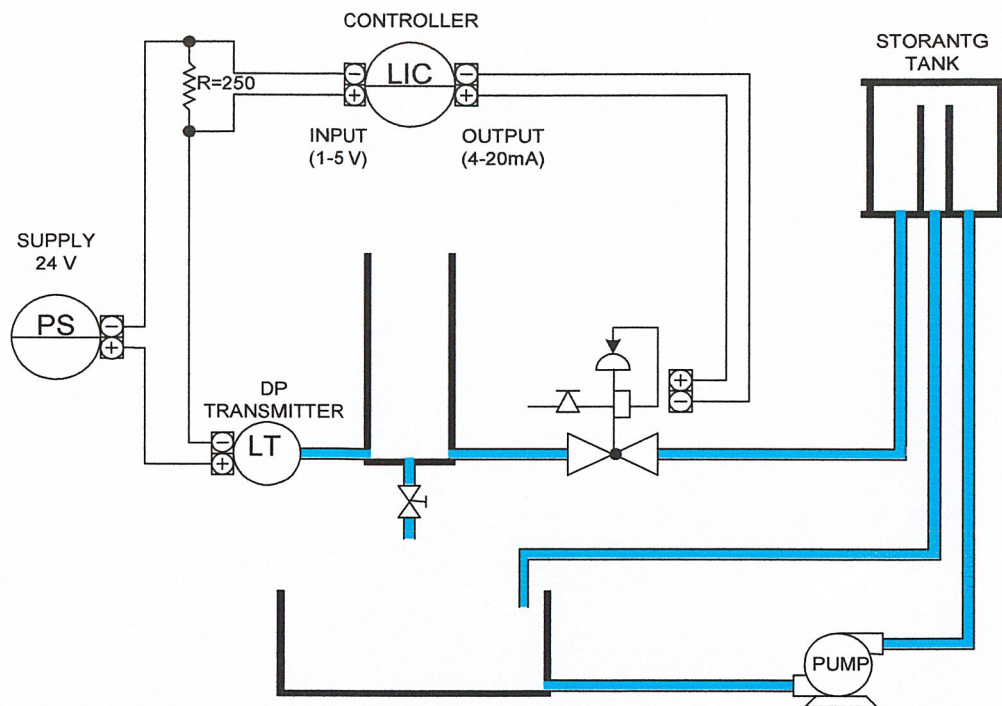


ภาพที่ 5.10 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส ของ TOSHIBA ที่ $K_p=1$, $T_i=220$

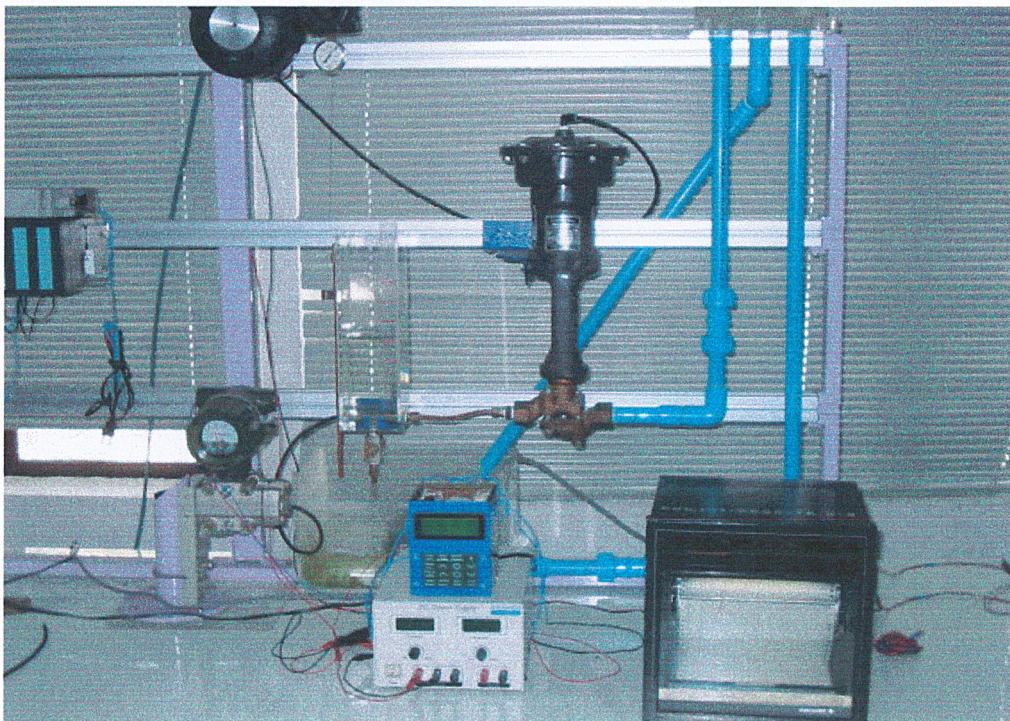


ภาพที่ 5.11 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียสของตัวควบคุมที่สร้าง $K_p=1$, $T_i=220$

5.5 การทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับ

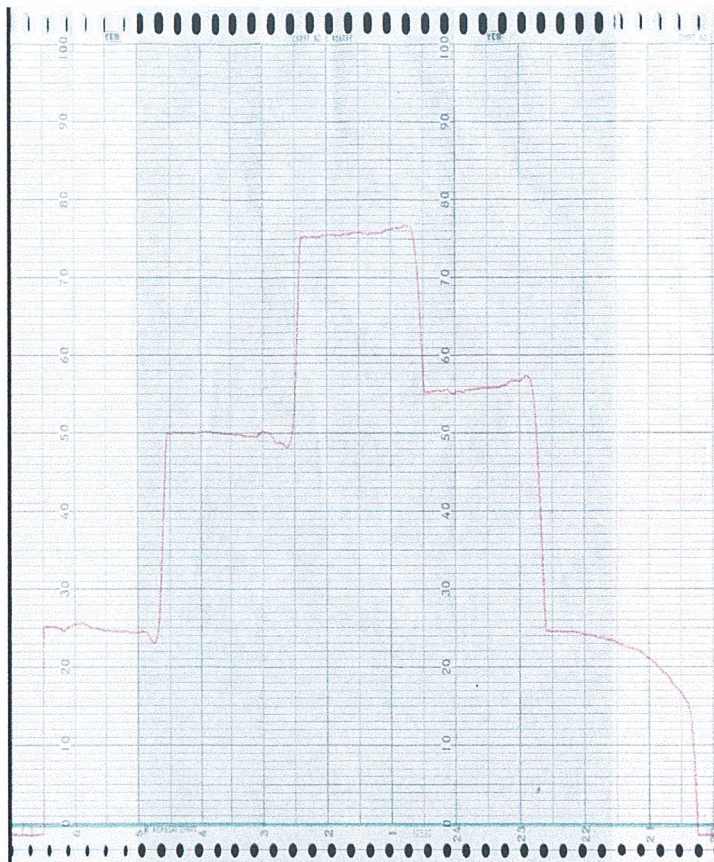


ภาพที่ 5.12 แสดงการต่อวงจรควบคุมระดับน้ำ



ภาพที่ 5.13 แสดงขบวนการควบคุมระดับน้ำ

ในการทดลองใช้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นมา ควบคุมระดับน้ำที่ Set Point ต่างๆ โดยป้อน Input เป็นแบบขั้นบันได



ภาพที่ 5.14 แสดงการทดลองควบคุมระดับน้ำที่ Set Point ต่างๆที่ $K_p=1$, $T_i=80$

5.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองกิริยาควบคุมแบบต่างๆ ได้ผลการทดลองออกมาเป็นที่น่าพอใจแต่ในบางส่วนจะพบปัญหาบ้างเล็กน้อย จะขออธิบายเป็นส่วนๆดังนี้

1. การทดลองกิริยาควบคุม แบบ P ในการทดลองนี้ปัญหาที่พบคือ เมื่อเราทำการ Simulate ในโปรแกรม Math lab จะพบว่า จะมีไม่มีการจำกัดค่าต่างๆ ของกิริยาควบคุม และไม่จำกัดค่า MV ที่ได้ แต่ในเครื่องควบคุมที่เราออกแบบจะมีข้อจำกัดของ D/A สามารถจ่ายแรงดันสูงสุดที่ 5V หรือ 100% ดังนั้น ในการออกแบบทางด้านโปรแกรมควรกำหนดค่าสูงสุดให้กับการทำงานโดยให้ค่าสูงสุดออกที่ D/A คือ 5V หรือ 100% และเมื่อค่าที่คำนวณได้เกิน 5V จะออกมาเพียง 5 V เท่านั้น

2. ผลตอบสนองของ PI ในการทดลองนี้กำหนด ความเร็วรอบของ Recorder ที่ 600 mm/h ค่า MV เมื่อป้อน Error ลงให้กับเครื่องควบคุมจะทำการเก็บค่าเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ แต่จะไปสิ้นสุดที่ 5 V หรือ 100% เพราะ D/A มีขีดสามารถจ่ายแรงดันสูงสุดที่ 5 V และค่าที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเนื่องจากค่าความผิดพลาดของ Recorder และอุปกรณ์ที่นำมาวัด

3. ผลตอบสนองของ PD ในการทดลองผลของ MV ที่ Recorder วัดได้จะไม่ตรงกับการ Simulate ในโปรแกรม Math lab เพราะผลของกริยา Td นั้นทำให้ MV มีค่าสูงมาก ในเวลาเริ่มต้นและหลังจากนั้นจะลดค่าลงมาที่ค่า Error ทำให้ Recorder ไม่สามารถจับสัญญาณได้ทันผลการทดลองจึงออกมาเป็นดังรูปที่ 5.4

บทสรุปข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา

6.1 บทสรุป

ปริภูมิพารามิเตอร์นี้เป็นเรื่องของการออกแบบ และจัดทำเครื่องควบคุมที่มีความสามารถเลือกฟังก์ชันในการทำงานได้และมีรูปการควบคุม 8 รูป การสามารถเลือกฟังก์ชันในการทำงานได้ช่วยให้การใช้งานง่ายและนำไปใช้ได้กับกระบวนการที่แตกต่างกันได้ เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อมที่จำกัดทางด้านเงินลงทุน และอาจมีกระบวนการที่ต้องการควบคุมมากกว่า 1 กระบวนการ โดยการศึกษาเริ่มต้นจากการศึกษาฟังก์ชัน การทำงานโดยทั่วไปของเครื่องควบคุมที่มีขายอยู่ แล้วนำมาออกแบบเครื่องควบคุมที่จะจัดทำ แบ่งการทำงานของเครื่องควบคุมออกเป็น ส่วนอินพุต ส่วนคำนวณ และส่วนเอาต์พุต ส่วนของอินพุตทำหน้าที่รับสัญญาณจากกระบวนการแล้วนำมาแปลงเป็นสัญญาณ 0-5 V ส่งผ่าน ADC แปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ส่งเข้าไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์นำไปจัดการตามโปรแกรมที่สามารถเลือกได้ หลังจากผ่านการคำนวณแล้วก็ทำการส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกผ่าน DAC และส่วนของเอาต์พุตต่อไป

จากการที่ได้สร้างและทำการทดลองเครื่องควบคุมนี้ ผลทดลองเป็นที่น่าพอใจการใช้งานเครื่องควบคุมสามารถปรับเปลี่ยนการทำงานตามฟังก์ชันที่ผู้ใช้ต้องการได้ และการนำไปทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับและอุณหภูมิ จากผลการทดลองทำให้เห็นผลตอบสนองของระบบที่มีต่อสัญญาณควบคุมจากเครื่องควบคุม ดังนั้นหากมีการนำเครื่องควบคุมที่จัดสร้างขึ้นนี้ไปทำการพัฒนาต่อก็อาจสามารถลดความผิดพลาดต่างๆ ให้ลดน้อยลงและพัฒนาขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ได้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา

การพัฒนาต่อไปเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ต้องทำการออกแบบรูปร่างของเครื่องควบคุมให้มีขนาดและรูปลักษณะให้สวยงาม และยังคงออกแบบเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นอีกด้วย ทำการเพิ่มฟังก์ชันในการทำงานและศึกษาสมการของการคำนวณ PID ที่มีหลายแบบเช่น IPD, 2DOF ซึ่งแต่ละแบบก็จะให้ผลในการทำงานที่แตกต่างกันไปเพื่อแก้ไขความผิดพลาดและเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องควบคุม

บรรณานุกรม

เจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข, แมนรัตน์ รุ่งวัฒน โยธิน : ตัวควบคุมแบบ PID ชนิดหลายอินพุตปริยญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541

ฉัตรแก้ว จิรไพโรจน์, ศิริวรรณ วิทยาการโกวิท:ตัวควบคุมพีไอดีชนิดหาค่าได้อัตโนมติ ปริยญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

ผศ. วีรวัฒน์ ประกอบผล : การพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษาซี, สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., พฤษภาคม 2545

อาจินต์ น่วมสำราญ : การออกแบบระบบควบคุม 2-DOF โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีไอดีเอ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543

ประกอรานต์ ทรัพย์ผดุงชนม์, สมใจ ผิวคำขำ, วิลาวรรณ อาทรสิริรัตน์ : เครื่องควบคุม PID/ON-OFF แบบหลายช่องสัญญาณ MULTICHANNEL PID/ON-OFF CONTROLLER WITH TIMER ปริยญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545

ภาคผนวก

MAXIM

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

MAX127/MAX128

General Description

The MAX127/MAX128 are multirange, 12-bit data acquisition systems (DAS) that require only a single +5V supply for operation, yet accept signals at their analog inputs that may span above the power-supply rail and below ground. These systems provide eight analog input channels that are independently software programmable for a variety of ranges: $\pm 10V$, $\pm 5V$, 0 to $+10V$, 0 to $+5V$ for the MAX127; and $\pm V_{REF}$, $\pm V_{REF}/2$, 0 to $+V_{REF}$, 0 to $+V_{REF}/2$ for the MAX128. This range switching increases the effective dynamic range to 14 bits and provides the flexibility to interface 4–20mA, $\pm 12V$, and $\pm 15V$ -powered sensors directly to a single +5V system. In addition, these converters are fault protected to $\pm 16.5V$; a fault condition on any channel will **not** affect the conversion result of the selected channel. Other features include a 5MHz bandwidth track/hold, an 8ksps throughput rate, and the option of an internal 4.096V or external reference.

The MAX127/MAX128 feature a 2-wire, I²C-compatible serial interface that allows communication among multiple devices using SDA and SCL lines.

A hardware shutdown input (\overline{SHDN}) and two software-programmable power-down modes (standby and full power-down) are provided for low-current shutdown between conversions. In standby mode, the reference-buffer remains active, eliminating start-up delays.

The MAX127/MAX128 are available in 24-pin DIP or space-saving 28-pin SSOP packages.

Applications

Industrial Control Systems
Data-Acquisition Systems
Robotics
Automatic Testing
Battery-Powered Instruments
Medical Instruments

Ordering Information

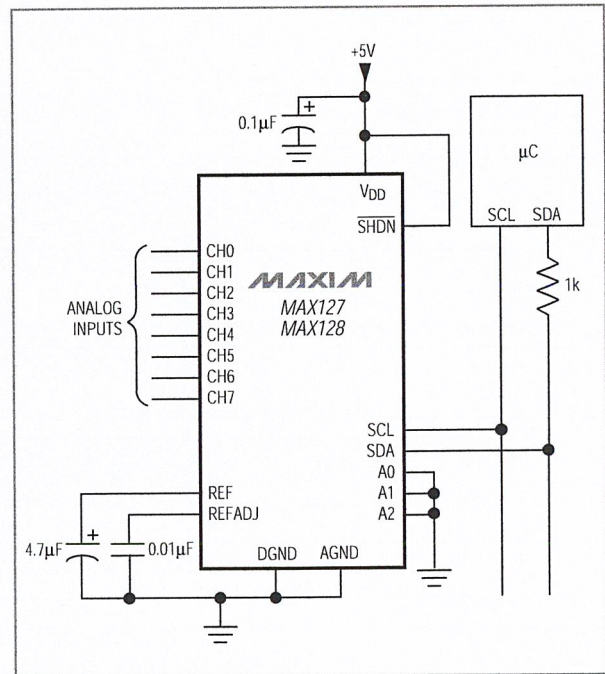
PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE	INL (LSB)
MAX127ACNG	0°C to +70°C	24 Narrow Plastic DIP	$\pm 1/2$
MAX127ACNG	0°C to +70°C	24 Narrow Plastic DIP	± 1

Ordering Information continued at end of data sheet.

Features

- ◆ 12-Bit Resolution, 1/2 LSB Linearity
- ◆ +5V Single-Supply Operation
- ◆ I²C-Compatible, 2-Wire Serial Interface
- ◆ Four Software-Selectable Input Ranges
MAX127: 0 to +10V, 0 to +5V, $\pm 10V$, $\pm 5V$
MAX128: 0 to $+V_{REF}$, 0 to $+V_{REF}/2$, $\pm V_{REF}$, $\pm V_{REF}/2$
- ◆ 8 Analog Input Channels
- ◆ 8ksps Sampling Rate
- ◆ $\pm 16.5V$ Overvoltage-Tolerant Input Multiplexer
- ◆ Internal 4.096V or External Reference
- ◆ Two Power-Down Modes
- ◆ 24-Pin Narrow DIP or 28-Pin SSOP Packages

Typical Operating Circuit



Pin Configurations appear at end of data sheet.

MAXIM

Maxim Integrated Products 1

For free samples & the latest literature: <http://www.maxim-ic.com>, or phone 1-800-998-8800.
For small orders, phone 408-737-7600 ext. 3468.

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

V _{DD} to AGND	-0.3V to +6V
AGND to DGND	-0.3V to +0.3V
CH0-CH7 to AGND	±16.5V
REF to AGND	-0.3V to (V _{DD} + 0.3V)
REFADJ to AGND	-0.3V to (V _{DD} + 0.3V)
A0, A1, A2 to DGND	-0.3V to (V _{DD} + 0.3V)
SHDN, SCL, SDA to DGND	-0.3V to +6V
Max Current into Any Pin	50mA

Continuous Power Dissipation (T _A = +70°C)	
24-Pin Narrow DIP (derate 13.33mW/°C above +70°C)	1067mW
28-Pin SSOP (derate 9.52mW/°C above +70°C)	762mW
Operating Temperature Ranges	
MAX127_C_/MAX128_C_	0°C to +70°C
MAX127_E_/MAX128_E_	-40°C to +85°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (soldering, 10sec)	+300°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V_{DD} = +5V ±5%; unipolar/bipolar range; external reference mode, V_{REF} = 4.096V; 4.7µF at REF; external clock, f_{CLK} = 400kHz; T_A = T_{MIN} to T_{MAX}; unless otherwise noted. Typical values are at T_A = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
ACCURACY (Note 1)						
Resolution			12			Bits
Integral Nonlinearity	INL	MAX127A/MAX128A			±1/2	LSB
		MAX127B/MAX128B			±1	
Differential Nonlinearity	DNL				±1	LSB
Offset Error	Unipolar	MAX127A/MAX128A			±3	LSB
		MAX127B/MAX128B			±5	
	Bipolar	MAX127A/MAX128A			±5	
		MAX127B/MAX128B			±10	
Channel-to-Channel Offset Error Matching	Unipolar				±0.1	LSB
	Bipolar				±0.3	
Gain Error (Note 2)	Unipolar	MAX127A/MAX128A			±7	LSB
		MAX127B/MAX128B			±10	
	Bipolar	MAX127A/MAX128A			±7	
		MAX127B/MAX128B			±10	
Gain Tempco (Note 2)	Unipolar				3	ppm/°C
	Bipolar				5	
DYNAMIC SPECIFICATIONS (800Hz sine-wave input, ±10Vp-p (MAX127) or ±4.096Vp-p (MAX128), f _{SAMPLE} = 8ksps)						
Signal-to-Noise plus Distortion Ratio	SINAD		70			dB
Total Harmonic Distortion	THD	Up to the 5th harmonic			-87 -80	dB
Spurious-Free Dynamic Range	SFDR		81			dB
Channel-to-Channel Crosstalk		4kHz, V _{IN} = ±5V (Note 3)			-86	dB
		DC, V _{IN} = ±16.5V			-96	
Aperture Delay			200			ns
Aperture Jitter			10			ns

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

MAX127/MAX128

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

(V_{DD} = +5V ±5%; unipolar/bipolar range; external reference mode, V_{REF} = 4.096V; 4.7μF at REF pin; external clock, f_{CLK} = 400kHz; T_A = T_{MIN} to T_{MAX}; unless otherwise noted. Typical values are at T_A = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS	
ANALOG INPUT								
Track/Hold Acquisition Time						3	μs	
Small-Signal Bandwidth		-3dB rolloff	±10V or ±V _{REF} range		5		MHz	
			±5V or ±V _{REF} /2 range		2.5			
			0 to 10V or 0 to V _{REF} range		2.5			
			0 to 5V or 0 to V _{REF} /2 range		1.25			
Input Voltage Range	V _{IN}	Unipolar, Table 3	MAX127	0		10	V	
			MAX128	0		V _{REF}		
		Bipolar, Table 3	MAX127	-10		10		
			MAX128	-V _{REF}		V _{REF}		
			MAX127	-5		5		
			MAX128	-V _{REF} /2		V _{REF} /2		
Input Current	I _{IN}	Unipolar	MAX127	0 to 10V range	-10		720	μA
			MAX128	0 to 5V range	-10		360	
		Bipolar	MAX127	±10V range	-1200		720	
			MAX127	±5V range	-600		360	
			MAX128	±V _{REF} range	-1200		10	
			MAX128	±V _{REF} /2 range	-600		10	
Input Resistance	$\frac{\Delta V_{IN}}{\Delta I_{IN}}$	Unipolar			21		kΩ	
		Bipolar			16			
Input Capacitance		(Note 4)				40	pF	
INTERNAL REFERENCE								
REFOUT Voltage	V _{REF}	T _A = +25°C		4.076	4.096	4.116	V	
REFOUT Tempco	TC V _{REF}	MAX127_C/MAX128_C			±15		ppm/°C	
		MAX127_E/MAX128_E			±30			
Output Short-Circuit Current						30	mA	
Load Regulation (Note 5)		0 to 0.5mA output current				10	mV	
Capacitive Bypass at REF				4.7			μF	
REFADJ Output Voltage				2.465	2.500	2.535	V	
REFADJ Adjustment Range		Figure 12			±1.5		%	
Buffer Voltage Gain					1.638		V/V	

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

MAX127/MAX128

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

($V_{DD} = +5V \pm 5\%$; unipolar/bipolar range; external reference mode, $V_{REF} = 4.096V$; $4.7\mu F$ at REF pin; external clock, $f_{CLK} = 400kHz$; $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} ; unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^\circ C$.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
REFERENCE INPUT (buffer disabled, reference input applied to REF)							
Input Voltage Range				2.4		4.18	V
Input Current		$V_{REF} = 4.18V$	Normal, or STANDBY power-down mode			400	μA
			FULL power-down mode			1	
Input Resistance		Normal or STANDBY power-down mode		10			$k\Omega$
		FULL power-down mode		5			$M\Omega$
REFADJ Threshold for Buffer Disable				$V_{DD} - 0.5$			V
POWER REQUIREMENTS							
Supply Voltage	V_{DD}			4.75		5.25	V
Supply Current	I_{DD}	Normal mode, bipolar ranges				18	mA
		Normal mode, unipolar ranges			6	10	
		STANDBY power-down mode (Note 6)			700	850	μA
		FULL power-down mode			120	220	
Power-Supply Rejection Ratio (Note 7)	PSRR	External reference = 4.096V		± 0.1		± 0.5	LSB
		Internal reference				± 0.5	
TIMING							
External Clock Frequency Range	f_{CLK}					0.4	MHz
Conversion Time	t_{CONV}			6.0	7.7	10.0	μs
Throughput Rate						8	ksps
Bandgap Reference Start-Up Time		Power-up (Note 8)			200		μs
Reference Buffer Settling Time		To 0.1mV, REF bypass capacitor fully discharged	$C_{REF} = 4.7\mu F$		8		ms
			$C_{REF} = 33\mu F$		60		
DIGITAL INPUTS (\overline{SHDN} , A2, A1, A0)							
Input High Threshold Voltage	V_{IH}					2.4	V
Input Low Threshold Voltage	V_{IL}			0.8			V
Input Leakage Current	I_{IN}	$V_{IN} = 0$ or V_{DD}			± 0.1	± 10	μA
Input Capacitance	C_{IN}	(Note 4)				15	pF
Input Hysteresis	V_{HYS}				0.2		V

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

MAX127/MAX128

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

(V_{DD} = +5V ±5%; unipolar/bipolar range; external reference mode, V_{REF} = 4.096V; 4.7μF at REF pin; external clock, f_{CLK} = 400kHz; T_A = T_{MIN} to T_{MAX}; unless otherwise noted. Typical values are at T_A = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
DIGITAL INPUTS (SDA, SCL)						
Input High Threshold Voltage	V _{IH}			0.7 x V _{DD}		V
Input Low Threshold Voltage	V _{IL}		0.3 x V _{DD}			V
Input Hysteresis	V _{HYS}		0.05 x V _{DD}			V
Input Leakage Current	I _{IN}	V _{IN} = 0 or V _{DD}		±0.1	±10	μA
Input Capacitance	C _{IN}	(Note 4)			15	pF
DIGITAL OUTPUTS (SDA)						
Output Low Voltage	V _{OL}	I _{SINK} = 3mA			0.4	V
		I _{SINK} = 6mA			0.6	
Three-State Output Capacitance	C _{OUT}	(Note 4)			15	pF

TIMING CHARACTERISTICS

(V_{DD} = +4.75V to +5.25V; unipolar/bipolar range; external reference mode, V_{REF} = 4.096V; 4.7μF at REF pin; T_A = T_{MIN} to T_{MAX}; unless otherwise noted. Typical values are at T_A = +25°C.)

PARAMETERS	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
2-WIRE FAST MODE						
SCL Clock Frequency	f _{SCL}				400	kHz
Bus Free Time Between a STOP and START Condition	t _{BUF}		1.3			μs
Hold Time (Repeated) START Condition	t _{HD,STA}		0.6			μs
Low Period of the SCL Clock	t _{LOW}		1.3			μs
High Period of the SCL Clock	t _{HIGH}		0.6			μs
Set-Up Time for a Repeated START Condition	t _{SU,STA}		0.6			μs
Data Hold Time	t _{HD,DAT}		0		0.9	μs
Data Setup Time	t _{SU,DAT}		100			ns
Rise Time for Both SDA and SCL Signals (Receiving)	t _R	C _b = Total capacitance of one bus line in pF	20 + 0.1 x C _b		300	ns
Fall Time for Both SDA and SCL Signals (Receiving)	t _F	C _b = Total capacitance of one bus line in pF	20 + 0.1 x C _b		300	ns
Fall Time for Both SDA and SCL Signals (Transmitting)	t _F	C _b = Total capacitance of one bus line in pF	20 + 0.1 x C _b		250	ns
Set-Up Time for STOP Condition	t _{SU,STO}		0.6			μs
Capacitive Load for Each Bus Line	C _b				400	pF
Pulse Width of Spike Suppressed	t _{SP}		0		50	ns

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

MAX127/MAX128

TIMING CHARACTERISTICS (continued)

(V_{DD} = +4.75V to +5.25V; unipolar/bipolar range; external reference mode, V_{REF} = 4.096V; 4.7 μ F at REF pin; T_A = T_{MIN} to T_{MAX} ; unless otherwise noted. Typical values are at T_A = +25°C.)

PARAMETERS	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
2-WIRE STANDARD MODE						
SCL Clock Frequency	f _{SCL}				100	kHz
Bus Free Time Between a STOP and START Condition	t _{BUF}		4.7			μ s
Hold Time (Repeated) START Condition	t _{HD,STA}		4.0			μ s
Low Period of the SCL Clock	t _{LOW}		4.7			μ s
High Period of the SCL Clock	t _{HIGH}		4.0			μ s
Setup Time for a Repeated START Condition	t _{SU, STA}		4.7			μ s
Data Hold Time	t _{HD, DAT}		0		0.9	μ s
Data Setup Time	t _{SU, DAT}		250			ns
Rise Time for Both SDA and SCL Signals (Receiving)	t _R				1000	ns
Fall Time for Both SDA and SCL Signals (Receiving)	t _F				300	ns
Fall Time for Both SDA and SCL Signals (Transmitting)	t _F	C_b = total capacitance of one bus line in pF, up to 6mA sink	20 + 0.1 x C_b		250	ns
Setup Time for STOP Condition	t _{SU, STO}		4.0			μ s
Capacitive Load for Each Bus Line	C_b				400	pF
Pulse Width of Spike Suppressed	t _{SP}		0		50	ns

Note 1: Accuracy specifications tested at V_{DD} = 5.0V. Performance at power-supply tolerance limits is guaranteed by Power-Supply Rejection test.

Note 2: External reference: V_{REF} = 4.096V, offset error nulled, ideal last-code transition = FS - 3/2LSB.

Note 3: Ground "on" channel, sine wave applied to all "off" channels.

Note 4: Guaranteed by design. Not tested.

Note 5: Use static external load during conversion for specified accuracy.

Note 6: Tested using internal reference.

Note 7: PSRR measured at full scale. Tested for the $\pm 10V$ (MAX127) and $\pm 4.096V$ (MAX128) input ranges.

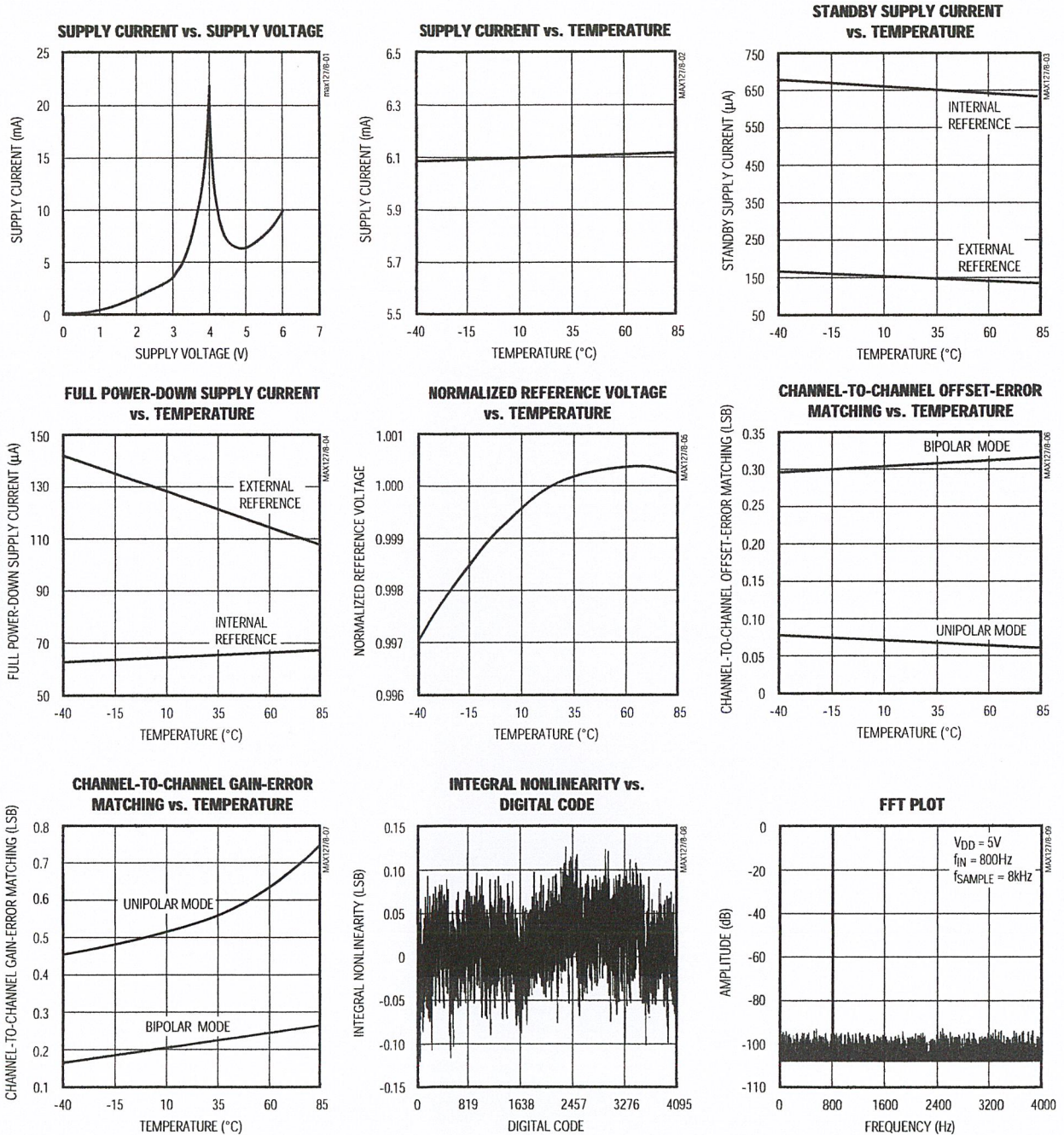
Note 8: Not subject to production testing. Provided for design guidance only.

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

Typical Operating Characteristics

($V_{DD} = +5V$, external reference mode, $V_{REF} = 4.096V$; $4.7\mu F$ at REF; external clock, $f_{CLK} = 400kHz$; $T_A = +25^\circ C$; unless otherwise noted.)

MAX127/MAX128



Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

Pin Description

PIN		NAME	FUNCTION
DIP	SSOP		
1, 2	1, 2	V _{DD}	+5V Supply. Bypass with a 0.1μF capacitor to AGND.
3, 9, 22, 24	4, 7, 8, 11, 22, 24, 25, 28	N.C.	No Connect. No internal connection.
4	3	DGND	Digital Ground
5	5	SCL	Serial Clock Input
6, 8, 10	6, 10, 12	A0, A2, A1	Address Select Inputs
7	9	SDA	Open-Drain Serial Data I/O. Input data is clocked in on the rising edge of SCL, and output data is clocked out on the falling edge of SCL. External pull-up resistor required.
11	13	$\overline{\text{SHDN}}$	Shutdown Input. When low, device is in full power-down (FULLPD) mode. Connect high for normal operation.
12	14	AGND	Analog Ground
13–20	15–21, 23	CH0–CH7	Analog Input Channels
21	26	REFADJ	Bandgap Voltage-Reference Output/External Adjust Pin. Bypass with a 0.01μF capacitor to AGND. Connect to V _{DD} when using an external reference at REF.
23	27	REF	Reference Buffer Output/ADC Reference Input. In internal reference mode, the reference buffer provides a 4.096V nominal output, externally adjustable at REFADJ. In external reference mode, disable the internal reference by pulling REFADJ to V _{DD} and applying the external reference to REF.

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

MAX127/MAX128

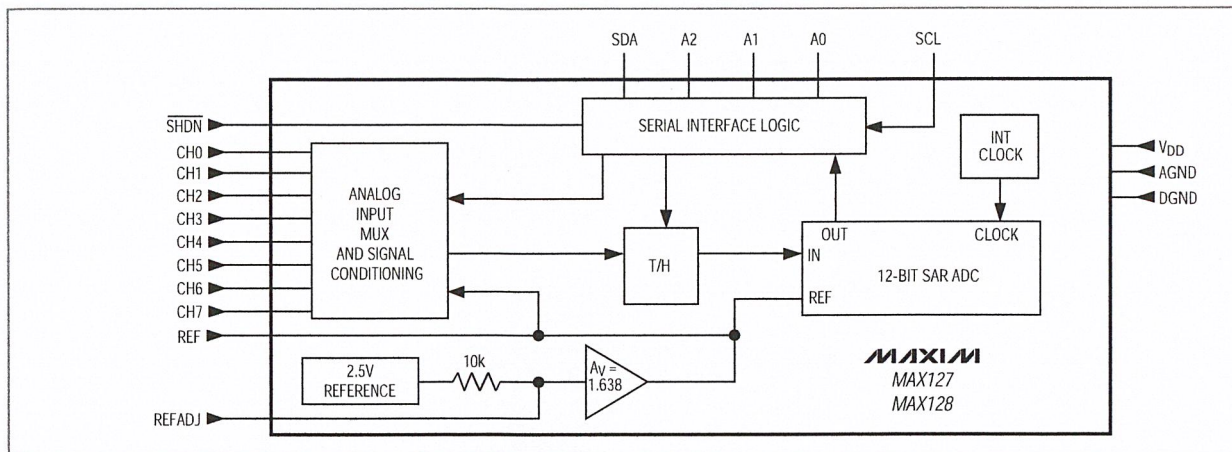


Figure 1. Block Diagram

Detailed Description

Converter Operation

The MAX127/MAX128 multirange, fault-tolerant ADCs use successive approximation and internal track/hold (T/H) circuitry to convert an analog signal to a 12-bit digital output. Figure 1 shows the block diagram for these devices.

Analog-Input Track/Hold

The T/H circuitry enters its tracking/acquisition mode on the falling edge of the sixth clock in the 8-bit input control word and enters its hold/conversion mode when the master issues a STOP condition. For timing information, see the *Start a Conversion* section.

Input Range and Protection

The MAX127/MAX128 have software-selectable input ranges. Each analog input channel can be independently programmed to one of four ranges by setting the appropriate control bits (RNG, BIP) in the control byte (Table 1). The MAX127 has selectable input ranges extending to $\pm 10V$ ($\pm V_{REF} \times 2.441$), while the MAX128 has selectable input ranges extending to $\pm V_{REF}$. Note that when an external reference is applied at REFADJ, the voltage at REF is given by $V_{REF} = 1.638 \times V_{REFADJ}$ ($2.4 < V_{REF} < 4.18$). Figure 2 shows the equivalent input circuit.

A resistor network on each analog input provides a $\pm 16.5V$ fault protection for all channels. This circuit limits the current going into or out of the pin to less than 1.2mA, whether or not the channel is on. This provides an added layer of protection when momentary overvoltages occur at the selected input channel, and when a negative signal is applied at the input even though

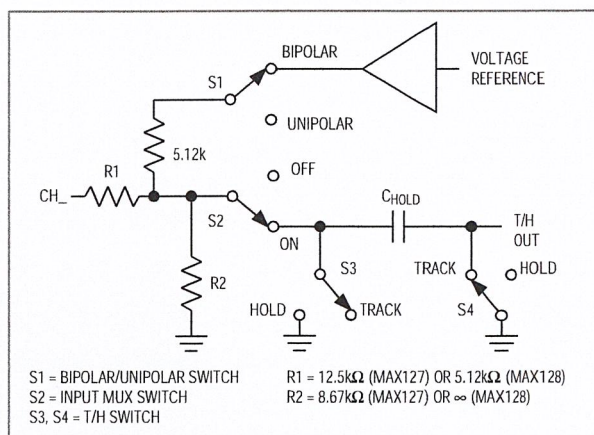


Figure 2. Equivalent Input Circuit

the device may be configured for unipolar mode. Overvoltage protection is active even if the device is in power-down mode or $V_{DD} = 0$.

Digital Interface

The MAX127/MAX128 feature a 2-wire serial interface consisting of the SDA and SCL pins. SDA is the data I/O and SCL is the serial clock input, controlled by the master device. A2–A0 are used to program the MAX127/MAX128 to different slave addresses. (The MAX127/MAX128 only work as slaves.) The two bus lines (SDA and SCL) must be high when the bus is not in use. External pull-up resistors (1k Ω or greater) are required on SDA and SCL to maintain I²C compatibility. Table 1 shows the input control-byte format.

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

MAX127/MAX128

Table 1. Control-Byte Format

BIT 7 (MSB)	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0 (LSB)
START	SEL2	SEL1	SEL0	RNG	BIP	PD1	PD0

BIT	NAME	DESCRIPTION
7 (MSB)	START	The logic "1" received after acknowledge of a write bit ($R/\bar{W} = 0$) defines the beginning of the control byte.
6, 5, 4	SEL2, SEL1, SEL0	These three bits select the desired "ON" channel (Table 2).
3	RNG	Selects the full-scale input voltage range (Table 3).
2	BIP	Selects unipolar or bipolar conversion mode (Table 3).
1, 0 (LSB)	PD1, PD0	These two bits select the power-down modes (Table 4).

Table 2. Channel Selection

SEL2	SEL1	SEL0	CHANNEL
0	0	0	CH0
0	0	1	CH1
0	1	0	CH2
0	1	1	CH3
1	0	0	CH4
1	0	1	CH5
1	1	0	CH6
1	1	1	CH7

Table 4. Power-Down and Clock Selection

PD1	PD0	MODE
0	X	Normal Operation (always on)
1	0	Standby Power-Down Mode (STBYPD)
1	1	Full Power-Down Mode (FULLPD)

Table 3. Range and Polarity Selection

INPUT RANGE (V)	RNG	BIP	NEGATIVE FULL SCALE (V)	ZERO SCALE (V)	FULL SCALE (V)
MAX127					
0 to 5	0	0	-	0	$V_{REF} \times 1.2207$
0 to 10	1	0	-	0	$V_{REF} \times 2.4414$
± 5	0	1	$-V_{REF} \times 1.2207$	0	$V_{REF} \times 1.2207$
± 10	1	1	$-V_{REF} \times 2.4414$	0	$V_{REF} \times 2.4414$
MAX128					
0 to $V_{REF}/2$	0	0	-	0	$V_{REF}/2$
0 to V_{REF}	1	0	-	0	V_{REF}
$\pm V_{REF}/2$	0	1	$-V_{REF}/2$	0	$V_{REF}/2$
$\pm V_{REF}$	1	1	$-V_{REF}$	0	V_{REF}

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

Slave Address

The MAX127/MAX128 have a 7-bit-long slave address. The first four bits (MSBs) of the slave address have been factory programmed and are always 0101. The logic state of the address input pins (A2–A0) determine the three LSBs of the device address (Figure 3). A maximum of eight MAX127/MAX128 devices can therefore be connected on the same bus at one time.

A2–A0 may be connected to V_{DD} or DGND, or they may be actively driven by TTL or CMOS logic levels.

The eighth bit of the address byte determines whether the master is writing to or reading from the MAX127/MAX128 (R/W = 0 selects a write condition. R/W = 1 selects a read condition).

Conversion Control

The master signals the beginning of a transmission with a START condition (S), which is a high-to-low transition on SDA while SCL is high. When the master has finished communicating with the slave, the master issues a STOP condition (P), which is a low-to-high transition on SDA while SCL is high (Figure 4). The bus is then free for another transmission. Figure 5 shows the timing diagram for signals on the 2-wire interface. The address-byte, control-byte, and data-byte are transmitted between the START and STOP conditions. The SDA state is allowed to change only while SCL is low, except for the START and STOP conditions. Data is transmitted in 8-bit words. Nine clock cycles are required to transfer the data in or out of the MAX127/MAX128. (Figures 9 and 10).

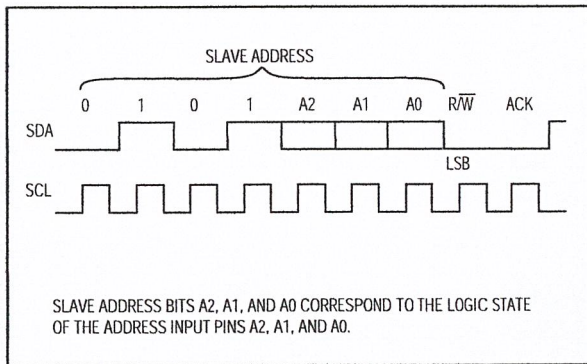


Figure 3. Address Byte

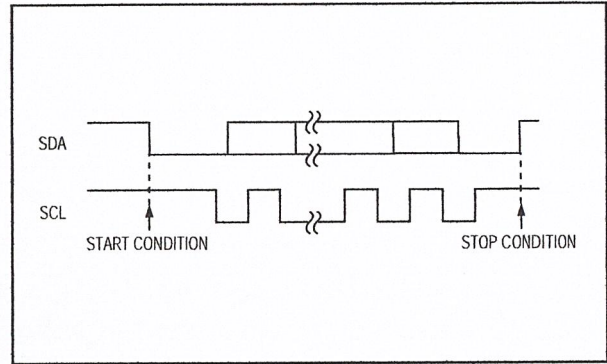


Figure 4. START and STOP Conditions

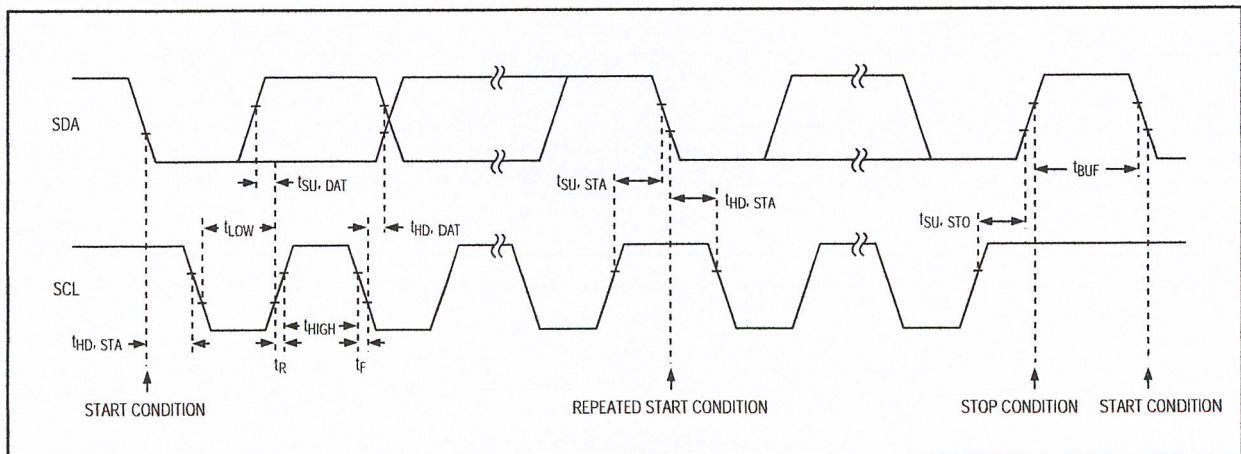


Figure 5. 2-Wire Serial-Interface Timing Diagram

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

Start a Conversion (Write Cycle)

A conversion cycle begins with the master issuing a START condition followed by seven address bits (Figure 3) and a write bit ($R/\bar{W} = 0$). Once the eighth bit has been received and the address matches, the MAX127/MAX128 (the slave) issues an acknowledge by pulling SDA low for one clock cycle ($A = 0$). The master then writes the input control byte to the slave (Figure 8). After this byte of data, the slave issues another acknowledge, pulling SDA low for one clock cycle. The master ends the write cycle by issuing a STOP condition (Figure 6).

When the write bit is set ($R/\bar{W} = 0$), acquisition starts as soon as Bit 2 (BIP) of the input control-byte has been latched and ends when a STOP condition has been issued. Conversion starts immediately after acquisition. The MAX127/MAX128's internal conversion clock frequency is 1.56MHz, resulting in a typical conversion time of 7.7 μ s. Figure 9 shows a complete write cycle.

Read a Conversion (Read Cycle)

Once a conversion starts, the master does not need to wait for the conversion to end before attempting to read the data from the slave. Data access begins with the master issuing a START condition followed by a 7-bit address (Figure 3) and a read bit ($R/\bar{W} = 1$). Once the eighth bit has been received and the address matches, the slave issues an acknowledge by pulling low on SDA for one clock cycle ($A = 0$) followed by the first byte of serial data (D11–D4, MSB first). After the first byte has been issued by the slave, it releases the bus for the master to issue an acknowledge ($A = 0$). After receiving the acknowledge, the slave issues the second byte (D3–D0 and four zeros) followed by a NOT acknowledge ($\bar{A} = 1$) from the master to indicate that the last data byte has been received. Finally, the master issues a STOP condition (P), ending the read cycle (Figure 7).

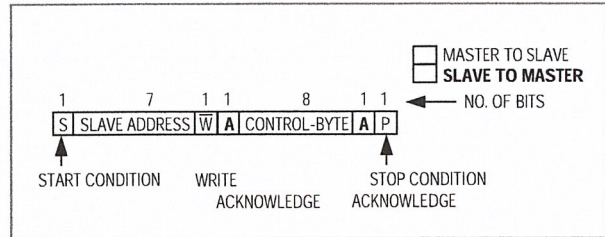


Figure 6. Write Cycle

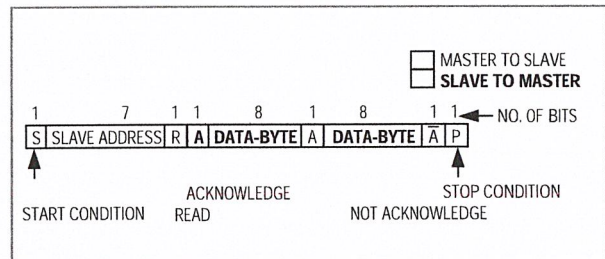


Figure 7. Read Cycle

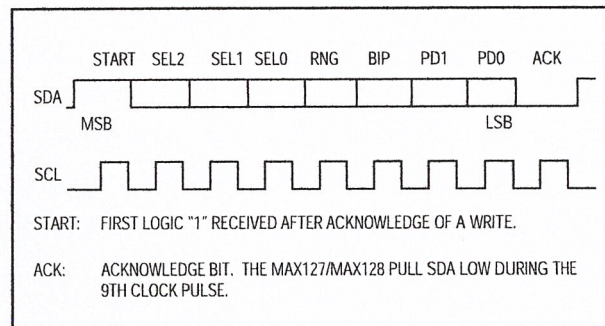


Figure 8. Command Byte

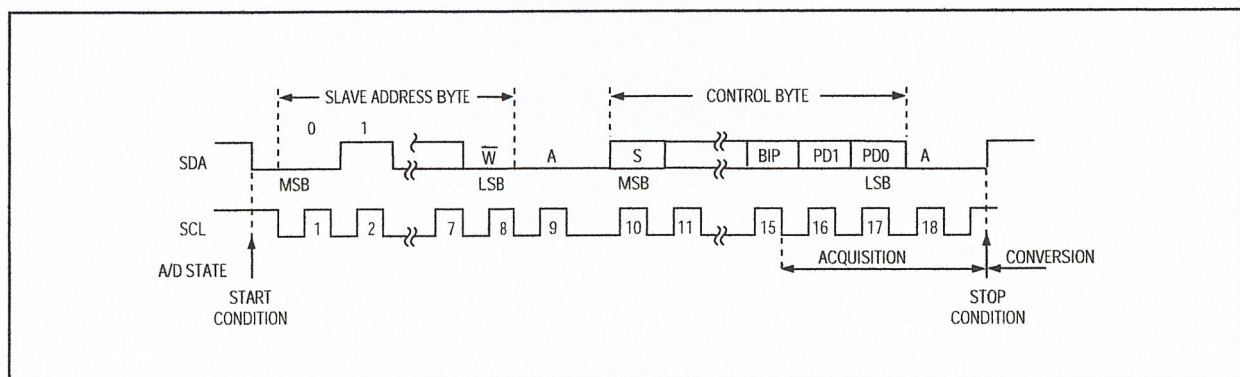


Figure 9. Complete 2-Wire Serial Write Transmission

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

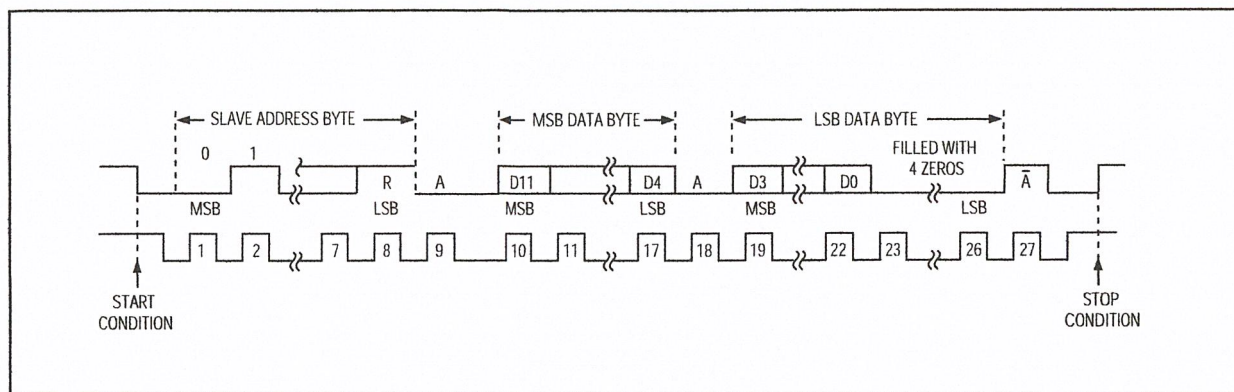


Figure 10. Complete 2-Wire Serial Read Transmission

The MAX127/MAX128 ignore acknowledge and NOT-acknowledge conditions issued by the master during the read cycle. The device waits for the master to read the output data or waits until a STOP condition is issued. Figure 10 shows a complete read cycle.

In unipolar input mode, the output is straight binary. For bipolar input mode, the output is two's complement. For output binary codes see the *Transfer Function* section.

Applications Information

Power-On Reset

The MAX127/MAX128 power up in normal operating mode, waiting for a START condition followed by the appropriate slave address. The contents of the input and output data registers are cleared at power-up.

Internal or External Reference

The MAX127/MAX128 operate with either an internal or an external reference (Figures 11a–11c). An external reference is connected to either REF or to REFADJ.

The REFADJ internal buffer gain is trimmed to 1.6384 to provide 4.096V at REF from a 2.5V reference.

Internal Reference

The internally trimmed 2.50V reference is amplified through the REFADJ buffer to provide 4.096V at REF. Bypass REF with a 4.7μF capacitor to AGND and bypass REFADJ with a 0.01μF capacitor to AGND (Figure 11a). The internal reference voltage is adjustable to ±1.5% (±65 LSBs) with the reference-adjust circuit of Figure 12.

External Reference

To use the REF input directly, disable the internal buffer by connecting REFADJ to V_{DD} (Figure 11b). Using the REFADJ input eliminates the need to buffer the reference externally. When the reference is applied at REFADJ, bypass REFADJ with a 0.01μF capacitor to AGND (Figure 11c).

At REF and REFADJ, the input impedance is a minimum of 10kΩ for DC currents. During conversions, an external reference at REF must be able to drive a 400μA DC load, and must have an output impedance of 10Ω or less. If the reference has higher input impedance or is noisy, bypass REF with a 4.7μF capacitor to AGND as close to the chip as possible.

With an external reference voltage of less than 4.096V at REF or less than 2.5V at REFADJ, the increase in RMS noise to the LSB value (full-scale voltage/4096) results in performance degradation and loss of effective bits.

Power-Down Mode

To save power, put the converter into low-current shutdown mode between conversions. Two programmable power-down modes are available, in addition to the hardware shutdown. Select STBYPD or FULLPD by programming PD0 and PD1 in the input control byte (Table 4). When software power-down is asserted, it becomes effective only after the end of conversion. In all power-down modes, the interface remains active and conversion results may be read. Input overvoltage protection is active in all power-down modes.

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

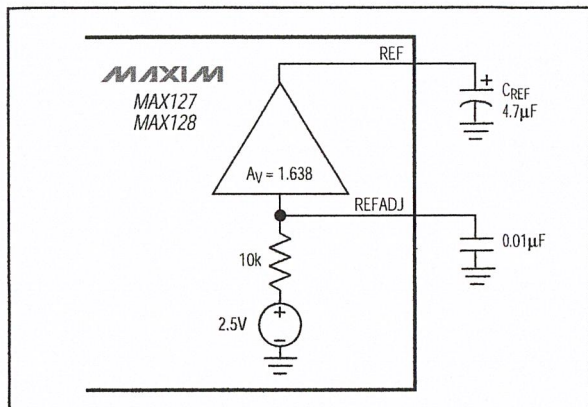


Figure 11a. Internal Reference

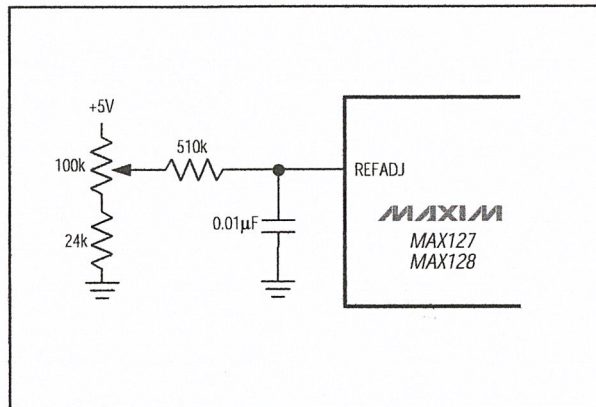


Figure 12. Reference-Adjust Circuit

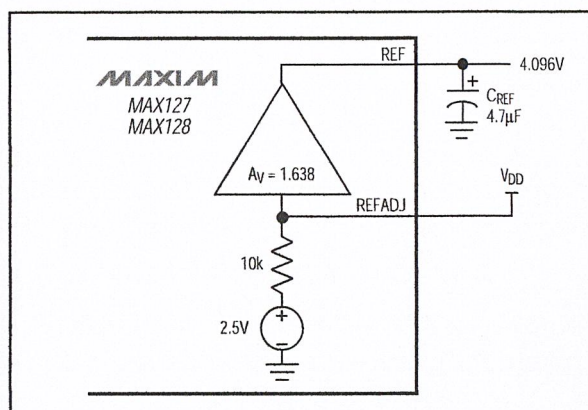


Figure 11b. External Reference, Reference at REF

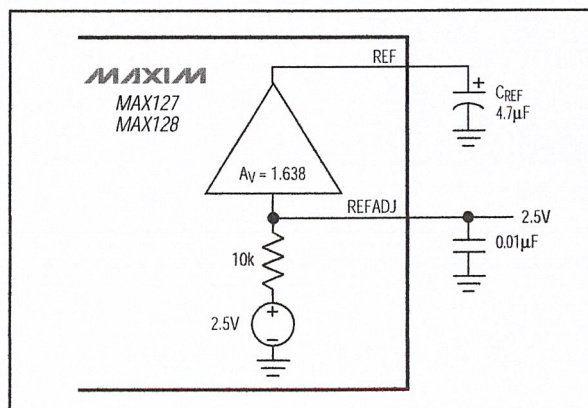


Figure 11c. External Reference, Reference at REFADJ

To power-up from a software initiated power-down, a START condition followed by the correct slave address must be received (with R/W = 0). The MAX127/MAX128 power-up after receiving the next bit.

For hardware-controlled power-down (FULLPD), pull SHDN low. When hardware shutdown is asserted, it becomes effective immediately and any conversion in progress is aborted.

Choosing Power-Down Modes

The bandgap reference and reference buffer remain active in STBYPD mode, maintaining the voltage on the 4.7µF capacitor at REF. This is a "DC" state that does not degrade after standby power-down of any duration.

In FULLPD mode, only the bandgap reference is active. Connect a 33µF capacitor between REF and AGND to maintain the reference voltage between conversions and to reduce transients when the buffer is enabled and disabled. Throughput rates down to 1ksps can be achieved without allotting extra acquisition time for reference recovery prior to conversion. This allows conversion to begin immediately after power-down ends. If the discharge of the REF capacitor during FULLPD exceeds the desired limits for accuracy (less than a fraction of an LSB), run a STBYPD power-down cycle prior to starting conversions. Take into account that the reference buffer recharges the bypass capacitor at an 80mV/ms slew rate, and add 50µs for settling time.

Auto-Shutdown

Selecting STBYPD on every conversion automatically shuts the MAX127/MAX128 down after each conversion without requiring any start-up time on the next conversion.

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

MAX127/MAX128

Transfer Function

Output data coding for the MAX127/MAX128 is binary in unipolar mode with $1\text{LSB} = (\text{FS}/4096)$ and two's complement binary in bipolar mode with $1\text{LSB} = [(2 \times |\text{FS}|)/4096]$. Code transitions occur halfway between successive-integer LSB values. Figures 13a and 13b show the input/output (I/O) transfer functions for unipolar and bipolar operations, respectively. For full-scale (FS) values, refer to Table 3.

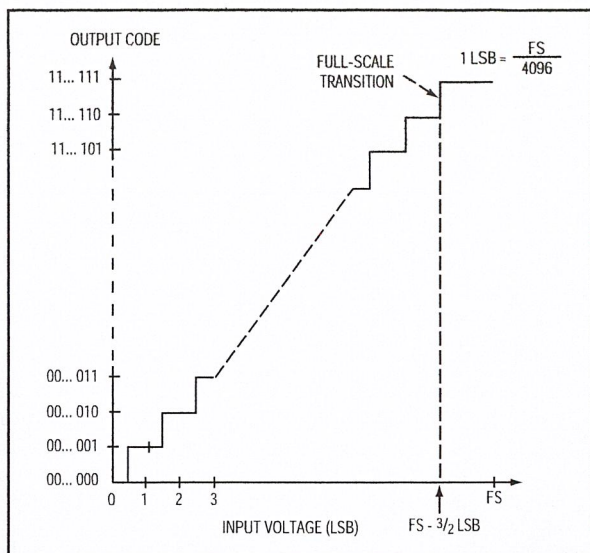


Figure 13a. Unipolar Transfer Function

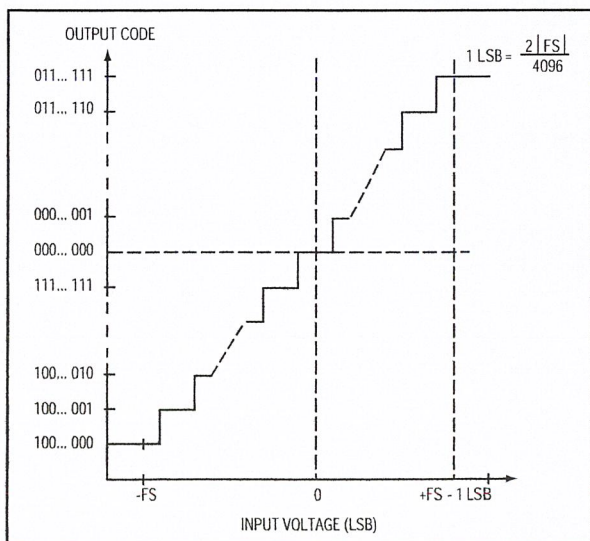


Figure 13b. Bipolar Transfer Function

Layout, Grounding, and Bypassing

Careful printed circuit board layout is essential for best system performance. For best performance, use a ground plane. To reduce crosstalk and noise injection, keep analog and digital signals separate. Connect analog grounds and DGND in a star configuration to AGND. For noise-free operation, ensure the ground return from AGND to the supply ground is low impedance and as short as possible. Connect the logic grounds directly to the supply ground. Bypass V_{DD} with $0.1\mu\text{F}$ and $4.7\mu\text{F}$ capacitors to AGND to minimize high- and low-frequency fluctuations. If the supply is excessively noisy, connect a 5Ω resistor between the supply and V_{DD} , as shown in Figure 14.

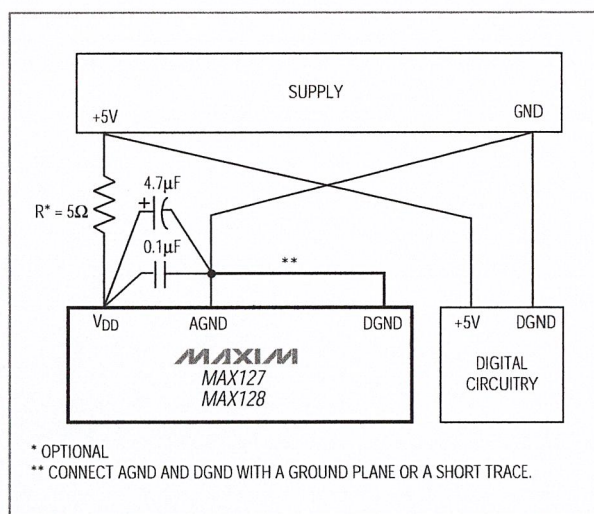


Figure 14. Power-Supply Grounding Connection

Multirange, +5V, 12-Bit DAS with 2-Wire Serial Interface

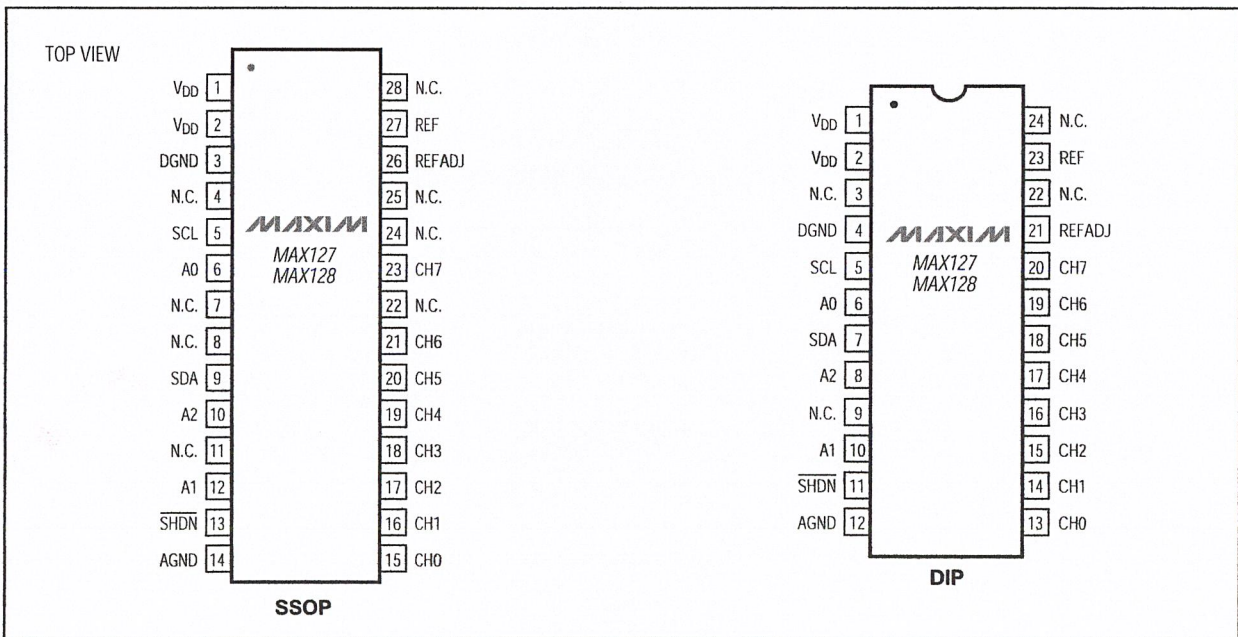
Ordering Information (continued)

PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE	INL (LSB)
MAX127ACAI	0°C to +70°C	28 SSOP	±1/2
MAX127BCAI	0°C to +70°C	28 SSOP	±1
MAX127AENG	-40°C to +85°C	24 Narrow Plastic DIP	±1/2
MAX127BENG	-40°C to +85°C	24 Narrow Plastic DIP	±1
MAX127AEAI	-40°C to +85°C	28 SSOP	±1/2
MAX127BEAI	-40°C to +85°C	28 SSOP	±1
MAX128 ACNG	0°C to +70°C	24 Narrow Plastic DIP	±1/2
MAX128BCNG	0°C to +70°C	24 Narrow Plastic DIP	±1
MAX128ACAI	0°C to +70°C	28 SSOP	±1/2
MAX128BCAI	0°C to +70°C	28 SSOP	±1
MAX128AENG	-40°C to +85°C	24 Narrow Plastic DIP	±1/2
MAX128BENG	-40°C to +85°C	24 Narrow Plastic DIP	±1
MAX128AEAI	-40°C to +85°C	28 SSOP	±1/2
MAX128BEAI	-40°C to +85°C	28 SSOP	±1

Chip Information

TRANSISTOR COUNT: 4219
 SUBSTRATE CONNECTED to AGND

Pin Configurations



Maxim cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are implied. Maxim reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.

16 **Maxim Integrated Products, 120 San Gabriel Drive, Sunnyvale, CA 94086 408-737-7600**

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

General Description

The MAX520/MAX521 are quad/octal, 8-bit voltage-output digital-to-analog converters (DACs) with simple 2-wire serial interfaces that allow communication between multiple devices. They operate from a single +5V supply and their reference input range includes both supply rails.

The MAX521 includes rail-to-rail output buffer amplifiers for reduced system size and component count when driving loads. The MAX520's unbuffered voltage outputs reduce the device's total supply current to 4 μ A and provide increased accuracy at low output currents.

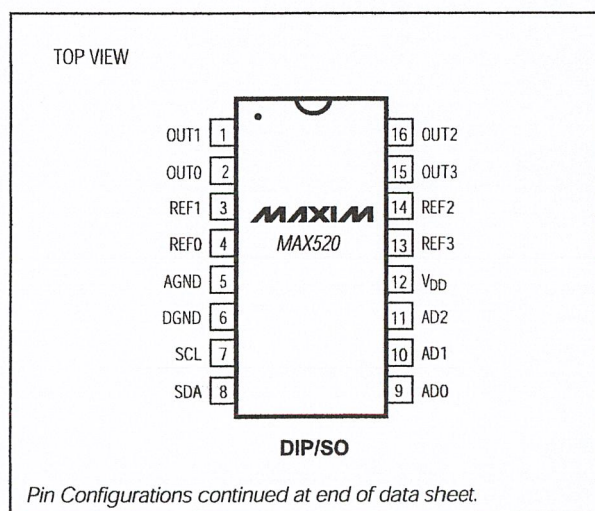
The MAX520/MAX521 feature a serial interface and internal software protocol, allowing communication at data rates up to 400kbps. The interface, combined with the double-buffered input configuration, allows the DAC registers to be updated individually or simultaneously. In addition, the devices can be put into a low-power shutdown mode that reduces supply current to 4 μ A. Power-on reset ensures the DAC outputs are at 0V when power is initially applied.

The MAX520 is available in 16-pin DIP and wide SO packages, as well as a space-saving 20-pin SSOP. The MAX521 comes in 20-pin DIP and 24-pin SO packages, as well as a space-saving 24-pin SSOP.

Applications

Minimum Component Analog Systems
Digital Offset/Gain Adjustment
Industrial Process Control
Automatic Test Equipment
Programmable Attenuators

Pin Configurations



Features

- ◆ Single +5V Supply
- ◆ Simple 2-Wire Serial Interface
- ◆ I²C Compatible
- ◆ Outputs Swing Rail to Rail:
Unbuffered Outputs (MAX520)
Buffered Outputs (MAX521)
- ◆ 1%-Accurate Trimmed Output Resistance (MAX520A)
- ◆ Ultra-Low 4 μ A Supply Current (MAX520)
- ◆ Individual DACs Have Separate Reference Inputs
- ◆ Power-On Reset Clears All Latches
- ◆ 4 μ A Power-Down Mode

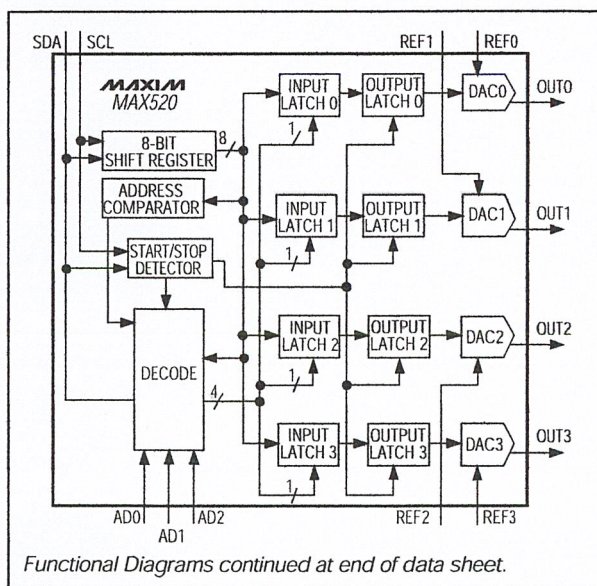
Ordering Information

PART [†]	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE	TUE (LSB)
MAX520ACPE	0°C to +70°C	16 Plastic DIP	1
MAX520BCPE	0°C to +70°C	16 Plastic DIP	1
MAX520ACWE	0°C to +70°C	16 Wide SO	1
MAX520BCWE	0°C to +70°C	16 Wide SO	1

Ordering Information continued at end of data sheet.

[†]MAX520 "A" grade parts include a 1%-accurate, factory-trimmed output resistance.

Functional Diagrams



Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

V _{DD} to DGND	-0.3V to +6V	16-Pin Wide SO (derate 9.52mW/°C above +70°C)	762mW
V _{DD} to AGND.....	-0.3V to +6V	24-Pin Wide SO (derate 11.76mW/°C above +70°C)	941mW
OUT	-0.3V to (V _{DD} + 0.3V)	20-Pin SSOP (derate 8.00mW/°C above +70°C)	640mW
REF	-0.3V to (V _{DD} + 0.3V)	24-Pin SSOP (derate 8.00mW/°C above +70°C)	640mW
AD0, AD1, AD2.....	-0.3V to (V _{DD} + 0.3V)	16-Pin CERDIP (derate 10.00mW/°C above +70°C).....	800mW
SCL, SDA to DGND	-0.3V to +6V	20-Pin CERDIP (derate 11.11mW/°C above +70°C).....	889mW
AGND to DGND.....	-0.3V to +0.3V	Operating Temperature Ranges	
Maximum Current into Any Pin.....	50mA	MAX520_C_/MAX521_C_	0°C to +70°C
Continuous Power Dissipation (T _A = +70°C)		MAX520_E_/MAX521_E_	-40°C to +85°C
16-Pin Plastic DIP (derate 10.53mW/°C above +70°C)....	842mW	MAX520_MJE/MAX521BMJP	-55°C to +125°C
20-Pin Plastic DIP (derate 11.11mW/°C above +70°C)....	889mW	Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
		Lead Temperature (soldering, 10sec)	+300°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V_{DD} = 5V ±10%, V_{REF} = 4V, R_L = ∞ (MAX520), R_L = 10kΩ (MAX521), C_L = 0pF (MAX520), C_L = 100pF (MAX521), T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted. Typical values are at T_A = +25°C)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
STATIC ACCURACY							
Resolution			8			Bits	
Total Unadjusted Error	TUE	MAX520_	±1			LSB	
		MAX521A	±1.5				
		MAX521B	±2				
Differential Nonlinearity	DNL	Guaranteed monotonic	±1.0			LSB	
Zero-Code Error	ZCE	Code = 00 hex	MAX520_	8			mV
			MAX521_C	18			
			MAX521_E	20			
			MAX521BM	20			
Zero-Code-Error Supply Rejection		Code = 00 hex	±1			mV	
Zero-Code-Error Temperature Coefficient		Code = 00 hex	±10			µV/°C	
Full-Scale Error		Code = FF hex	MAX520_	8			mV
			MAX521_C	18			
			MAX521_E	20			
			MAX521BM	20			
Full-Scale-Error Supply Rejection		Code = FF hex, V _{DD} = 5V ±10%	±1			mV	
Full-Scale-Error Temperature Coefficient			±10			µV/°C	

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

MAX520/MAX521

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

($V_{DD} = 5V \pm 10\%$, $V_{REF_} = 4V$, $R_L = \infty$ (MAX520), $R_L = 10k\Omega$ (MAX521), $C_L = 0pF$ (MAX520), $C_L = 100pF$ (MAX521), $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^\circ C$)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
REFERENCE INPUTS							
Input Voltage Range			0		V_{DD}	V	
Input Resistance	R_{IN}	Code = 55 hex (Note 1)	MAX520_	8	12	$k\Omega$	
			MAX521_	REF4	4		6
			MAX521_	REF0-REF3	16	24	
Input Current		PD = 1			± 10	μA	
Input Capacitance		Code = FF hex (Note 2)	MAX520_		30	pF	
			MAX521_	REF4			120
			MAX521_	REF0-REF3		30	
Channel-to-Channel Isolation		(Note 3)	MAX520_		-70	dB	
			MAX521_		-60		
AC Feedthrough		(Note 4)			-70	dB	
DAC OUTPUTS							
Full-Scale Output Voltage			0		V_{DD}	V	
Output Resistance (Note 5)		MAX520A	$T_A = +25^\circ C$	15.8	16	16.2	$k\Omega$
			$T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX}	15.6	16	16.4	
		MAX520B		8.4		16.4	
Output Load Regulation		MAX521_, $OUT_ = 4V$, 0mA to 2.5mA			0.25	LSB	
		MAX521_C/E, $V_{REF_} = V_{DD}$, code = FF hex, 0 μA to 500 μA			1.5		
		MAX521BM, $V_{REF_} = V_{DD}$, code = FF hex, 0 μA to 500 μA			2.0		
Output Leakage Current		MAX521_, $OUT_ = 0V$ to V_{DD} , PD = 1			± 10	μA	
DIGITAL INPUTS SCL, SDA							
Input High Voltage	V_{IH}		0.7 V_{DD}			V	
Input Low Voltage	V_{IL}				0.3 V_{DD}	V	
Input Current	I_{IN}	$0V \leq V_{IN} \leq V_{DD}$			± 10	μA	
Input Hysteresis	V_{HYST}	(Note 5)	0.05 V_{DD}			V	
Input Capacitance	C_{IN}	(Note 5)			10	pF	
DIGITAL INPUTS AD0, AD1							
Input High Voltage	V_{IH}		2.4			V	
Input Low Voltage	V_{IL}				0.8	V	
Input Leakage	I_{IN}	$V_{IN} = 0V$ to V_{DD}			± 10	μA	
DIGITAL OUTPUT SDA (Note 6)							
Output Low Voltage	V_{OL}	$I_{SINK} = 3mA$			0.4	V	
		$I_{SINK} = 6mA$			0.6		
Three-State Leakage Current	I_L	$V_{IN} = 0V$ to V_{DD}			± 10	μA	
Three-State Output Capacitance	C_{OUT}	(Note 5)			10	pF	

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

MAX520/MAX521

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

($V_{DD} = 5V \pm 10\%$, $V_{REF_} = 4V$, $R_L = \infty$ (MAX520), $R_L = 10k\Omega$ (MAX521), $C_L = 0pF$ (MAX520), $C_L = 100pF$ (MAX521), $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^\circ C$)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
DYNAMIC PERFORMANCE						
Voltage Output Slew Rate		Positive and negative	MAX521_C	1.0		V/ μ s
			MAX521_E	0.7		
			MAX521BM	0.5		
Output Settling Time		MAX520_, to 1/2LSB, no load		2		μ s
		MAX521_, to 1/2LSB, 10k Ω and 100pF load (Note 7)		6		
Digital Feedthrough		Code = 00 hex, all digital inputs from 0V to V_{DD}		5		nV-s
Digital-Analog Glitch Impulse		Code 128 to 127		12		nV-s
Signal to Noise + Distortion Ratio	SINAD	$V_{REF_} = 4Vp-p$ at 1kHz, $V_{DD} = 5V$, code = FF hex		87		dB
Multiplying Bandwidth		$V_{REF_} = 4Vp-p$, 3dB bandwidth		1		MHz
Wideband Amplifier Noise		MAX521_		60		μ V _{RMS}
POWER REQUIREMENTS						
Supply Voltage	V_{DD}		4.5		5.5	V
Supply Current	I_{DD}	Operating mode, output unloaded, all digital inputs 0V or V_{DD}	MAX520_	4	20	μ A
			MAX521_C	10	20	mA
			MAX521_E/BM	10	24	
		Power-down mode (PD = 1)		4	20	μ A

Note 1: Input resistance is code dependent. The lowest input resistance occurs at code = 55 hex.

Note 2: Input capacitance is code dependent. The highest input capacitance occurs at code = FF hex.

Note 3: $V_{REF_} = 4Vp-p$, 10kHz. Channel-to-channel isolation is measured by setting the code of one DAC to FF hex and setting the code of all other DACs to 00 hex.

Note 4: $V_{REF_} = 4Vp-p$, 10kHz, DAC code = 00 hex.

Note 5: Guaranteed by design.

Note 6: I²C-compatible mode.

Note 7: Output settling time is measured by taking the code from 00 hex to FF hex, and from FF hex to 00 hex.

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

MAX520/MAX521

TIMING CHARACTERISTICS

(V_{DD} = 5V ±10%, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted. Typical values are at T_A = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Serial Clock Frequency	f _{SCL}		0		400	kHz
Bus Free Time Between a STOP and a START Condition	t _{BUF}		1.3			μs
Hold Time, (Repeated) Start Condition	t _{HD, STA}		0.6			μs
Low Period of the SCL Clock	t _{LOW}		1.3			μs
High Period of the SCL Clock	t _{HIGH}		0.6			μs
Setup Time for a Repeated START Condition	t _{SU, STA}		0.6			μs
Data Hold Time	t _{HD, DAT}	(Note 8)	0		0.9	μs
Data Setup Time	t _{SU, DAT}		100			ns
Rise Time of Both SDA and SCL Signals, Receiving	t _R	(Note 9)	20 + 0.1Cb		300	ns
Fall Time of Both SDA and SCL Signals, Receiving	t _F	(Note 9)	20 + 0.1Cb		300	ns
Fall Time of SDA Transmitting (Note 6)	t _F	I _{SINK} ≤ 6mA (Note 9)	20 + 0.1Cb		250	ns
Setup Time for STOP Condition	t _{SU, STO}		0.6			μs
Capacitive Load for Each Bus Line	C _b				400	pF
Pulse Width of Spike Suppressed	t _{SP}	(Notes 10, 11)	0		50	ns

Note 8: A master device must provide a hold time of at least 300ns for the SDA signal (referred to V_{IL} of the SCL signal) in order to bridge the undefined region of SCL's falling edge.

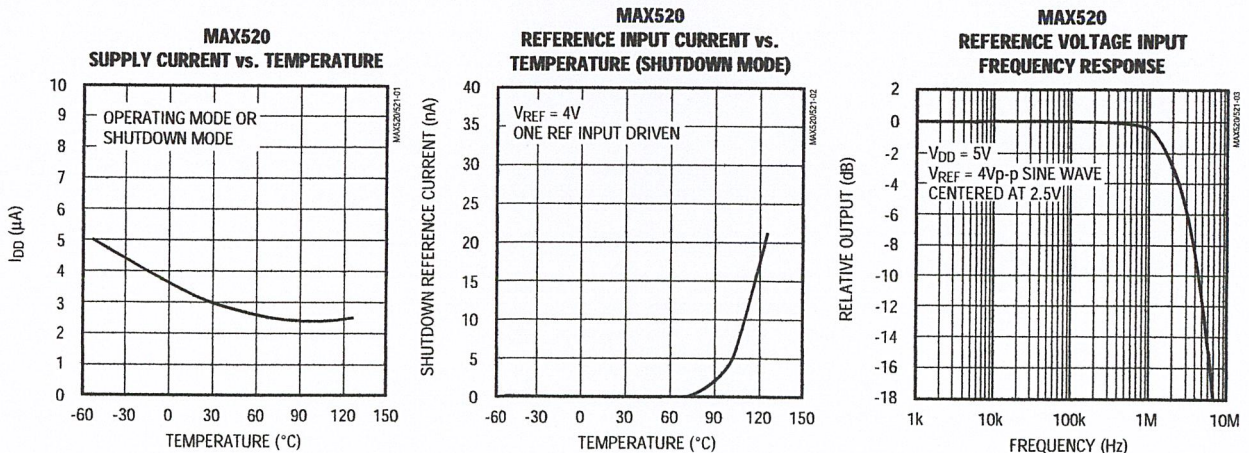
Note 9: C_b = total capacitance of one bus line in pF. t_r and t_f measured between 0.3V_{DD} and 0.7V_{DD}.

Note 10: An input filter on the SDA and SCL input suppresses noise spikes less than 50ns.

Note 11: Guaranteed by design.

Typical Operating Characteristics

(V_{DD} = 5V, DAC outputs unloaded, T_A = +25°C, unless otherwise noted.)

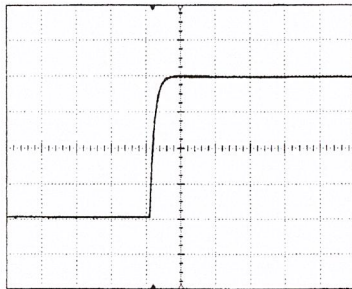


Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

Typical Operating Characteristics (continued)

(V_{DD} = 5V, DAC outputs unloaded, T_A = +25°C, unless otherwise noted.)

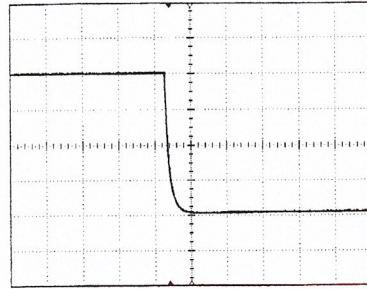
**MAX520
POSITIVE SETTLING TIME**



OUT2
1V/div

1µs/div
OUT2 = NO LOAD, REF2 = 4V,
DAC CODE = 00 HEX to FF HEX

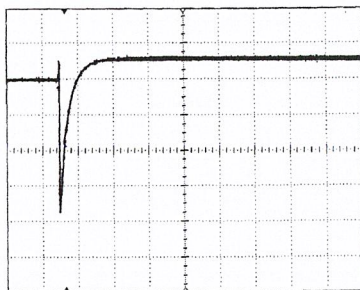
**MAX520
NEGATIVE SETTLING TIME**



OUT2
1V/div

1µs/div
OUT2 = NO LOAD, REF2 = 4V,
DAC CODE = FF HEX to 00 HEX

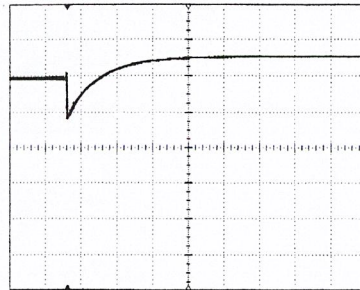
**MAX520
WORST-CASE 1LSB DIGITAL STEP CHANGE
(CAPACITIVE LOAD < 5pF)**



OUT2
20mV/div
AC COUPLED

500ns/div
REF2 = 4V, DAC CODE = 7F HEX to 80 HEX

**MAX520
WORST-CASE 1LSB DIGITAL STEP CHANGE
(CAPACITIVE LOAD = 25pF)**



OUT2
20mV/div
AC COUPLED

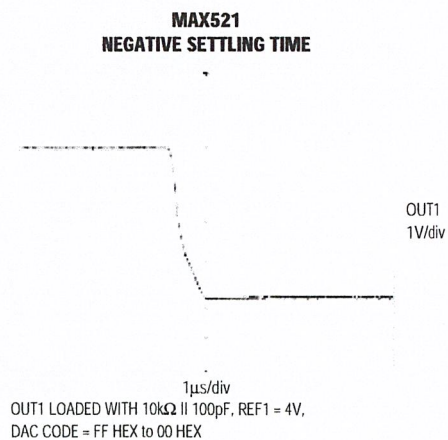
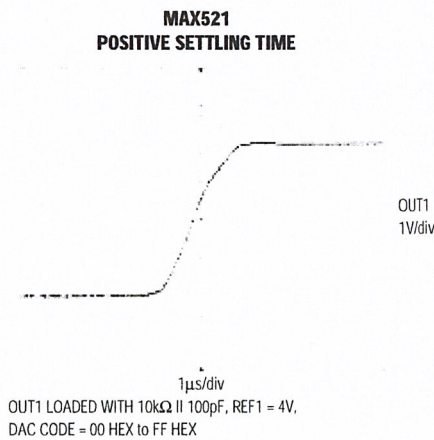
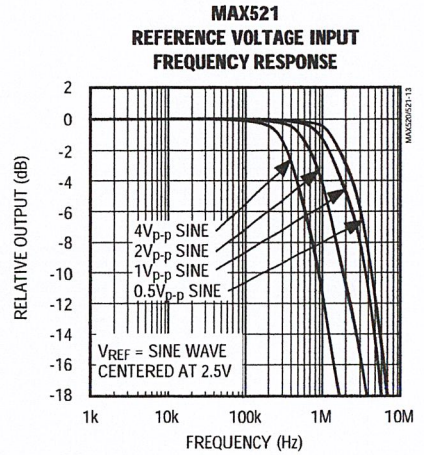
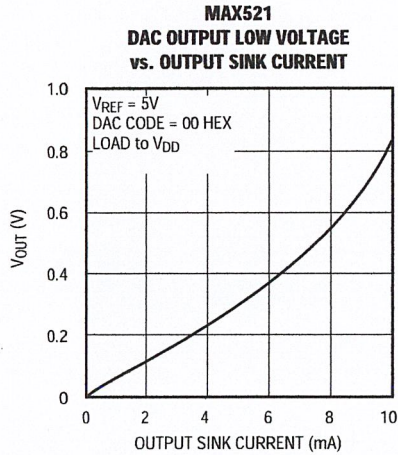
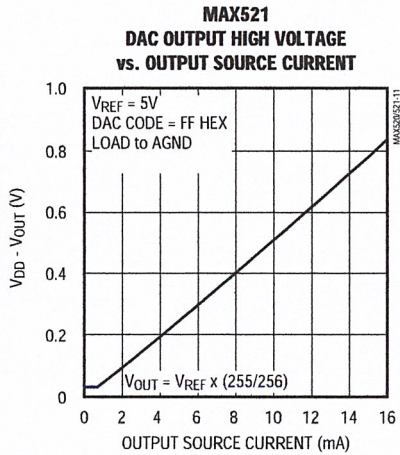
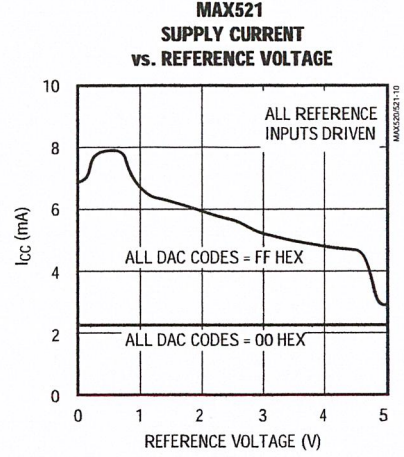
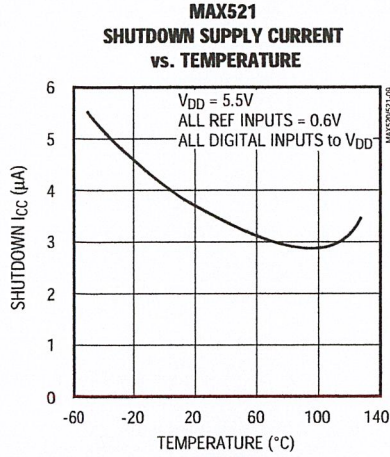
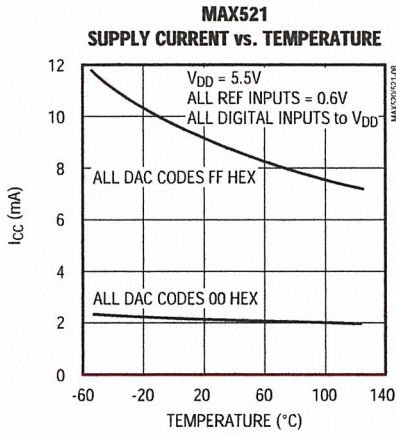
500ns/div
REF2 = 4V, DAC CODE = 7F HEX to 80 HEX

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

Typical Operating Characteristics

($V_{DD} = 5V$, DAC outputs unloaded, $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.)

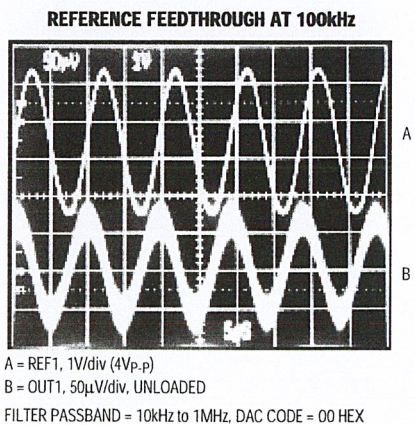
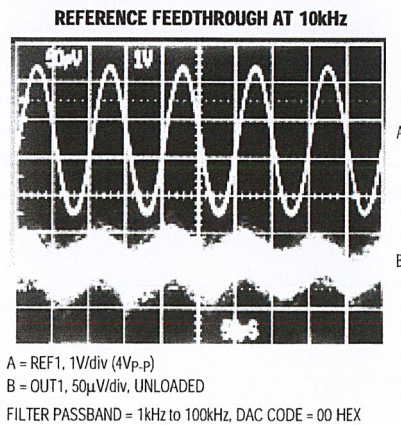
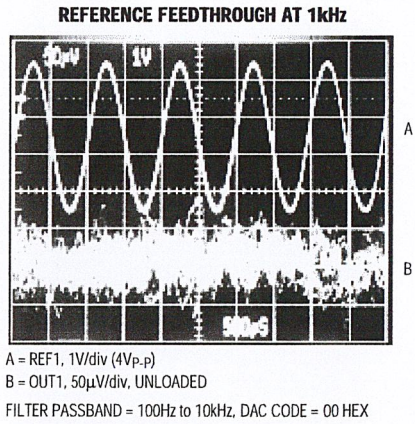
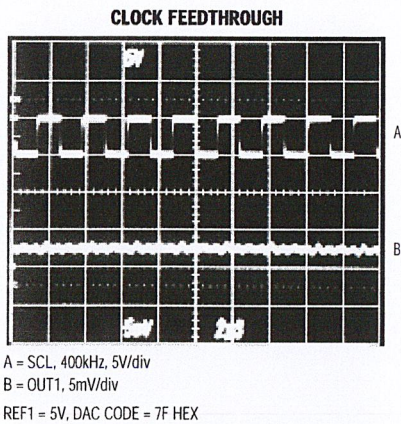
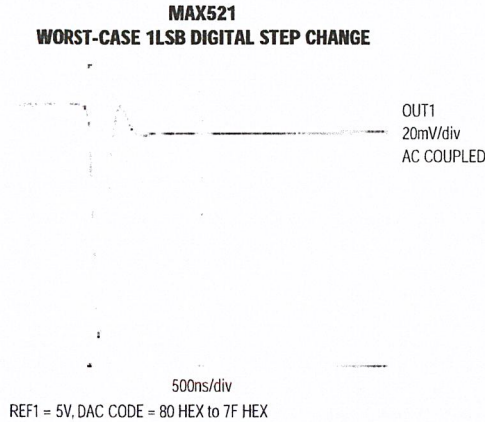
MAX520/MAX521



Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

Typical Operating Characteristics (continued)

(VDD = 5V, DAC outputs unloaded, TA = +25°C, unless otherwise noted.)



Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

Pin Description

MAX520/MAX521

PIN				NAME	FUNCTION
MAX520		MAX521			
DIP/SO	SSOP	DIP	SO/SSOP		
1	1	1	1	OUT1	DAC1 Voltage Output
2	2	2	2	OUT0	DAC0 Voltage Output
3	3	3	3	REF1	Reference Voltage Input for DAC1
4	5	4	4	REF0	Reference Voltage Input for DAC0
—	4, 7, 14, 17	—	7, 9, 16, 20	N.C.	No Connect—not internally connected
6	8	5	5	DGND	Digital Ground
5	6	6	6	AGND	Analog Ground
7	9	7	8	SCL	Serial Clock Input
8	10	8	10	SDA	Serial Data Input
—	—	9	11	OUT4	DAC4 Voltage Output
—	—	10	12	OUT5	DAC5 Voltage Output
—	—	11	13	OUT6	DAC6 Voltage Output
—	—	12	14	OUT7	DAC7 Voltage Output
9	11	13	15	AD0	Address Input 0; sets IC's slave address
10	12	14	17	AD1	Address Input 1; sets IC's slave address
11	13	—	—	AD2	Address Input 2; sets IC's slave address
12	15	15	18	V _{DD}	Power Supply, +5V
—	—	16	19	REF4	Reference Voltage Input for DACs 4, 5, 6, and 7
13	16	17	21	REF3	Reference Voltage Input for DAC3
14	18	18	22	REF2	Reference Voltage Input for DAC2
15	19	19	23	OUT3	DAC3 Voltage Output
16	20	20	24	OUT2	DAC2 Voltage Output

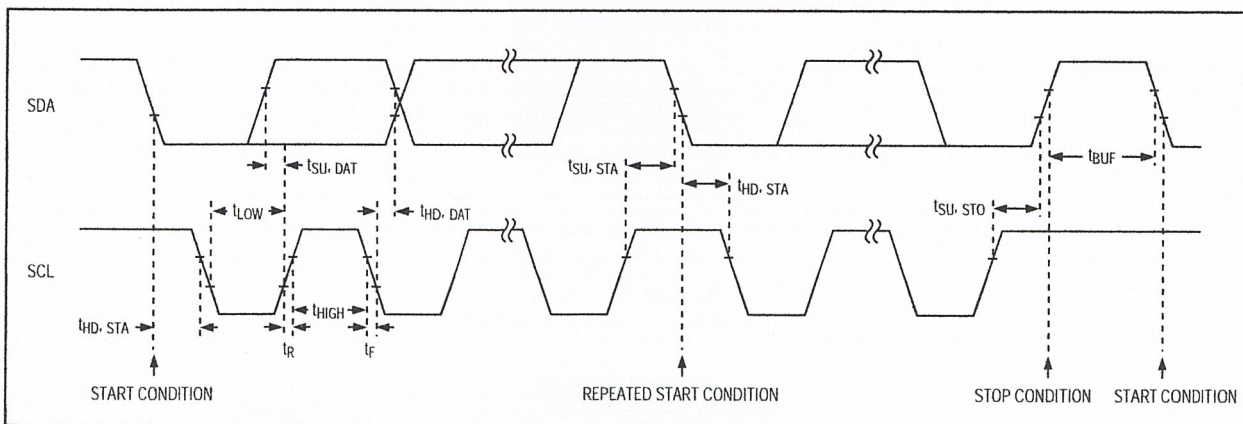


Figure 1. 2-Wire Serial-Interface Timing Diagram

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

Detailed Description

Serial Interface

The MAX520/MAX521 use a simple 2-wire serial interface requiring only two I/O lines (2-wire bus) of a standard microprocessor (μ P) port. Figure 1 shows the timing diagram for signals on the 2-wire bus. Figure 2 shows the typical application of the MAX520/MAX521. The 2-wire bus can have several devices (in addition to the MAX520/MAX521) attached. The two bus lines (SDA and SCL) must be high when the bus is not in use. When in use, the port bits are toggled to generate the appropriate signals for SDA and SCL. External pull-up resistors are not required on these lines. The MAX520/MAX521 can be used in applications where pull-up resistors are required (such as in I²C systems) to maintain compatibility with the existing circuitry.

The MAX520/MAX521 are receive-only devices and must be controlled by a bus master device. They operate at SCL rates up to 400kHz. A master device sends information to the devices by transmitting their address over the bus and then transmitting the desired information. Each transmission consists of a START condition, the MAX520/MAX521's programmable slave-address, one or more command-byte/output-byte pairs (or a command byte alone, if it is the last byte in the transmission), and finally, a STOP condition (Figure 3).

The address byte and pairs of command and output bytes are transmitted between the START and STOP conditions. The SDA state is allowed to change only while SCL is low. SDA's state is sampled, and therefore must remain stable while SCL is high. The only exceptions to this are the START and STOP conditions. Data is transmitted in 8-bit bytes. Nine clock cycles are required to transfer the data bits to the MAX520/MAX521. Set SDA low during the 9th clock cycle as the MAX520/MAX521 pull SDA low during this time. R_C (Figure 2) limits the current that flows during this time if SDA stays high for short periods of time.

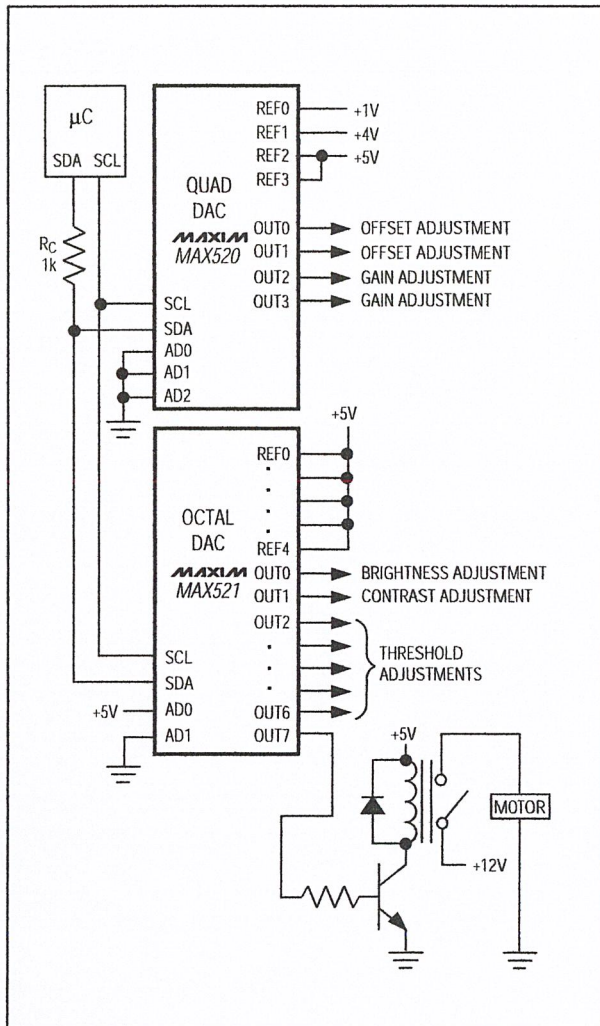


Figure 2. Typical Application Circuit

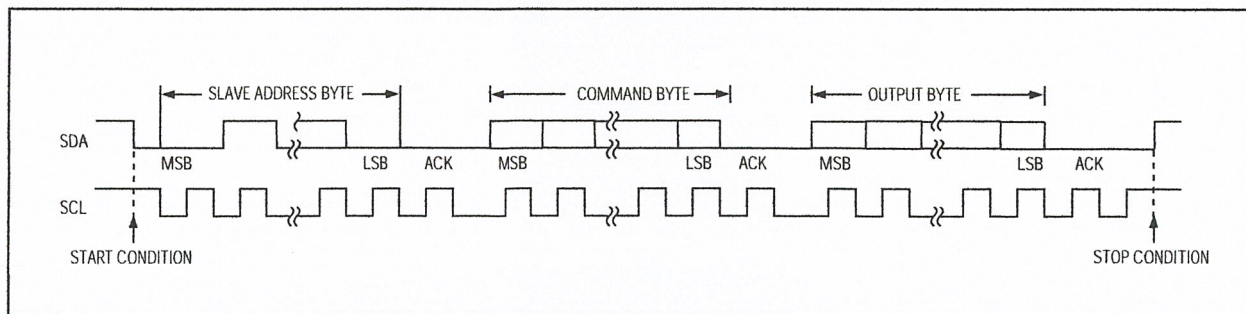


Figure 3. A Complete Serial Transmission

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

START and STOP Conditions

When the bus is not in use, both SCL and SDA must be high. A bus master signals the beginning of a transmission with a START condition by transitioning SDA from high to low while SCL is high (Figure 4). When the master has finished communicating with the slave, it issues a STOP condition by transitioning SDA from low to high while SCL is high. The bus is then free for another transmission.

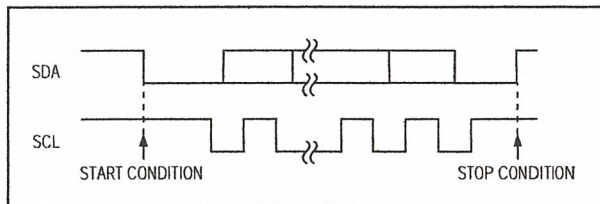


Figure 4. All communications begin with a START condition and end with a STOP condition, both generated by a bus master.

Slave Address

The MAX520/MAX521 each have a 7-bit-long slave address (Figure 5). The first four bits (MSBs) of the slave address have been factory programmed and are always 0101. In addition, the MAX521 has the next bit factory programmed to 0. The logic state of the address input pins (AD0, AD1, and AD2 of the MAX520; AD0 and AD1 of the MAX521) determine the least significant bits of the 7-bit slave address. These input pins may be connected to V_{DD} or DGND, or they may be actively driven by TTL or CMOS logic levels. There are four possible slave addresses for the MAX521, and therefore a maximum of four such devices may be on the bus at one time. The MAX520 has eight possible slave addresses. The eighth bit (LSB) in the slave address byte should be low when writing to the MAX520/MAX521.

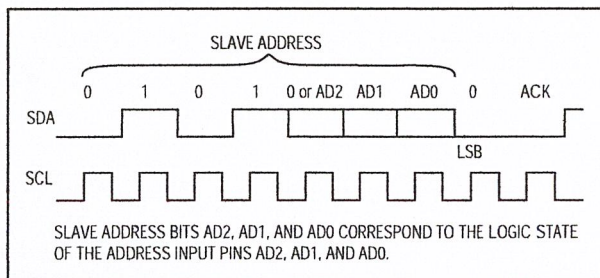


Figure 5. Address Byte

The MAX520/MAX521 monitor the bus continuously, waiting for a START condition followed by its slave address. When a device recognizes its slave address, it is ready to accept data.

Command Byte and Output Byte

A command byte follows the slave address. Figure 6 shows the format for the command byte. A command byte is usually followed by an output byte unless it is the last byte in the transmission. If it is the last byte, all bits except PD and RST are ignored. If an output byte follows the command byte, A0–A2 of the command byte indicate the digital address of the DAC whose input data latch receives the digital output data. The data is transferred to the DAC's output latch during the STOP condition following the transmission. This allows all DACs to be updated and the new outputs to appear simultaneously (Figure 7).

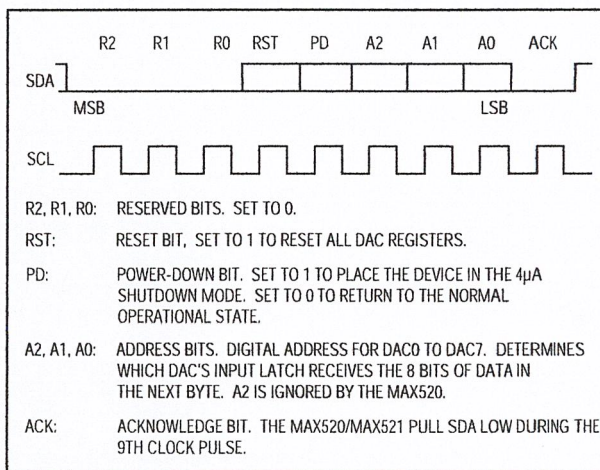


Figure 6. Command Byte

Setting the PD bit high powers down the MAX520/MAX521 following a STOP condition (Figure 8a). If a command byte with PD set high is followed by an output byte, the addressed DAC's input latch will be updated and the data will be transferred to the DAC's output latch following the STOP condition (Figure 8b). If the transmission's last command byte has PD high, the voltage outputs will not reflect the newly entered data because the DAC will enter power-down mode when

the STOP condition is detected. When in power-down, the MAX521's DAC outputs float, and the MAX520's unbuffered outputs look like a 16k Ω resistor to AGND. In this mode, the supply current is a maximum of 20 μ A. A command byte with the PD bit low returns the MAX520/MAX521 to normal operation following a STOP condition, and the voltage outputs reflect the current output-latch contents (Figures 9a and 9b). Because each subsequent command byte overwrites the previous PD bit, only the last command byte of a transmission affects the power-down state.

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

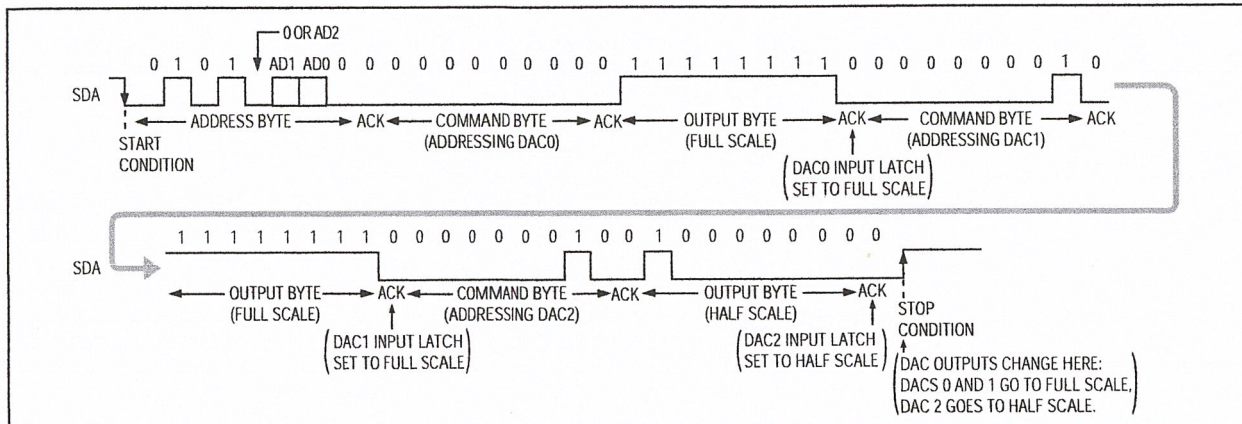


Figure 7. Setting DAC Outputs

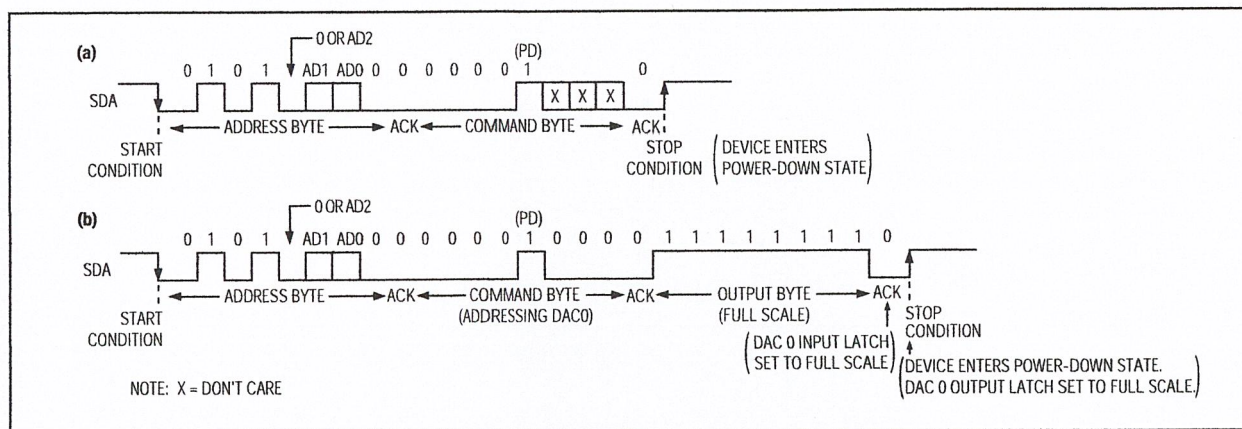


Figure 8. Entering the Power-Down State

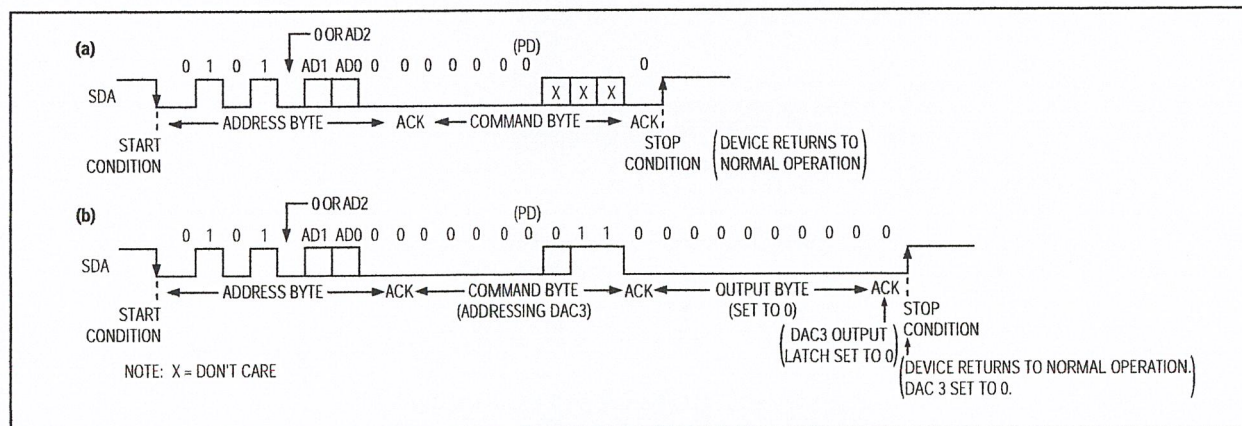


Figure 9. Returning to Normal Operation from Power-Down

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

MAX520/MAX521

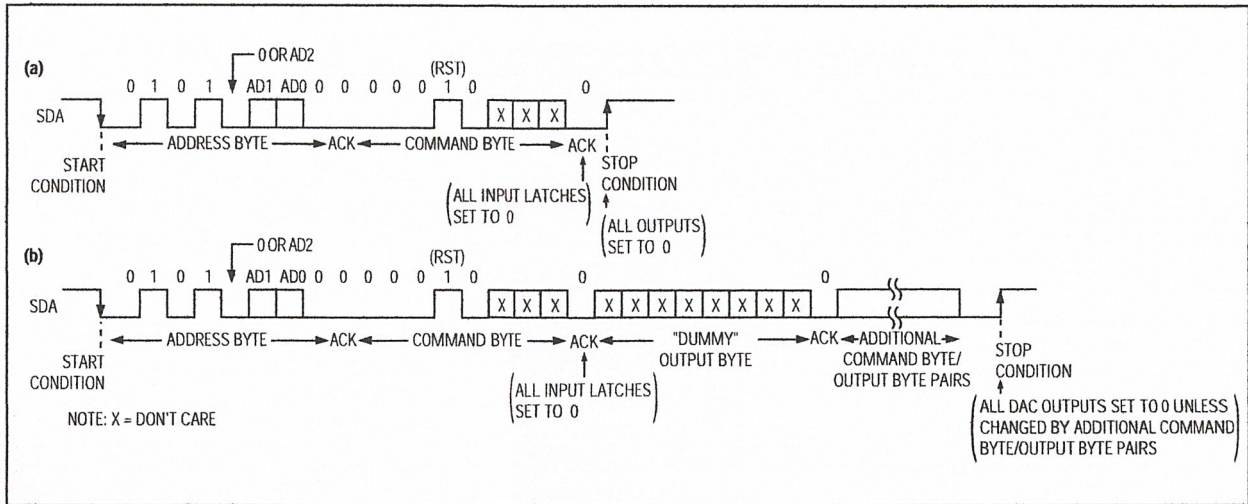


Figure 10. Resetting DAC Outputs

Setting the RST bit high clears all DAC input latches. The DAC outputs remain unchanged until a STOP condition is detected (Figure 10a). If a reset is issued, the following output byte is ignored. Subsequent pairs of command/output bytes overwrite the input latches (Figure 10b).

All changes made during a transmission affect the MAX520/MAX521's outputs only when the transmission ends and a STOP has been recognized. The R0, R1, and R2 bits are reserved bits that must be set to zero.

I²C Compatibility

The MAX520/MAX521 are fully compatible with existing I²C systems. SCL and SDA are high-impedance inputs; SDA has an open drain which pulls the data line low during the 9th clock pulse. Figure 11 shows a typical I²C application.

Additional START Conditions

It is possible to interrupt a transmission to a MAX520/MAX521 with a new START (repeated start) condition (perhaps addressing another device), which leaves the input latches with data that has not been transferred to the output latches (Figure 12). Only the currently addressed device will recognize a STOP condition and transfer data to its output latches. If the device is left with data in its input latches, the data can be transferred to the output latches the next time the device is addressed, as long as it receives at least one command byte and a STOP condition.

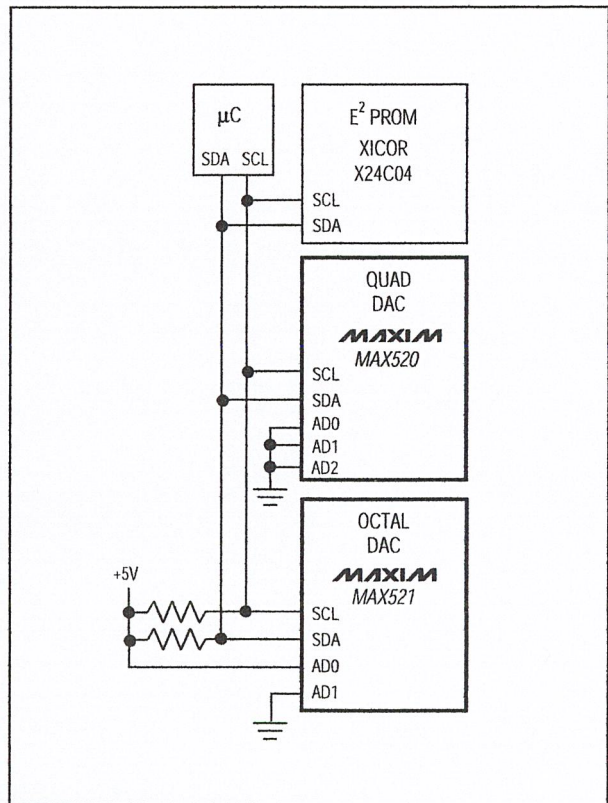


Figure 11. Typical I²C Application Circuit

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

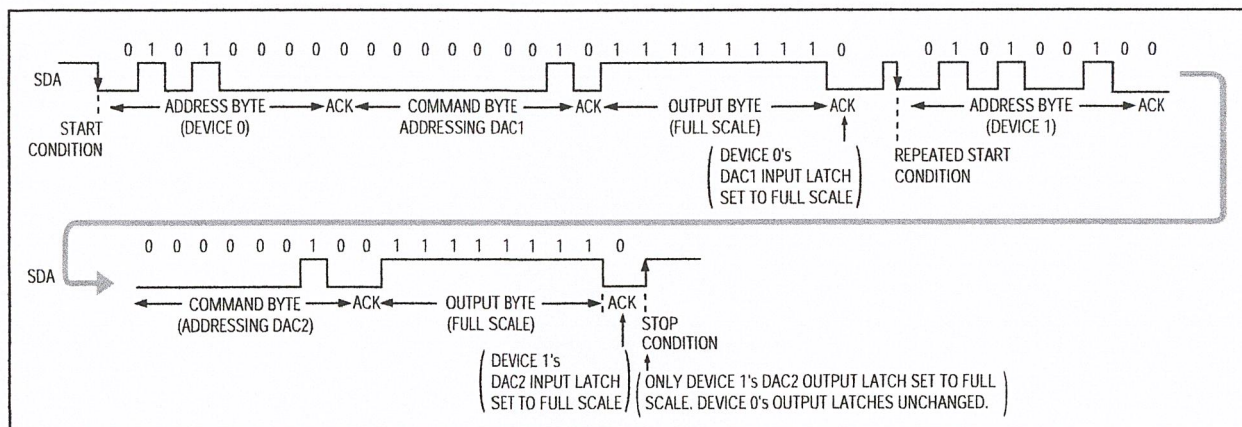


Figure 12. Repeated START Conditions

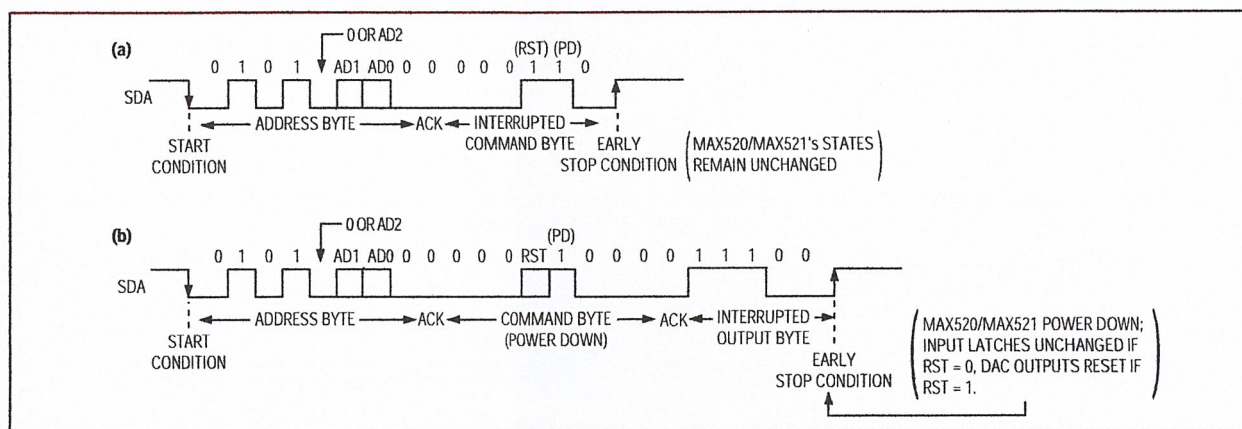


Figure 13. Early STOP Conditions

Early Stop Conditions

The addressed device recognizes a STOP condition at any point in a transmission. If the STOP occurs during a command byte, all previous uninterrupted command and output byte pairs are accepted, the interrupted command byte is ignored, and the transmission ends (Figure 13a). If the STOP occurs during an output byte, all previous uninterrupted command and output byte pairs are accepted, the final command byte's PD and RST bits are accepted, the interrupted output byte is ignored, and the transmission ends (Figure 13b).

Analog Section

DAC Operation

The MAX520 contains four matched voltage-output DACs, and the MAX521 contains eight. The DACs are inverted R-2R ladder networks that convert 8-bit digital

words into equivalent analog output voltages in proportion to the applied reference voltages. For both devices, DAC0–DAC3 each have separate reference inputs, while the MAX521's DAC4–DAC7 all share a common reference input. Figure 14 shows a simplified diagram of one DAC.

Reference Inputs

The MAX520/MAX521 can be used for multiplying applications. The reference accepts a 0V to V_{DD} voltage, both DC and AC signals. The voltage at each REF input sets the full-scale output voltage for its respective DAC(s). The reference voltage must be positive. The DAC's input impedance is code dependent, with the lowest value occurring when the input code is 55 hex or 0101 0101, and the maximum value occurring when the input code is 00 hex. Since the REF input resistance

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

MAX520/MAX521

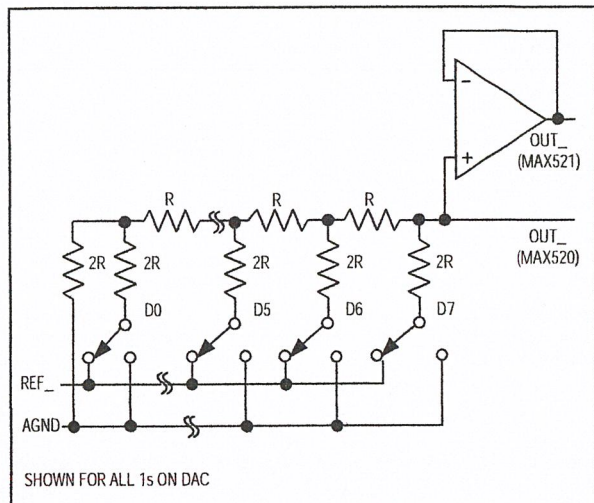


Figure 14. DAC Simplified Circuit Diagram

(R_{IN}) is code dependent, it must be driven by a circuit with low output impedance (no more than $R_{IN} \div 2000$) to maintain output linearity. The REF input capacitance is also code dependent, with the maximum value occurring at code FF hex (typically 30pF for the MAX520/MAX521's REF0-REF3, and 120pF for the MAX521's REF4). The output voltage for any DAC can be represented by a digitally programmable voltage source as: $V_{OUT} = (N \times V_{REF}) / 256$, where N is the numerical value of the DAC's binary input code. Table 1 shows the unipolar code.

Table 1. Unipolar Code Table

DAC CONTENTS	ANALOG OUTPUT
11111111	$+ V_{REF} \left(\frac{255}{256} \right)$
10000001	$+ V_{REF} \left(\frac{129}{256} \right)$
10000000	$+ V_{REF} \left(\frac{128}{256} \right) = \frac{V_{REF}}{2}$
01111111	$+ V_{REF} \left(\frac{127}{256} \right)$
00000001	$+ V_{REF} \left(\frac{1}{256} \right)$
00000000	0V

MAX520 Unbuffered DAC Outputs

The unbuffered DAC outputs (OUT0-OUT3) connect directly to the internal 16k Ω R-2R network. The outputs swing from 0V to V_{DD} .

The MAX520 has no output buffer amplifiers, giving it very low supply current. The output-offset voltage is lower without the output buffer, and the output can also slew and settle faster if capacitive loading is minimized. Resistive loading should be very light for highest accuracy. Any output loading generates some gain error, increasing full-scale error. The R-2R ladder's output resistance is 16k Ω , so a 1 μ A output current creates a 16mV error. Linearity is not affected because the ladder output resistance does not change with DAC code. Ladder-resistance changes with temperature are also very small.

DACs are often used in trimming applications to replace hardware potentiometers. Figure 15a shows a typical application, which requires a buffered output so that a precise current can be injected into the summing node through precision resistor R_T . For this application, the MAX520A features a precise $\pm 1\%$ ($T_A = +25^\circ\text{C}$, $\pm 2.5\%$ over temperature) factory-trimmed output resistance. Because the MAX520A's output resistance is precisely trimmed, there is no need for an internal buffer or external precision resistor (Figure 15b). For applications where the output resistance value is not critical, use the MAX520B.

All DACs exhibit output glitches during code transitions. An output filter is sometimes used to reduce these glitches in sensitive applications. The MAX520 simplifies output filtering because its internal resistive ladder network serves as the "R" in an RC filter. Simply connect a small capacitor from the DAC output to ground. See the *Typical Operating Characteristics* for oscilloscope photos of the worst-case 1LSB step change both without and with 25pF of capacitance on the MAX520's output.

MAX521 Output Buffer Amplifiers

The MAX521 voltage outputs (OUT0-OUT7) are internally buffered precision unity-gain followers that slew up to 1V/ μ s. The outputs can swing from 0V to V_{DD} . With a 0V to 4V (or 4V to 0V) output transition, the amplifier outputs typically settle to 1/2LSB in 6 μ s when loaded with 10k Ω in parallel with 100pF. The buffer amplifiers are stable with any combination of resistive loads $\geq 2\text{k}\Omega$ and capacitive loads $\leq 300\text{pF}$.

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

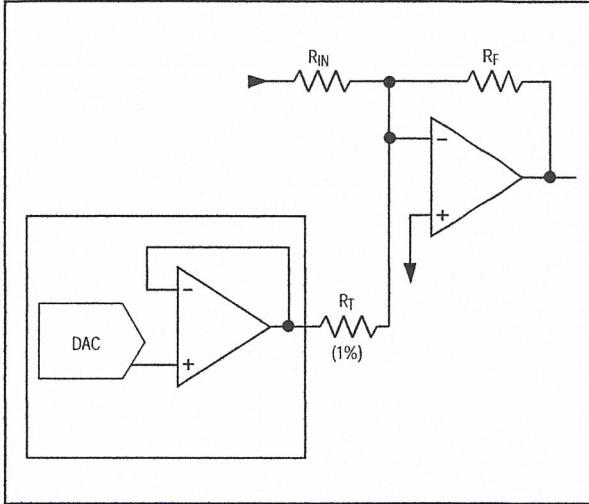


Figure 15a. Typical Trimming Circuit

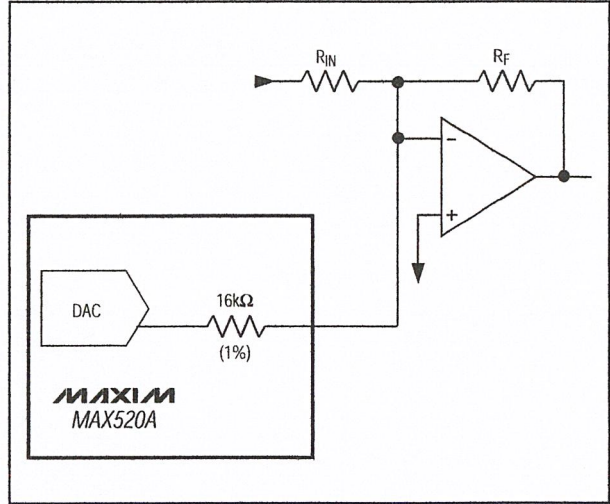


Figure 15b. MAX520A Trimming Circuit

Applications Information

Shutdown Mode

In shutdown mode, the MAX520/MAX521 reference inputs are disconnected from the R-2R ladder inputs, which saves power when the reference is not powered down. In addition, the MAX521's output buffers are disabled, greatly reducing the supply current. The MAX520's operating supply current does not change in shutdown mode. The *Command Byte and Output Byte* section describes how to enter and exit shutdown mode.

Power-Supply Bypassing and Ground Management

Bypass V_{DD} with a $0.1\mu\text{F}$ capacitor, located as close to V_{DD} and $DGND$ as possible. The analog ground (AGND) and digital ground (DGND) pins should be connected in a "star" configuration to the highest quality ground available, which should be located as close to the MAX521 as possible.

Careful PC board layout minimizes crosstalk among DAC outputs, reference inputs, and digital inputs. Figure 16 shows the suggested PC board layout to minimize crosstalk.

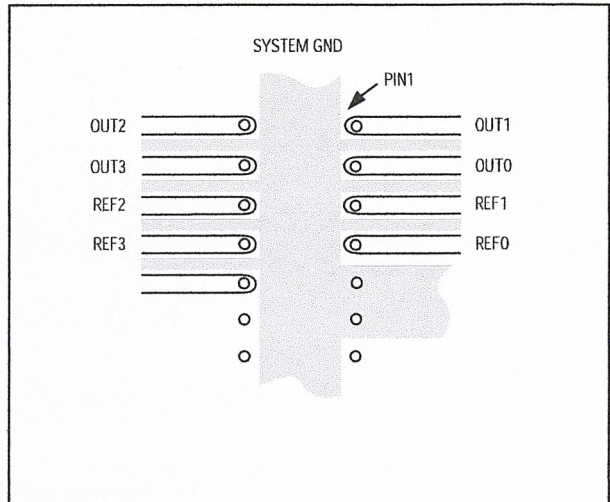
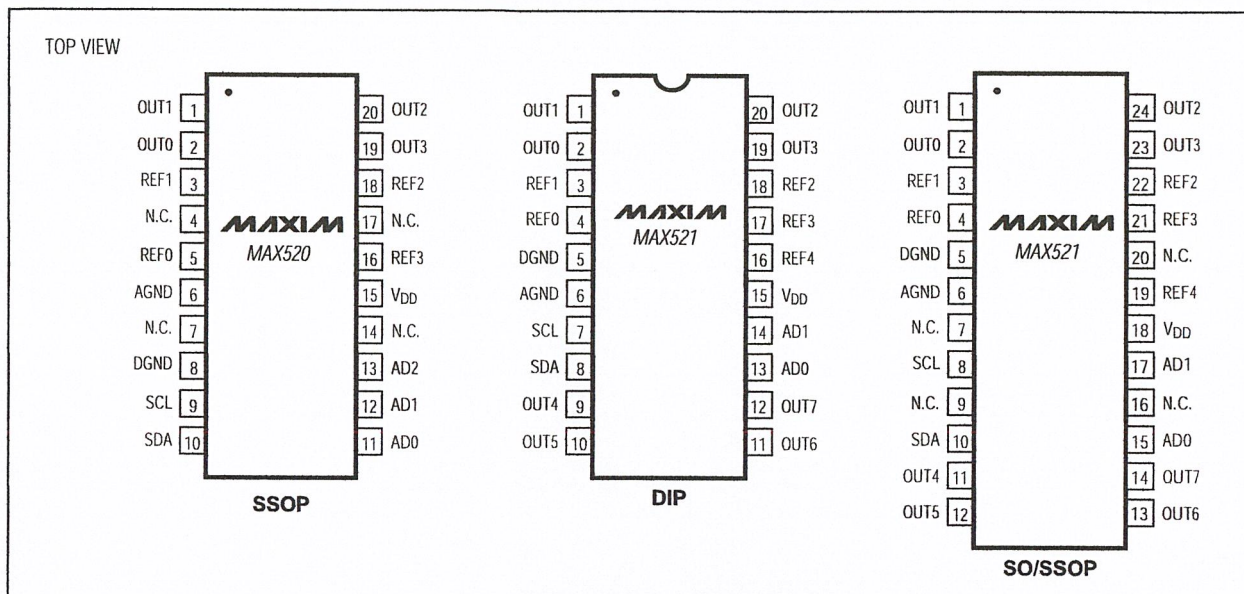


Figure 16. PC Board Layout for Minimizing Crosstalk (MAX521 bottom view, DIP package)

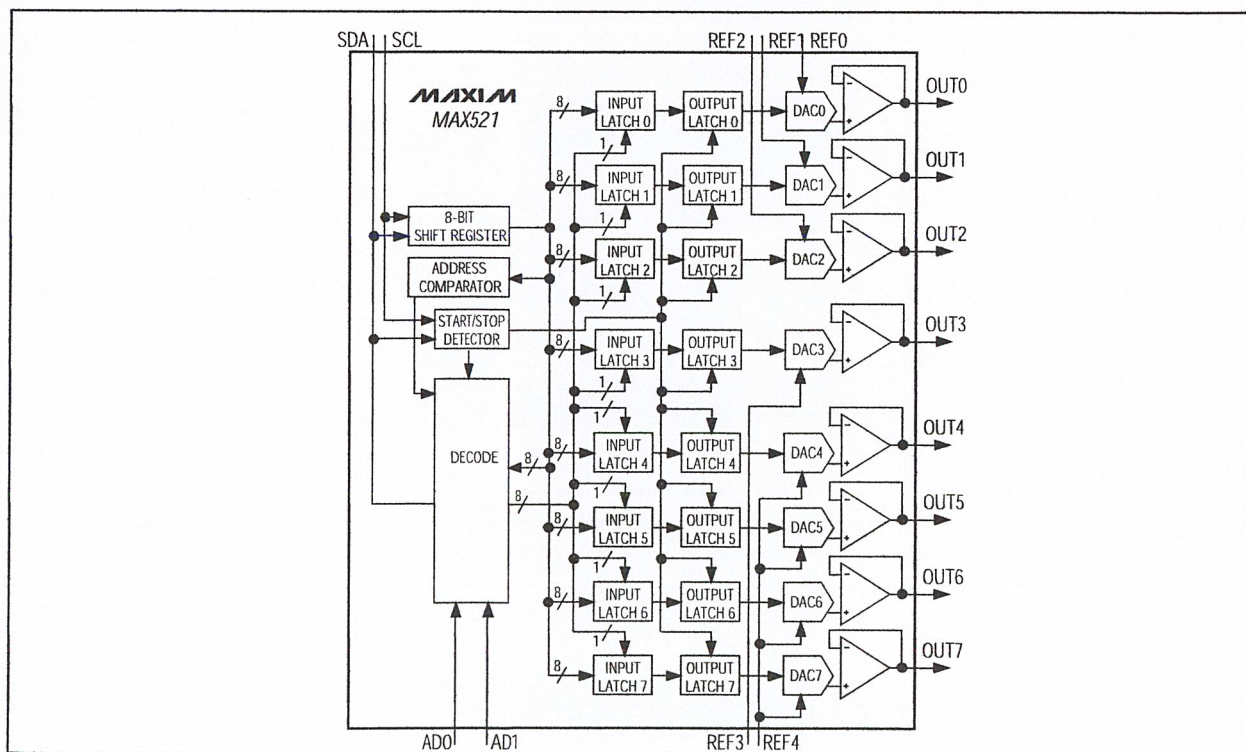
Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

Pin Configurations (continued)

MAX520/MAX521



Functional Diagrams (continued)



Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

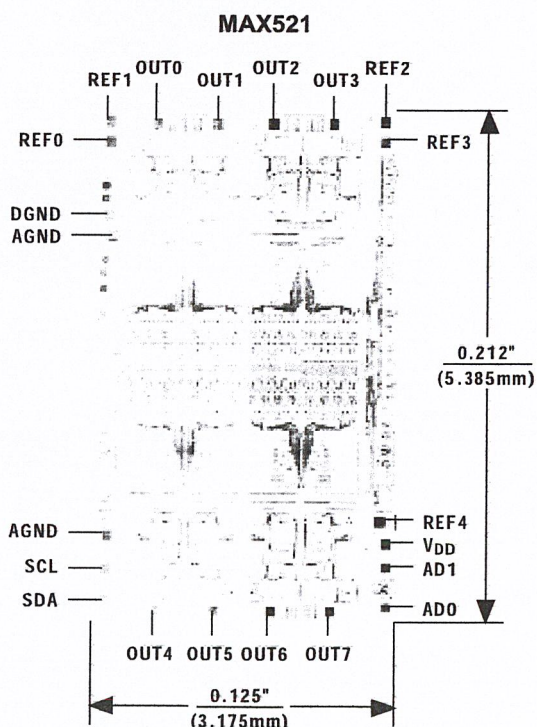
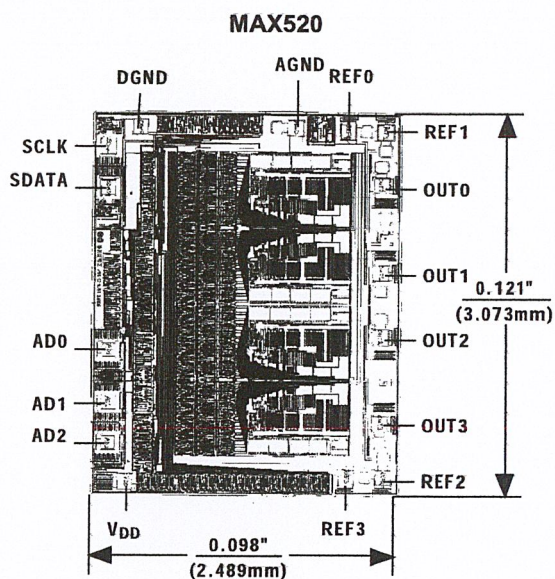
Ordering Information (continued)

PART†	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE	TUE (LSB)
MAX520ACAP	0°C to +70°C	20 SSOP	1
MAX520BCAP	0°C to +70°C	20 SSOP	1
MAX520AC/D	0°C to +70°C	Dice*	1
MAX520BC/D	0°C to +70°C	Dice*	1
MAX520AEPE	-40°C to +85°C	16 Plastic DIP	1
MAX520BEPE	-40°C to +85°C	16 Plastic DIP	1
MAX520AEWE	-40°C to +85°C	16 Wide SO	1
MAX520BEWE	-40°C to +85°C	16 Wide SO	1
MAX520AEAP	-40°C to +85°C	20 SSOP	1
MAX520BEAP	-40°C to +85°C	20 SSOP	1
MAX520AMJE	-55°C to +125°C	16 CERDIP	1
MAX520BMJE	-55°C to +125°C	16 CERDIP	1
MAX521ACPP	0°C to +70°C	20 Plastic DIP	1
MAX521BCPP	0°C to +70°C	20 Plastic DIP	2
MAX521ACWG	0°C to +70°C	24 Wide SO	1
MAX521BCWG	0°C to +70°C	24 Wide SO	2
MAX521ACAG	0°C to +70°C	24 SSOP	1
MAX521BCAG	0°C to +70°C	24 SSOP	2
MAX521BC/D	0°C to +70°C	Dice*	2
MAX521AEPP	-40°C to +85°C	20 Plastic DIP	1
MAX521BEPP	-40°C to +85°C	20 Plastic DIP	2
MAX521AEWG	-40°C to +85°C	24 Wide SO	1
MAX521BEWG	-40°C to +85°C	24 Wide SO	2
MAX521AEAG	-40°C to +85°C	24 SSOP	1
MAX521BEAG	-40°C to +85°C	24 SSOP	2
MAX521BMJP	-55°C to +125°C	20 CERDIP	2

* Dice are specified at $T_A = +25^\circ\text{C}$, DC parameters only.

† MAX520 "A" grade parts include a 1%-accurate, factory-trimmed output resistance.

Chip Topographies



TRANSISTOR COUNT: 4518
SUBSTRATE CONNECTED TO V_{DD}

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

Package Information

MAX520/MAX521

**Plastic DIP
PLASTIC
DUAL-IN-LINE
PACKAGE
(0.300 in.)**

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	—	0.200	—	5.08
A1	0.015	—	0.38	—
A2	0.125	0.175	3.18	4.45
A3	0.055	0.080	1.40	2.03
B	0.016	0.022	0.41	0.56
B1	0.045	0.065	1.14	1.65
C	0.008	0.012	0.20	0.30
D1	0.005	0.080	0.13	2.03
E	0.300	0.325	7.62	8.26
E1	0.240	0.310	6.10	7.87
e	0.100	—	2.54	—
eA	0.300	—	7.62	—
eB	—	0.400	—	10.16
L	0.115	0.150	2.92	3.81

PKG.	DIM	PINS	INCHES		MILLIMETERS	
			MIN	MAX	MIN	MAX
P	D	8	0.348	0.390	8.84	9.91
P	D	14	0.735	0.765	18.67	19.43
P	D	16	0.745	0.765	18.92	19.43
P	D	18	0.885	0.915	22.48	23.24
P	D	20	1.015	1.045	25.78	26.54
N	D	24	1.14	1.265	28.96	32.13

21-0043A

**Wide SO
SMALL-OUTLINE
PACKAGE
(0.300 in.)**

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.093	0.104	2.35	2.65
A1	0.004	0.012	0.10	0.30
B	0.014	0.019	0.35	0.49
C	0.009	0.013	0.23	0.32
E	0.291	0.299	7.40	7.60
e	0.050		1.27	
H	0.394	0.419	10.00	10.65
L	0.016	0.050	0.40	1.27

DIM	PINS	INCHES		MILLIMETERS	
		MIN	MAX	MIN	MAX
D	16	0.398	0.413	10.10	10.50
D	18	0.447	0.463	11.35	11.75
D	20	0.496	0.512	12.60	13.00
D	24	0.598	0.614	15.20	15.60
D	28	0.697	0.713	17.70	18.10

21-0042A

Quad/Octal, 2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

MAX520/MAX521

Package Information (continued)

**SSOP
SHRINK
SMALL-OUTLINE
PACKAGE**

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.068	0.078	1.73	1.99
A1	0.002	0.008	0.05	0.21
B	0.010	0.015	0.25	0.38
C	0.004	0.008	0.09	0.20
D	SEE VARIATIONS			
E	0.205	0.209	5.20	5.38
e	0.0256 BSC		0.65 BSC	
H	0.301	0.311	7.65	7.90
L	0.025	0.037	0.63	0.95
α	0°	8°	0°	8°

DIM	PINS	INCHES		MILLIMETERS	
		MIN	MAX	MIN	MAX
D	14	0.239	0.249	6.07	6.33
D	16	0.239	0.249	6.07	6.33
D	20	0.278	0.289	7.07	7.33
D	24	0.317	0.328	8.07	8.33
D	28	0.397	0.407	10.07	10.33

21-0056A

Maxim cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are implied. Maxim reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.

20 Maxim Integrated Products, 120 San Gabriel Drive, Sunnyvale, CA 94086 (408) 737-7600