

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดทดลองสำหรับศึกษาระบบควบคุมแบบอนาลอก
ANALOG SYSTEM SIMULATOR



โดย

นายเดชา ต่อวงศ์ไพชยนต์ รหัส 39014179
นางสาวประภารัตน์ เมืองขุนรอง รหัส 39014301



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. วันชัย ธีรรัฐ

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2542

เลขหม.....
เลขทะเบียน 36859
วัน, เดือน, ปี 29 ส.ค. 2542

รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หากต้องการนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำ กรุณาติดต่อขอขออนุญาตจากเจ้าพนักงานหอสมุด

ปริญญาโทปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดทดลองสำหรับศึกษาระบบควบคุมแบบอนาล็อก

ผู้จัดทำ

1. นายเดชา ต๋อวงศ์ไพชยนต์ รหัส 39014179

2. นางสาวประภารัตน์ เมืองขุนรอง รหัส 39014301

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(..... รศ.ดร. วันชัย ธีรรัฐจา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองสำหรับศึกษาระบบควบคุมแบบอนาลอก (ANALOG SYSTEM SIMULATOR)

นาย เดชา ต่่องศ์ไพชยนต์
นางสาว ประภารัตน์ เมืองขุนรอง
รศ. ดร.วันชัย รีวรูจา อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ในปฏิญานีพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอชุดทดลองสำหรับศึกษาระบบควบคุมแบบอนาลอก เพื่อเป็นอุปกรณ์ช่วยในการศึกษาการควบคุมระบบ โดยการใช้วงจรฟังก์ชันพื้นฐานต่าง ๆ มาสร้างระบบควบคุม เพื่อดูพฤติกรรมของระบบ โดยแสดงผลออกทางออสซิลโลสโคปและสามารถศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของระบบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้

ABSTRACT

This thesis is presented the analog system simulator that for study the analog control system which used to be an accessory in control subject. There are consist of functions that can build the system and observe the system behavior by display on oscilloscope then we can learn about system transition from adjust parameters.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

สารบัญ

สารบัญรูปภาพและตาราง

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

1.2 วัตถุประสงค์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 2 หลักการพื้นฐานสำหรับการศึกษาระบบควบคุมแบบคลาสสิก

2.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วคราว

2.2 สัญญาณอินพุตอ้างอิงสำหรับหาผลตอบสนองเวลาของระบบควบคุม

2.2.1 สัญญาณอินพุตแบบสเตป

2.2.2 สัญญาณอินพุตแบบแรม

2.2.3 สัญญาณอินพุตแบบพาราโบลิก

2.3 การวิเคราะห์ระบบด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน

2.3.1 การวิเคราะห์โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบคาสเคล

2.3.2 การวิเคราะห์โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบขนาน

2.4 ระบบอันดับหนึ่ง

2.4.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย

2.4.2 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นแรมหนึ่งหน่วย

2.4.3 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นอิมพัลส์หนึ่งหน่วย

2.5 ระบบอันดับสอง

2.5.1 กรณีอิมเตอร์เต็ม ($0 < \zeta < 1$)

2.5.2 กรณีคริติคอลลเต็ม ($\zeta = 1$)

2.5.3 กรณีโอเวอร์เต็ม ($\zeta > 1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6	นิยามของสเปกซิฟิเคชันต่าง ๆ ของผลตอบสนองชั่วคราว	13
2.6.1	ดีเลย์ไทม์	13
2.6.2	ไรซ์ไทม์	13
2.6.3	ฟิคไทม์	14
2.6.4	แม็กซิมัม โอเวอร์ชูท	14
2.6.5	เซตติงไทม์	14
2.7	สเปกซิฟิเคชันของผลตอบสนองชั่วคราวของระบบอันดับสอง	15
2.7.1	ไรซ์ไทม์	15
2.7.2	ฟิคไทม์	15
2.7.3	แม็กซิมัม โอเวอร์ชูท	15
2.7.4	เซตติงไทม์	16
2.7.5	ดีเลย์ไทม์	17
2.8	วงจรออปแอมป์	18
2.8.1	วงจรออปแอมความถี่สูง	18
2.8.2	ผลตอบสนองทางความถี่ของลูปปิด	18
บทที่ 3	วงจรใช้งานและการนำไปใช้งาน	19
3.1	วงจรกาน	20
3.2	วงจรมินิเกรเตอร์	20
3.3	วงจรมัลติไฟเออร์เรททิไฟเออร์	21
3.4	วงจรรระบบอันดับหนึ่งแบบลีด	22
3.5	วงจรรระบบอันดับหนึ่งแบบลีด	22
3.6	วงจรรระบบอันดับสอง	23
3.7	วงจรมว	25
3.8	วงจรมัลติไฟเออร์	25
บทที่ 4	ชุดทดลอง คู่มือการใช้งานและผลการทดลอง	26
4.1	ลักษณะของชุดทดลองระบบควบคุมแบบอนาล็อก	26
4.2	การใช้งาน	27
4.2.1	ขั้นตอนการใช้ชุดทดลอง	27
4.2.2	การสร้างแบบจำลองของระบบโดยการเชื่อมโยงด้วยโปรแกรมเมทแอส	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3	ผลตอบสนองของฟังก์ชันพื้นฐานต่าง ๆ	29
4.3.1	ผลตอบสนองของระบบแกน	29
4.3.2	ผลตอบสนองของระบบอินทิเกรเตอร์	31
4.3.3	ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งแบบเล็ก	33
4.3.4	ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งแบบลีด	35
4.3.5	ผลตอบสนองของระบบอันดับสอง	36
4.3.6	ผลตอบสนองของระบบอินเวอร์ส	39
บทที่ 5	สรุปและวิจารณ์	40
5.1	ปัญหาที่พบ	40
5.2	แนวทางแก้ไข	40
5.3	วิจารณ์	40
ภาคผนวก		
บรรณานุกรม		
กิตติกรรมประกาศ		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพและตาราง

	หน้า
รูปที่ 2.1 อินพุตอ้างอิงแบบต่างๆ	4
รูปที่ 2.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีคาสเคส	5
รูปที่ 2.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีขนาน	6
รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบอันดับหนึ่ง	7
รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย	8
รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นแรมป์หนึ่งหน่วย	9
รูปที่ 2.7 แสดงถึงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นอิมพัลส์หนึ่งหน่วย	10
รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมระบบอันดับสอง	10
รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย ของระบบอันดับสอง สำหรับค่าต่างๆของ ζ	13
รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองของระบบที่เป็น สเตปหนึ่งหน่วย แสดงถึง t_d, t_r, t_p, M_p และ t_s	14
รูปที่ 2.11 นิยามของมุม β	15
รูปที่ 2.12 M_p ต่อ ζ	16
รูปที่ 2.13 เส้นโค้งกรอบนอกของผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น สเตปหนึ่งหน่วย	16
รูปที่ 2.14 Delay time ต่อ ζ ของระบบอันดับสอง	17
รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐาน	19
รูปที่ 3.2 วงจรเกน	20
รูปที่ 3.3 วงจรอินทิเกรเตอร์	20
รูปที่ 3.4 วงจรดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์	21
รูปที่ 3.5 วงจรระบบอันดับหนึ่งแบบลีด	22
รูปที่ 3.6 วงจรระบบอันดับหนึ่งแบบแล็ก	22
รูปที่ 3.7 เส้นโค้งผลตอบสนองแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล	23
รูปที่ 3.8 วงจรระบบอันดับสอง	23
รูปที่ 3.9 Unit-Step Response Curves Of The System	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10	วงจรวก	25
รูปที่ 3.11	วงจรมัลติเพล็กซ์	25
รูปที่ 4.1	แสดงด้านหน้าของชุดทดลองระบบควบคุมแบบอนาลอก	26
รูปที่ 4.2	แสดงด้านข้างของชุดทดลองระบบควบคุมแบบอนาลอก	26
รูปที่ 4.3	แสดงการต่อวงจรสำหรับการจำลองด้วยวิธีเม็ทแล็บ	29
รูปที่ 4.4	แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของระบบเกน	29
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบเกนขนาด 10 เท่า	30
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบเกนขนาด 1 เท่า	30
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบเกนโดยใช้เม็ทแล็บ	31
รูปที่ 4.8	แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของระบบอินทิเกรเตอร์	31
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอินทิเกรเตอร์	32
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบอินทิเกรเตอร์โดยใช้เม็ทแล็บ	32
รูปที่ 4.11	แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของระบบอันดับหนึ่ง-เล็ก	33
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-เล็ก (1)	33
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-เล็ก (2)	34
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-เล็กโดยใช้เม็ทแล็บ	34
รูปที่ 4.15	แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของระบบอันดับหนึ่ง-ลีด	35
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-ลีด	35
รูปที่ 4.17	แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของระบบอันดับสอง	36
รูปที่ 4.18	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (คริติคอลเต็ม)	36
รูปที่ 4.19	กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (คริติคอลเต็ม)	37
รูปที่ 4.20	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (อินเดอร์เต็ม)	37
รูปที่ 4.21	กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (อินเดอร์เต็ม)	38
รูปที่ 4.22	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (โอเวอร์เต็ม)	38
รูปที่ 4.23	กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (โอเวอร์เต็ม)	39
รูปที่ 4.24	กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอินเวอร์ส	39
ตารางที่ 4.1	ตารางรายละเอียดการปรับค่าของฟังก์ชันพื้นฐานต่าง ๆ	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เนื่องจากการศึกษาระบบควบคุมในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะศึกษาเฉพาะในส่วนของทฤษฎี เช่นการหาเสถียรภาพ การศึกษาถึงพฤติกรรมของระบบควบคุม โดยไม่สามารถเห็นผลในทางปฏิบัติ ได้จริงๆ ดังนั้นจึงได้จัดทำชุดทดลองสำหรับศึกษาระบบควบคุมแบบอนาลอก (Analog) นี้ขึ้นมา เพื่อให้ให้นักศึกษาและผู้ที่สนใจศึกษาระบบควบคุมแบบคลาสสิกอล ได้เห็นพฤติกรรมของระบบได้ โดยแสดงผลตอบสนองในรูปกราฟผ่านทางออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และมีการเปรียบเทียบ ผลตอบสนองด้วยการจำลอง (Simulation) ระบบต่าง ๆ ด้วยโปรแกรมเมทแล็บ (Matlab) จะทำให้ ผู้ศึกษาได้เห็นภาพของระบบต่าง ๆ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในการทำชุดทดลองสำหรับศึกษาระบบควบคุมแบบอนาลอก คือเพื่อใช้ในการ ศึกษาพฤติกรรมของระบบควบคุม โดยแสดงผลออกทางออสซิลโลสโคป ทำให้ผู้ศึกษาได้เห็น การเปลี่ยนแปลงของระบบเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ซึ่งในการใช้งานจริงคือ ทำการปรับค่า ฟังก์ชันต่างๆเพื่อให้ได้ค่าตามฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของระบบควบคุมที่ต้องการ ศึกษา จากนั้นทำการป้อนอินพุตเข้าไป และนำวงจรต่อกับออสซิลโลสโคป เพื่อดูผลของเอาต์พุตได้

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาและทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมของระบบพื้นฐานต่าง ๆ ว่ามีผลตอบสนองเช่นใด เมื่อป้อนอินพุตต่างกันไปที่สภาวะ ต่าง ๆ

สร้างระบบต่าง ๆ ขึ้นมาจากระบบพื้นฐานที่ศึกษา โดยการสร้างชุดทดลองสำหรับจำลอง พฤติกรรมของระบบและนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมเมทแล็บ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการ

-จากการศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของระบบพื้นฐานทำให้เรามีความเข้าใจในเนื้อหาทฤษฎี มากยิ่งขึ้นและสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างระบบควบคุมพีไอดี (PID) ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ได้รับความรู้และความเข้าใจถึงปัญหาผลกระทบและตัวรบกวน(Noise)ที่มีผลต่อวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรล (Electronic Control) และสามารถที่จะแก้ไขปัญหาและขจัดตัวรบกวนให้หมดไปได้

- มีความชำนาญในการใช้อุปกรณ์มากขึ้น

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานของโครงการ

ในช่วงแรกของการทำโครงการชิ้นนี้ จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบต่าง ๆ ทั้งหมดที่ต้องนำไปใช้ หลังจากการศึกษาก็จะเป็นการนำระบบพื้นฐานเหล่านั้นมาทดลองสร้างวงจรเพื่อเปรียบเทียบผลในทางปฏิบัติกับทางทฤษฎีและตรวจสอบปัญหาและตัวรบกวนที่ส่งผลกระทบต่อระบบเพื่อจะทำการแก้ไขปรับปรุงให้ได้ระบบที่มีเสถียรภาพมากที่สุด หลังจากแก้ไขปรับปรุงทุกอย่างจนได้สถานะที่ดีที่สุดแล้ว เราก็จะนำองค์ประกอบเหล่านั้นมาสร้างชุดทดลองพร้อมด้วยคู่มือการใช้งานเพื่อที่จะเป็นต้นแบบสำหรับชุดทดลองในอนาคตต่อไป



บทที่ 2

หลักการพื้นฐานของระบบควบคุมแบบคลาสสิกคอลล

การศึกษาะบบควบคุมแบบคลาสสิกคอลล พิจารณาอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการทางคณิตศาสตร์ เรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอน เรานำฟังก์ชันถ่ายโอนมาสร้างวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อผลของ เอาต์พุตเมื่อป้อนอินพุตได้โดยใช้ออปแอมป์ ต่อวงจรเพื่อให้ได้ฟังก์ชันพื้นฐานต่างๆมาประกอบรวมกันเป็นระบบที่ต้องการ

2.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วคราว

ในระบบควบคุมส่วนใหญ่แล้ว เวลา (Time) จะเป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) การศึกษาและหาค่าของผลตอบสนองเวลา (Time Response) ของระบบจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในการวิเคราะห์ระบบแต่ละระบบนั้น เราจะป้อนสัญญาณอินพุตอ้างอิงให้กับระบบ จากนั้นหาสมรรถนะ (Performance) โดยการพิจารณาผลตอบสนองของระบบในโดเมนเวลา (Time Domain) เช่น ถ้าระบบควบคุมระบบหนึ่งต้องการให้อาต์พุตติดตามอินพุตอย่างใกล้ชิดตลอดเวลาแล้ว เราต้องนำเอาอินพุตและเอาต์พุตที่เป็นฟังก์ชันของเวลามาเปรียบเทียบกัน

โดยทั่วไป เราแบ่งผลตอบสนองเวลาของระบบควบคุมออกเป็นสองส่วนคือ ผลตอบสนองชั่วคราว (Transient Response) และผลตอบสนองภาวะคงที่ (Steady-State Response)

นิยามของผลตอบสนองภาวะคงที่นั้นยังไม่เป็นมาตรฐานนัก ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ผลตอบสนองภาวะคงที่จะหมายถึงค่าอินฟินิตี้ ดังนั้นรูปคลื่นไซน์จึงถือเป็นผลตอบสนองภาวะคงที่ได้ สำหรับผลตอบสนองชั่วคราวนั้นจะมีค่าเข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลามีค่ามาก

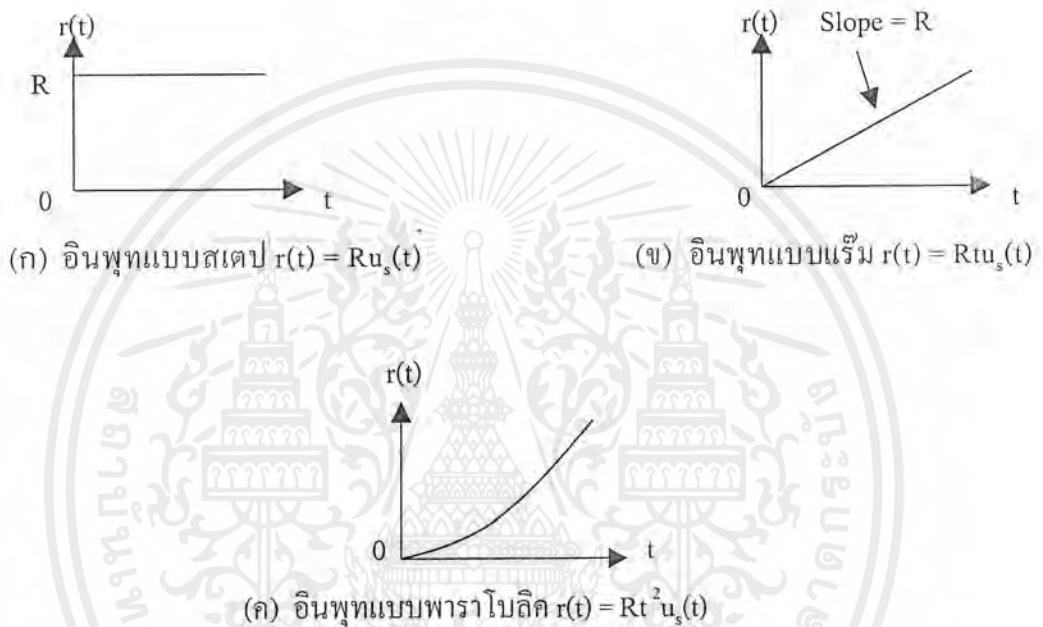
ระบบควบคุมส่วนใหญ่แล้วจะมีความเฉื่อยและความฝืดอยู่ในระบบเสมอ ทำให้อาต์พุตไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของอินพุตได้อย่างทันทีทันใด จึงเกิดช่วงของผลตอบสนองชั่วคราวขึ้นและเมื่อผลตอบสนองชั่วคราวหมดสิ้นลง ผลตอบสนองในเวลาถัดไปก็เป็นผลตอบสนองภาวะคงที่นั่นเอง ผลตอบสนองภาวะคงที่นี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอินพุตแล้วจะทำให้เราทราบถึงความเที่ยงตรง (Accuracy) ของระบบ

2.2 สัญญาณอินพุตอ้างอิงสำหรับหาผลตอบสนองเวลาของระบบควบคุม

ในทางปฏิบัติแล้ว อินพุตที่ป้อนให้ระบบควบคุมอาจจะแปรค่าตามยถากรรม (Random) หรือไม่สามารถคาดเดาล่วงหน้าได้ ทำให้เราไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้โดยใช้คณิตศาสตร์ และทำให้การออกแบบระบบควบคุมนั้นจำเป็นต้องสมมติรูปแบบในโดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Frequency Domain) อินพุตอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ที่เปลี่ยนความถี่ได้ สำหรับในโดเมนเวลา (Time Domain) อินพุตอ้างอิงได้แก่ สัญญาณอินพุตแบบอิมพัลส์, สัญญาณอินพุตแบบสเตป (Step Function), สัญญาณอินพุตแบบแรม (Ramp) และสัญญาณอินพุตแบบพาราโบลา (Parabolic) โดยการใช้สัญญาณอินพุตอ้างอิงเหล่านี้ การวิเคราะห์หาสมรรถนะของระบบควบคุมด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์หรือวิธีทดลองก็สามารถทำได้โดยง่ายเพราะสัญญาณอินพุตเหล่านี้เป็นฟังก์ชันของเวลา



รูปที่ 2.1 อินพุตอ้างอิงแบบต่างๆ

2.2.1 สัญญาณอินพุตแบบสเตป

สัญญาณอินพุตแบบสเตป เป็นอินพุตอ้างอิงที่ใช้แทนการเปลี่ยนแปลงเพียงชั่วขณะของอินพุตใดๆ และแสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$r(t) = \begin{cases} R & ; t \geq 0 \\ 0 & ; t < 0 \end{cases}$$

โดยที่ R เป็นค่าคงที่ หรือ $r(t) = Ru(t)$

โดยที่ $u(t)$ คือ ฟังก์ชันสเตปหนึ่งหน่วย (Unit Step Function)

2.2.2 สัญญาณอินพุตแบบแรม

สัญญาณอินพุตแบบแรม เป็นอินพุตอ้างอิงที่ใช้แทนอินพุตใดๆซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงด้วยค่าคงที่ตามเวลา สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับอินพุตแบบแรม คือ

$$r(t) = \begin{cases} Rt & ; t \geq 0 \\ 0 & ; t < 0 \end{cases}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$r(t) = Rtu(t)$$

2.2.3 สัญญาณอินพุตแบบพาราโบลา

รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณอินพุตแบบพาราโบลา เป็นดังนี้

$$r(t) = \begin{cases} Rt^2 & ; t \geq 0 \\ 0 & ; t < 0 \end{cases}$$

หรือ

$$r(t) = Rt^2u(t)$$

2.3 การวิเคราะห์ระบบด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน

จากระบบที่ศึกษาสามารถแทนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน ได้ดังสมการ

$$G(s) = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad \text{-----}(2.1)$$

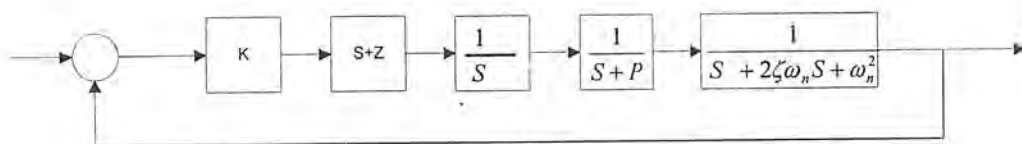
จากรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนเราสามารถพิจารณาถึงส่วนประกอบต่างๆ ได้อันได้แก่ เกน , ซีโร , โพลอันดับหนึ่ง , โพลอันดับสอง ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้ทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนในอีกรูปแบบหนึ่งดังสมการ

$$G(s) = \frac{K(s+Z)}{s(s+P)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad \text{-----}(2.2)$$

เมื่อเรามีฟังก์ชันถ่ายโอนเราสามารถวิเคราะห์โดยการจัดรูปแบบของสมการได้หลายรูปแบบเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ทั้งการจัดรูปแบบคาสเคด (Cascade) และแบบขนาน (Parallel)

2.3.1 การวิเคราะห์โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบคาสเคด

จากสมการที่(2.2) จะสร้างบล็อกไดอะแกรมในรูปแบบคาสเคดได้ดังรูป โดยในแต่ละบล็อกเกิดจากผลคูณของแต่ละพจน์ของฟังก์ชันถ่ายโอน



รูปที่ 2.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีคาสเคด

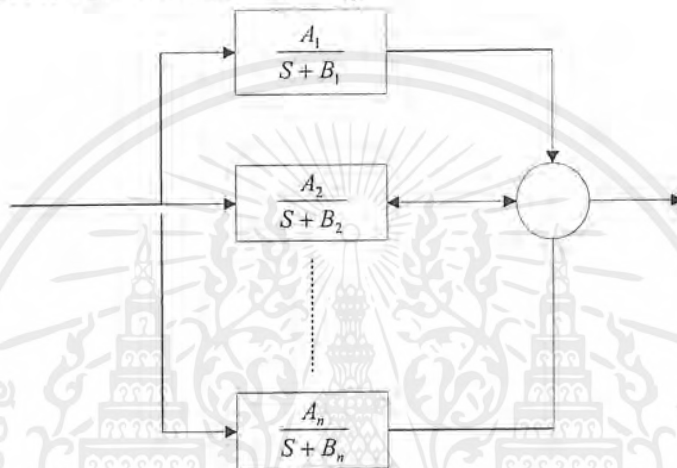
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การวิเคราะห์โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบขนาน

จากสมการที่(2.2) จะสร้างบล็อกไดอะแกรมได้โดยการทำการพาร์เชียลแฟรคชันฟังก์ชันพื้นฐานให้ได้ดังสมการ

$$G(s) = \frac{A_1}{s+B_1} + \frac{A_2}{s+B_2} + \dots + \frac{A_n}{s+B_n} \quad \text{-----}(2.3)$$

จะสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูป



รูปที่ 2.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีขนาน

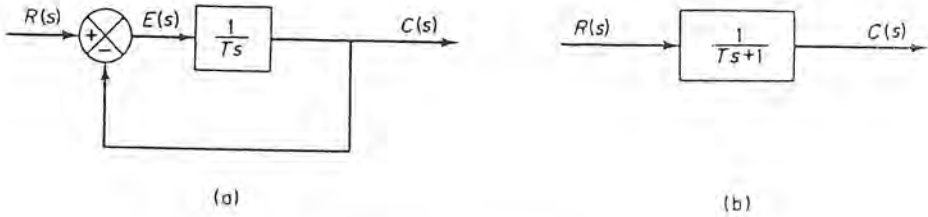
2.4 ระบบอันดับหนึ่ง

พิจารณาระบบอันดับหนึ่ง (First-Order System) ในรูปที่ 2.4(a) ซึ่งระบบนี้อาจจะเป็นวงจร R-C หรือระบบใดๆก็ได้ และรูป 2.4(b) เป็นบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ของรูป 2.4(a) ที่ทำให้ง่ายขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบอันดับหนึ่งในกรณีนี้คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{(Ts+1)} \quad \text{-----}(2.4)$$

ในที่นี้เราจะวิเคราะห์ถึงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย เริ่มหนึ่งหน่วย และ อิมพัลส์ โดยที่กำหนดให้ภาวะแรกเริ่มเป็นศูนย์ ระบบทางกายภาพ (Physical System) ต่างๆที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเหมือนกันจะมีผลตอบสนองต่ออินพุตแบบเดียวกันเหมือนกัน และผลตอบสนองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถจะอธิบายถึงคุณสมบัติทางกายภาพของระบบนั้นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบอันดับหนึ่ง

2.4.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย

เนื่องจากการแปลงลาปลาซของสเตปหนึ่งหน่วยมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{s}$ ดังนั้นแทนค่า $R(s)$ ในสมการ(2.4) ด้วย $\frac{1}{s}$ จะได้

การ(2.4) ด้วย $\frac{1}{s}$ จะได้

$$C(s) = \frac{1}{(Ts+1)} \times \frac{1}{s} \quad \text{-----}(2.5)$$

โดยใช้พาร์เชียล แฟรคชัน (Partial Fraction)

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{(Ts+1)} \quad \text{-----}(2.6)$$

ทำการแปลงกลับลาปลาซ เราได้ว่า

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}} ; t \geq 0 \quad \text{-----}(2.7)$$

บอกให้เราทราบว่าที่ภาวะแรกเริ่ม $t=0$ นั้น เอาท์พุท $c(t)$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และในตอนสุดท้าย $c(t)$ จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง สำหรับที่ $t=T$ นั้น $c(t)$ จะมีค่า 0.632 หรือผลตอบสนอง $c(t)$ มีค่าเข้าสู่ 63.2% ของค่าสุดท้าย ซึ่งจะเห็นได้โดยง่ายจากการแทนค่า $t=T$ ในสมการ

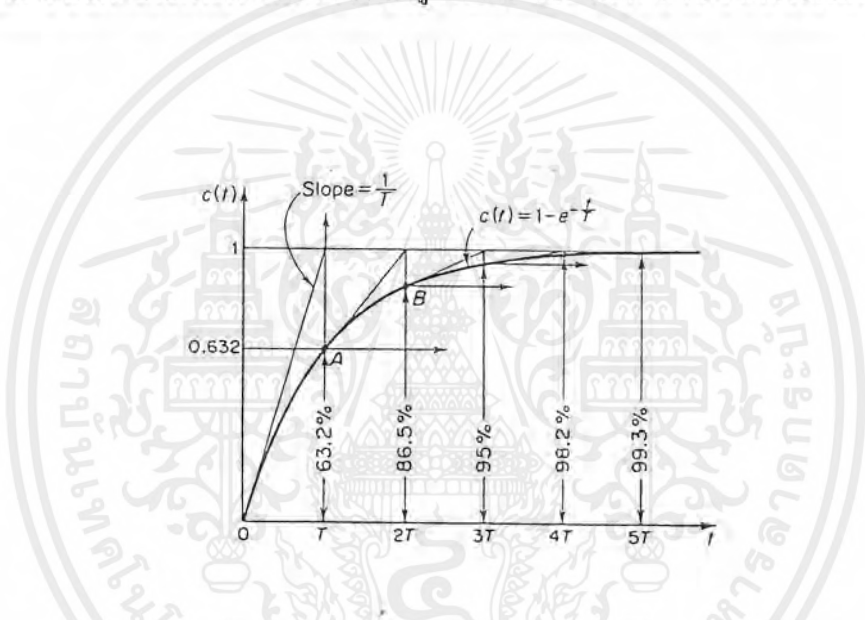
$$c(t) = 1 - e^{-1} = 0.632 \quad \text{-----}(2.8)$$

ดังที่ทราบกันอยู่แล้วว่า T เป็นค่าคงที่เวลา (Time Constant) ของระบบ ถ้าค่าคงที่เวลามีค่าน้อย ความเร็ว (speed) ของผลตอบสนองของระบบจะเร็ว คุณลักษณะที่สำคัญอันหนึ่งของเส้นกราฟ (Curve) ของผลตอบสนองที่เป็นเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) ก็คือความชัน (Slope) ของเส้นสัมผัส (Tangent Line) ที่ $t=0$ ซึ่งหาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ (2.7) และให้ $t=0$ นั่นคือ

$$\left. \frac{dc(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{1}{T} \times e^{-\frac{t}{T}} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad \text{-----}(2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาที่พหุของระบบจะเข้าสู่ค่าสุดท้ายที่ $t = T$ ถ้าหากว่าผลตอบสนองรักษาความเร็วที่ภาวะแรกเริ่มไว้ได้ และจากสมการ (2.9) เราจะเห็นได้ว่าความชันของเส้นกราฟของผลตอบสนอง $c(t)$ จะลดลงเรื่อยๆ จาก $1/T$ ที่ $t = 0$ ไปเป็นศูนย์ที่ $t = \infty$ รูปที่ 2.3 แสดงถึงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นแรมหนึ่งหน่วย ในช่วงเวลาเท่ากับหนึ่งค่าคงที่เวลาผลตอบสนองเริ่มมีค่าจากศูนย์ไปถึง 63.2% ของค่าสุดท้าย และเมื่อ $t = 3T, 4T, 5T$ นั้นผลตอบสนองมีค่า 95%, 98.2% และ 99.3% ของค่าสุดท้ายตามลำดับ ดังนั้นสำหรับ $t \geq 4T$ นั้น ผลตอบสนองจะมีค่าอยู่ในช่วง 2% ของค่าสุดท้าย ซึ่งโดยทั่วไปเราถือว่าเมื่อผลตอบสนองมีค่าเข้าสู่ช่วง 2% ของค่าสุดท้ายนั้นแสดงว่าได้เข้าสู่ภาวะคงที่แล้ว นั่นก็คือระบบอันดับหนึ่งจะเข้าสู่ภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 4 ค่าคงที่เวลา



รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย

ค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่ของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วยสามารถหาได้ดังนี้

$$e(t) = r(t) - c(t) = e^{-\frac{t}{T}} \quad \text{-----(2.10)}$$

โดยที่ $e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ

ค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่ $e_{ss}(t)$ หาได้จาก

$$e_{ss}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \quad \text{-----(2.11)}$$

นั่นก็คือค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่ของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย จะมีค่าเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุทที่เป็นแรมหนึ่งหน่วย

เอาที่พุทของระบบอันดับหนึ่งในสมการ(2.4) ต่ออินพุทที่เป็นแรมหนึ่งหน่วยในรูปของการแปลงลาปลาซคือ

$$C(s) = \frac{1}{(Ts+1)} \times \frac{1}{s^2} \quad \text{-----}(2.12)$$

ทั้งนี้เพราะการแปลงลาปลาซของแรมหนึ่งหน่วยมีค่าเท่ากับ $1/s^2$

สมการ(2.12) เขียนใหม่ได้ว่า

$$C(s) = \frac{1}{s^2} - \frac{T}{s} + \frac{T^2}{(Ts+1)} \quad \text{-----}(2.13)$$

ผลตอบสนองในโดเมนเวลาคือ

$$c(t) = t - T + Te^{-t/T} \quad ; t \geq 0 \quad \text{-----}(2.14)$$

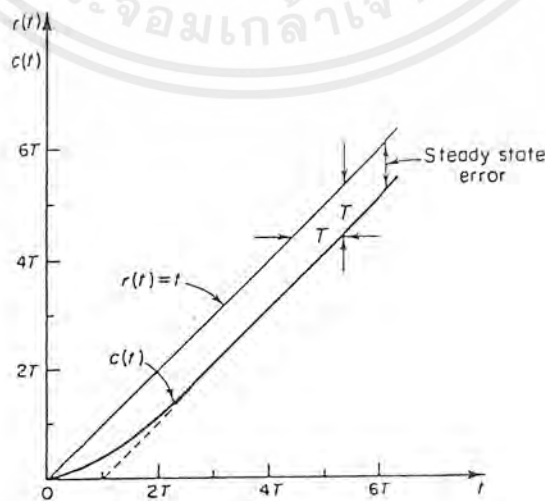
ค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ คือ

$$e(t) = r(t) - c(t) = T(1 - e^{-t/T}) \quad \text{-----}(2.15)$$

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

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = T \quad \text{-----}(2.16)$$

รูปที่ 2.6 แสดงถึงอินพุทที่เป็นแรมหนึ่งหน่วยและเอาที่พุทของระบบนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่จะมีค่าเท่ากับ T ซึ่งหมายถึงว่าถ้าระบบมีค่าของค่าคงที่เวลาน้อย ค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่ก็จะค่าน้อย



รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุทที่เป็นแรมหนึ่งหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้หาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

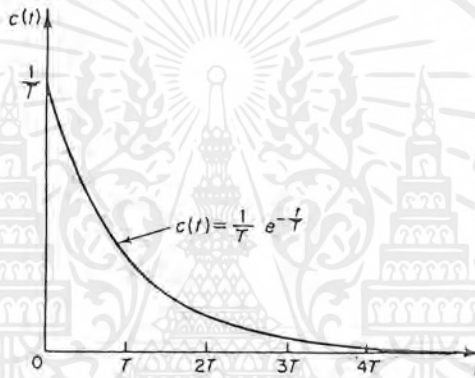
2.4.3 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นอิมพัลส์หนึ่งหน่วย

เมื่ออินพุตเป็นอิมพัลส์หนึ่งหน่วย, $R(s) = 1$ ดังนั้นเอาท์พุทของระบบอันดับหนึ่งในสมการ (2.4) คือ

$$C(s) = \frac{1}{(Ts+1)} \quad \text{-----}(2.17)$$

หรือ

$$c(t) = \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}} \quad \text{-----}(2.18)$$



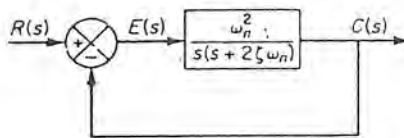
รูปที่ 2.7 แสดงถึงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตที่เป็นอิมพัลส์หนึ่งหน่วย

2.5 ระบบอันดับสอง

ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย

บล็อกไดอะแกรมสามารถแสดงดังรูปที่ 2.8 และฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลูปปิด (Closed-Loop Transfer Function) คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad \text{-----}(2.19)$$



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมระบบอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบอันดับสองสามารถจะอธิบายในเทอมของพารามิเตอร์สองตัวคือ ζ และ ω_n ได้ ถ้า $0 < \zeta < 1$, โพลวงปิด (Closed-Loop Poles) จะเป็นคอมเพล็กซ์คอนจูเกต (Complex Conjugate) และอยู่ทางครึ่งซ้ายในระนาบ S ระบบจะเป็นแบบอันเดอร์แดม (Underdamped) ซึ่งผลตอบสนองชั่วคราวของระบบจะเกิดการ ออสซิลเลท ถ้า $\zeta = 1$, เราจะเรียกระบบนั้นว่าเป็นแบบคริติคอลลีแดม (Critically Damped) ส่วนระบบโอเวอร์แดม (Overdamped) นั้นจะมี $\zeta > 1$ ผลตอบสนองชั่วคราวของระบบที่มีการหน่วงแบบคริติคอลลีแดมและโอเวอร์แดมนั้นจะไม่มี การออสซิลเลท (Oscillate) เกิดขึ้น ถ้า $\zeta = 0$ เอาท์พุทของระบบจะออสซิลเลทต่อเนื่องกันไปและสำหรับ $\zeta < 0$ แล้วจะเป็นกรณีของเนกาทีฟแดม (Negative Damped) ซึ่งระบบไม่เสถียร

ต่อไปจะแสดงถึงการคำนวณหาผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุทที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย โดยจะพิจารณาเป็นสามกรณีคือ กรณีของอันเดอร์แดม , คริติคอลลีแดม และโอเวอร์แดมตามลำดับ

2.5.1 กรณีอันเดอร์แดม ($0 < \zeta < 1$)

ในกรณีนี้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เขียนได้ในรูป

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + j\omega_d)(s + \zeta\omega_n - j\omega_d)} \quad \text{-----}(2.20)$$

โดยที่ $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ และเรียกว่า ความถี่ธรรมชาติของการแดม (Damped Natural Frequency)

สำหรับอินพุทที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad \text{-----}(2.21)$$

ทำการแปลงลาปลาซ จะได้

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}) \quad ; t \geq 0 \quad \text{-----}(2.22)$$

จะเห็นว่าความถี่ของการออสซิลเลทชั่วคราวของระบบก็คือ ω_d และแปรค่าตามอัตราการหน่วง ζ ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบนี้คือ

$$e(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos \omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \omega_d t \right) \quad ; t \geq 0 \quad \text{-----}(15)$$

แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนเป็นรูปการออสซิลเลท ที่มีการหน่วง ที่ภาวะคงที่ $t = \infty$ นั้นค่าความเคลื่อนจะมีค่าเป็นศูนย์ ถ้า ζ มีค่าเท่าศูนย์ ผลตอบสนองของระบบจะเป็นแบบอันเดอร์แดม คือเกิดการออสซิลเลท ต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ไม่สิ้นสุดเอาท์พุท $c(t)$ ในกรณีที่ $\zeta = 0$ หาได้จาก

$$c(t) = 1 - \cos \omega_n t \quad ; t \geq 0 \quad \text{-----}(2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นก็คือถ้า ζ มีค่าเท่ากับศูนย์ ω_n จะเป็นความถี่ของการออสซิลเลทของระบบ อย่างไรก็ตามถ้าอัตราส่วนหน่วงของระบบไม่เท่ากับศูนย์ ค่าของ ω_n จะไม่สามารถสังเกตได้จากการทดลอง จะสังเกตได้แต่ ω_d ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า ω_n เสมอ

2.5.2 กรณี คริติกอลแด็ม ($\zeta = 1$)

ในกรณีนี้ โพลวงปิดจะมีค่าเท่ากัน สำหรับอินพุตที่เป็น สเตปหนึ่งหน่วย เอาท์พุทคือ

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

และ

$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad ; t \geq 0 \quad \text{-----}(2.24)$$

จะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น สเตปหนึ่งหน่วย ในกรณีที่ $\zeta = 1$ นั้นไม่มีการ ออสซิลเลท

2.5.3 กรณี โอเวอร์แด็ม ($\zeta > 1$)

ในกรณีนี้ โพลวงปิดทั้งสองตัวจะเป็นค่าจริงที่เป็นลบและไม่เท่ากัน เอาท์พุท $C(s)$ เมื่ออินพุตเป็น สเตปหนึ่งหน่วย ในกรณีนี้คือ

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})(s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})} \quad \text{-----}(2.25)$$

นั่นคือ

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \times \left(\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right) \quad ; t \geq 0 \quad \text{-----}(2.26)$$

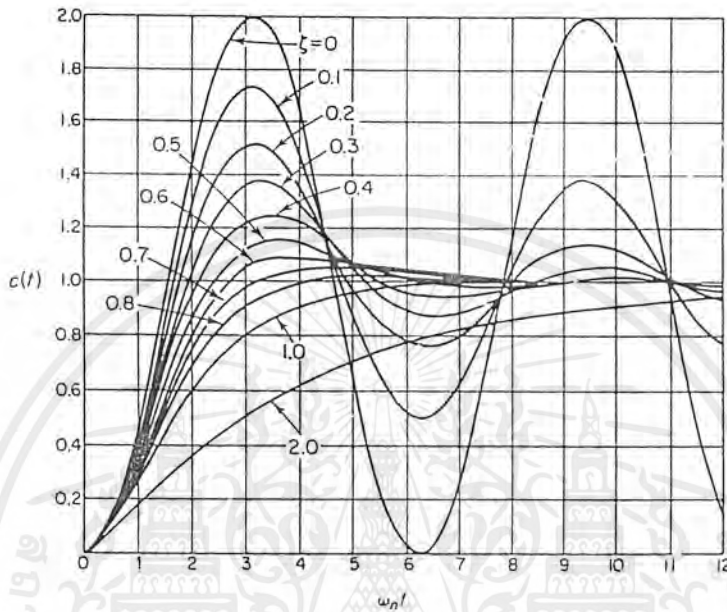
โดยที่ $s_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$ และ $s_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$

ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น สเตปหนึ่งหน่วย ในกรณีนี้จะประกอบไปด้วยเทอม เอ็กซ์โปเนนเชียล ที่มีกำลังเป็นลบสองเทอม และการลดลงของ เอ็กซ์โปเนนเชียล อันหนึ่งต้องลดลงเร็วกว่าอีกอันหนึ่ง ดังนั้นเทอมของ เอ็กซ์โปเนนเชียล ที่ลดค่าลงเร็ว (ซึ่งหมายถึง ค่าคงที่เวลาของเทอมนั้นมีค่าน้อย) อาจจะตัดทิ้งได้ นั่นคือถ้าสมมติให้ s_2 อยู่ใกล้กับแกน $j\omega$ ในระนาบ s มากกว่า s_1 แล้วคำตอบโดยประมาณของสมการ $c(t)$ นั้นสามารถตัดเทอมที่มี s_1 ออกไปได้ ทั้งนี้เพราะเทอมที่ประกอบด้วย s_1 จะมีผลต่อผลตอบสนองของระบบน้อย และผลตอบสนองในกรณีนี้จะคล้ายกับผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง

สำหรับค่าต่างๆของ ζ ตอนออร์มอลไลซ์ไทม์ (Normalized Time) $\omega_n t$ ดังนั้นระบบอันดับสองที่มี ζ เท่ากันจะมีโอเวอร์ชูท (Overshoot) เท่ากันและรูปแบบการออสซิลเลท จะเหมือนกัน ถึงแม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่า ω_n จะไม่เท่ากันก็ตาม เราสามารถกล่าวได้ว่าระบบอันดับสองแต่ละระบบที่มี ζ เท่ากันนั้นจะมี เสถียรภาพสัมพัทธ์ (Relative Stability) เหมือนกัน



รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย ของระบบอันดับสองสำหรับค่าต่างๆของ ζ จากรูปจะเห็นว่าระบบที่เป็นแบบ อันเดอร์แด็ม ที่มี ζ อยู่ระหว่าง 0.5 – 0.8 นั้นจะเข้าสู่ค่า สุกท้ายได้เร็วกว่าระบบที่เป็นแบบ คริติคอลแด็มหรือระบบที่เป็นแบบ โอเวอร์แด็ม และสำหรับ ระบบที่ผลตอบสนองไม่มีการออสซิลเลชัน ผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย ของ ระบบแบบ คริติคอลแด็มจะเข้าสู่ค่าสุกท้ายเร็วที่สุด

2.6 นิยามของสเปกซิฟิเคชัน (Specification) ต่างๆของผลตอบสนองชั่วคราว

ในทางปฏิบัติแล้วสมรรถนะของระบบควบคุมจะแสดงในเทอมของปริมาณต่างๆใน โดเมนเวลา และส่วนมากแล้วเราจะวิเคราะห์สมรรถนะของระบบควบคุมนี้จากผลตอบสนองชั่วคราว ของระบบต่ออินพุตที่เป็น สเตปหนึ่งหน่วย โดยพิจารณาถึงสเปกซิฟิเคชันต่างๆต่อไป

2.6.1 ดีเลย์ไทม์ (Delay Time), t_d

ดีเลย์ไทม์เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบมีค่าเข้าสู่ 50% ของค่าที่ภาวะคงที่

2.6.2 ไรซ์ไทม์ (Rise Time), t_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไรซ์ไทม์เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบมีค่าขึ้นจาก 10% ไปถึง 90% ของค่าที่ภาวะคงที่ ในบางครั้งอาจจะถือว่าไรซ์ไทม์เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองมีค่าจาก 10% - 90% หรือ 5% - 95% หรือ 0-100% ของค่าที่ภาวะคงที่ก็ได้

2.6.3 พีคไทม์ (Peak Time), t_p

พีคไทม์เป็นค่าของเวลาที่ผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย เกิดโอเวอร์ชูท สูงสุดเป็นครั้งแรก

2.6.4 แมกซ์ิมัม โอเวอร์ชูท (Maximum Overshoot), M_p

แมกซ์ิมัม โอเวอร์ชูทซึ่งในบางครั้งนิยมแสดงในเทอมของเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูท(Percent Overshoot) เป็นค่าแตกต่างสูงสุดระหว่างอินพุทและเอาต์ของระบบ ถ้าผลตอบสนองของระบบมี

$$\text{MaximumPercentOvershoot} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

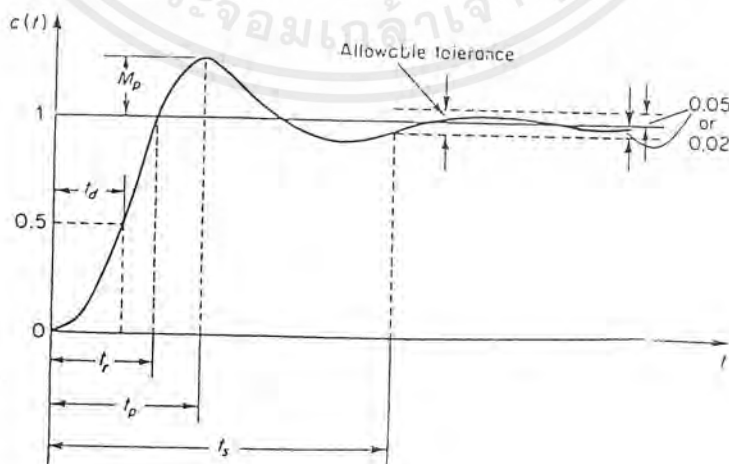
ค่าที่ภาวะคงที่ไม่เท่ากับหนึ่งแล้วเราได้ว่า

ค่าของแมกซ์ิมัม โอเวอร์ชูทนี้จะแสดงถึงเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบ

2.6.5 เซตติงไทม์ (Settling Time), t_s

เซตติงไทม์เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่เป็น สเตปหนึ่งหน่วยมีค่าเข้าสู่ช่วง 2% หรือ 5% ของค่าที่ภาวะคงที่และมีค่าอยู่ในช่วงนี้ตลอด

อย่างไรก็ตามสเปกซิฟิเคชันต่างๆเหล่านี้อาจจะไม่สามารถนำไปใช้ในทุกระบบได้ เช่น ระบบที่เป็นแบบโอเวอร์แดม นั้น เราไม่สามารถหาค่าของ t_p และ M_p ได้ เป็นต้น นอกจากนี้สเปกซิฟิเคชันเหล่านี้จะใช้กับระบบที่เสถียรเท่านั้น เพราะระบบที่ไม่เสถียรนั้นผลตอบสนองของระบบจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆและควบคุมไม่ได้



รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองของระบบที่เป็น สเตปหนึ่งหน่วย แสดงถึง t_d, t_r, t_p, M_p และ t_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สเปกซิฟิเคชันของผลตอบสนองชั่วคราวของระบบอันดับสอง

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงวิธีการหาไรซ์ไทม์, พีคไทม์, แมกซิมัม โอเวอร์ชูท, เซตติงไทม์ และ ดีเลย์ไทม์ ของระบบอันดับสองที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนป้อนกลับ

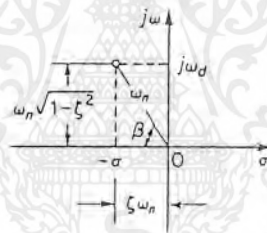
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

โดยที่ค่าต่างๆเหล่านี้จะอยู่ในเทอมของ ζ และ ω_n และในที่นี้เราจะสมมติว่าระบบอันดับสองนี้เป็นแบบ อันเดอร์แด็ม

2.7.1 ไรซ์ไทม์ (t_r) :

$$t_r = \frac{(\pi - \beta)}{\omega_d} \quad \text{-----(2.27)}$$

โดยที่ค่าของ β แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 นิยามของมุม β

จากรูปที่ 2.11

$$\cos \beta = \zeta \quad \text{-----(2.28)}$$

2.7.2 พีคไทม์ (t_p) :

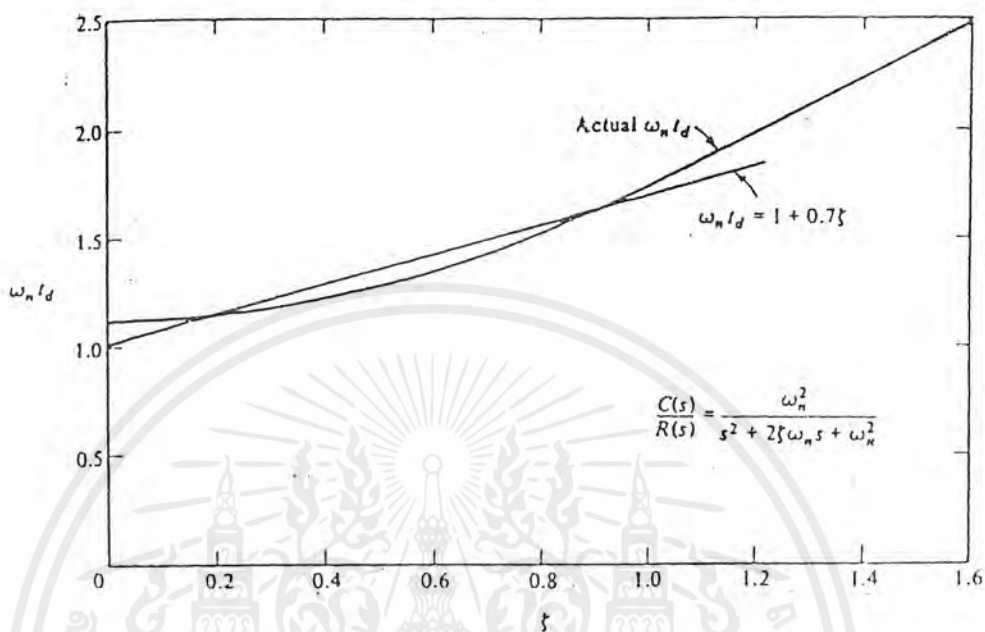
$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad \text{-----(2.29)}$$

2.7.3 แมกซิมัม โอเวอร์ชูท (Mp) :

$$M_p = e^{-\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\pi} \times 100\% \quad \text{-----(2.30)}$$

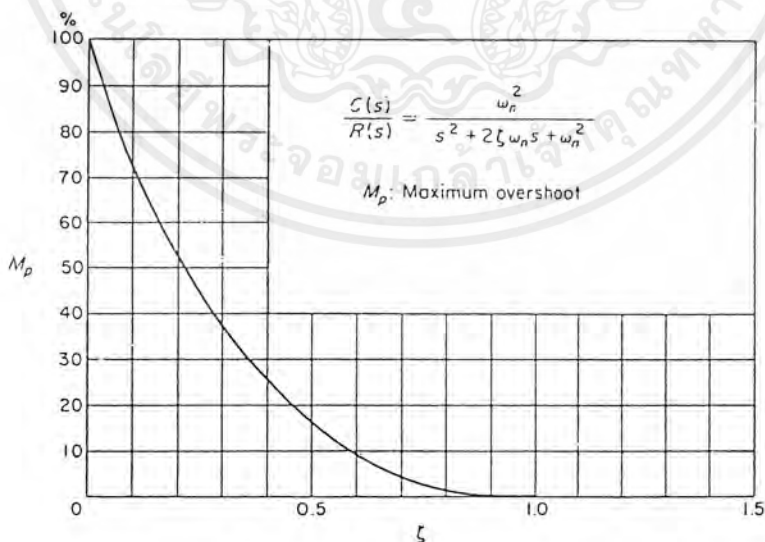
จะเห็นว่าแมกซิมัม โอเวอร์ชูทของระบบอันดับสองขึ้นอยู่กับอัตราการหน่วง ζ เท่านั้น รูปที่ 2.12 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแมกซิมัมเปอร์เซนต์โอเวอร์ชูท (Maximum Percent Overshoot) ต่ออัตราการหน่วง ζ จากรูป ถ้า ζ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.4 – 0.8 แล้ว แมกซิมัม

เปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูท ของผลตอบสนองของระบบต่ออินพุทที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย จะมีค่าอยู่ระหว่าง 25% - 2.5%



รูปที่ 2.12 M_p ต่อ ζ

2.7.4 เซตตั้งใหม่ (ts)



รูปที่ 2.13 เส้นโค้งรอบนอกของผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุทที่เป็นสเตปหนึ่งหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ความเร็วของการลดลงของผลตอบสนองชั่วคราวขึ้นอยู่กับค่าของ ค่าคงที่เวลา $1/\zeta\omega_n$ ดังนั้น สำหรับ ω_n ที่กำหนดให้เซตตั้งใหม่จะเป็นฟังก์ชันของอัตราการหน่วง ζ เซตตั้งใหม่ที่มีค่าเข้าสู่ช่วง $\pm 2\%$ หรือ $\pm 5\%$ ของค่าที่ภาวะคงที่นั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้กราฟเส้นโค้ง(Curve) กรอบนอก ด้านบนหรือด้านล่างก็ได้ นั่นคือ

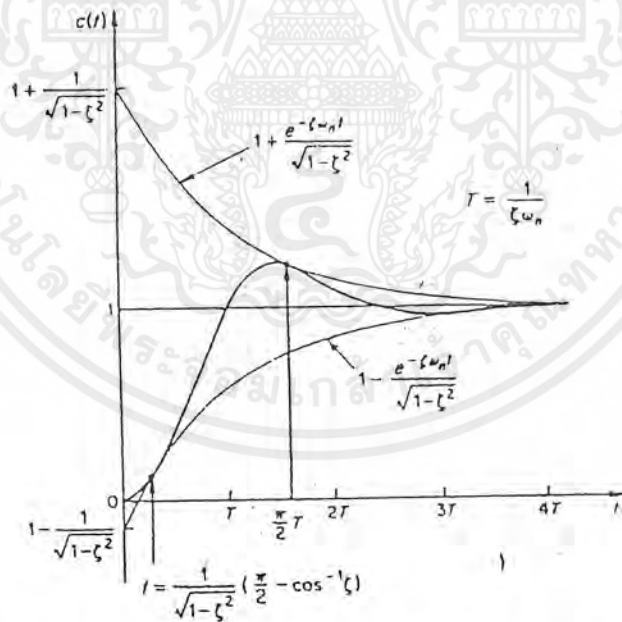
สำหรับกรณี $\pm 2\%$ $t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n}$; $0 < \zeta < 1$ -----(2.31)

สำหรับกรณี $\pm 5\%$ $t_s = \frac{3}{\zeta\omega_n}$; $0 < \zeta < 1$ -----(2.32)

2.7.5 ดีเลย์ไทม์ (td) :

การหาค่าที่แน่นอนของดีเลย์ไทม์นั้นเราจะแทนค่าของ $c(t)$ ในสมการ(7) ให้เท่ากับ 0.5 แล้วหาค่าของ t ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างจะยาก วิธีที่ง่ายกว่าก็คือการนำเอาค่าของ ω_n t_d ต่อค่าต่างๆของ ζ จากรูปที่ 2.9 มาพล็อตดังแสดงในรูปที่ 2.14 จากรูป ตลอดย่านของ $0 < \zeta < 1$ นี้เราสามารถจะประมาณเส้นโค้งนี้ได้ด้วยเส้นตรง นั่นคือ

$$t_d \approx \frac{(1 + 0.7\zeta)}{\omega_n} ; 0 < \zeta < 1 \quad \text{-----(2.33)}$$



รูปที่ 2.14 Delay time ต่อ ζ ของระบบอันดับสอง

เทียบความสัมพันธ์ระหว่างไรซ์ไทม์, แมกซิมัม โอเวอร์ชูท, เซตตั้ง ใหม่ และ ดีเลย์ ไทม์ แล้วพบว่าสำหรับ ζ ที่มีค่าน้อยๆแล้วไรซ์ไทม์ และดีเลย์ ไทม์ จะมีค่าน้อย แต่แมกซิมัม โอเวอร์ชูท

และเซ็ทติ้งใหม่จะมีค่ามาก ดังนั้นถ้าต้องการทำให้ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วและมีค่าของแม็กซิมัม โอเวอร์ชูทไม่มากแล้วค่าของ ζ จะต้องไม่น้อยเกินไป

2.8 วงจรออปแอมป์ (Operational Amplification)

ออปแอมป์สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรอินเวอร์ทติ้ง(Inverting),นอนอินเวอร์ทติ้ง (Noninverting) หรือ ดิฟเฟอเรนเชียล แอมป์รีฟลายเออร์(Differential Amplifier) ได้โดยใช้ การป้อนกลับแบบลบ(Negative Feedback) เพื่อให้ได้อัตราการขยายที่เสถียรและเพิ่มช่วงใช้งาน (Bandwidth) ของวงจร จากคุณสมบัติทางอุดมคติของออปแอมป์ คือ ความต้านทานด้านอินพุตสูง ความต้านทานด้านเอาต์พุตต่ำ อัตราการขยายสูงและช่วงใช้งานกว้าง แต่ในการนำวงจรออปแอมป์ไปใช้งานจริงนั้นอาจจะได้ผลไม่ตรงกับคุณสมบัติทางอุดมคตินัก โดยอาจจะมีเอาพุทออฟเซ็ทโวลเตจ(Output Offset Voltage) คือ ความต่างศักย์ทางด้านเอาต์พุตเมื่ออินพุตทั้ง 2 ขา(บวกและลบ)ต่อลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถช้วงจรชดเชยเพื่อให้ออปแอมป์มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอุดมคติ

2.8.1 วงจรออปแอมป์ความถี่สูง (High-Frequency Op-amp Equivalent Circuit)

อะไรคือสาเหตุที่ทำให้ค่าเกนของออปแอมป์ ไม่คงที่คือลดลงเมื่อความสูงๆ นั่นคือที่จริงแล้วเมื่อพิจารณาวงจรสมมูลย์ของออปแอมป์ พบว่าจะมีตัวเก็บประจุเป็นส่วนประกอบอยู่ ซึ่งมันจะมีค่ารีแอคแตนซ์ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น หมายความว่าเราต้องพิจารณาตัวเก็บประจุที่ต่อเชื่อมอยู่กับขาของเอาต์พุตด้วยเมื่อพิจารณาที่ความถี่สูงๆ

2.8.2 ผลตอบสนองทางความถี่ของลููปปิด (Close-Loop Frequency Response)

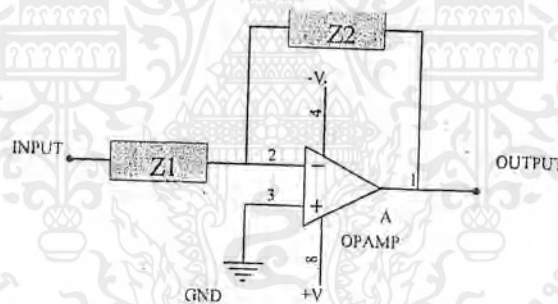
เราจะพบว่าเกนของวงจรจะมีค่าคงที่เท่ากับเกนลููปเปิด(Open-Loop Gain) ของออปแอมป์ จนถึงจุดความถี่แรกที่หยุด(First Break Frequency) ดังนั้นช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ของออปแอมป์ คือความถี่แรกที่หยุด แต่ช่วงที่ใช้งานจะมีน้อยมาก โครงสร้างออปแอมป์แบบลููปเปิดจึงถูกนำไปใช้งานน้อย ในการเพิ่มช่วงใช้งานของออปแอมป์ และทำให้มันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง วิธีที่นิยมใช้กันก็คือการต่อป้อนกลับแบบเนกาทีฟ(Negative Feedback) ให้ออปแอมป์

บทที่ 3

วงจรใช้งานและการนำไปใช้งาน

จากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้กล่าวมาในบทที่แล้ว ทำให้เราเห็นว่าเราสามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ซึ่งส่วนประกอบของฟังก์ชันถ่ายโอนประกอบไปด้วย ส่วนของเกน , ซีโร , โพลอันดับหนึ่ง , โพลอันดับสอง ซึ่งในการจำลองระบบที่ต้องการเราจะต้องนำวงจรฟังก์ชันพื้นฐานต่าง ๆ มาแทนลงในส่วนประกอบต่าง ๆ ของฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อสร้างระบบที่ต้องการ

ฟังก์ชันพื้นฐานต่างๆที่ใช้สร้างวงจรเพื่อแทนฟังก์ชันถ่ายโอน (อัตราขยายของวงจร) ซึ่งใช้วงจรอินเวอร์ตติ้ง แอมพลิฟายเออร์ (Inverting Amplifier) สามารถวิเคราะห์ตามคุณสมบัติทางอุดมคติของออปแอมป์ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐาน

$$i_1 = i_2 \quad \text{-----(3.1)}$$

$$\frac{v_{in} - e_d}{z_1} = \frac{e_d - v_{out}}{z_2} \quad \text{-----(3.2)}$$

จาก $v_{out} = -Ae_d \quad \text{-----(3.3)}$

เมื่อ A คือ เกนของ ออปแอมป์ ซึ่ง $A \rightarrow \infty$

$$e_d = \frac{-v_{out}}{A} \quad \text{-----(3.4)}$$

ดังนั้น $e_d = 0$ เพราะฉะนั้นจะได้

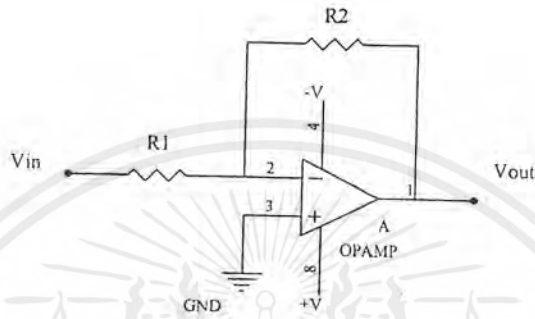
$$\frac{v_{in}}{z_1} = \frac{-v_{out}}{z_2} \quad \text{-----(3.5)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-z_1}{z_2} \text{-----(3.6)}$$

วงจรถ่าย (Gain)

ได้จากการแทน z_1 และ z_2 ด้วยตัวต้านทาน R ในสมการ(3.6)



รูปที่ 3.2 วงจรถ่าย

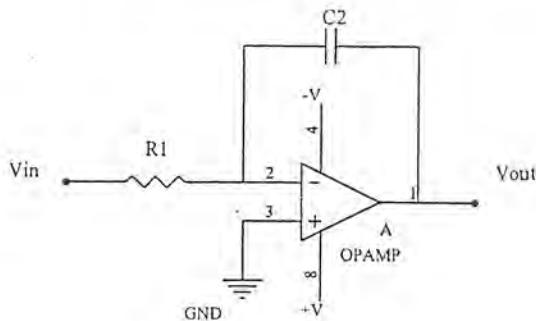
จะได้

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_2}{R_1} \text{-----(3.7)}$$

ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้ เอาท์พุทจะมีอัตราขยายเป็น $\frac{R_2}{R_1}$ เท่าของอินพุท และจะต่างเฟสกับอินพุทเท่ากับ -180 องศา

3.1 วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator)

ได้จากการแทน z_1 ด้วยตัวต้านทาน R_1 แทน z_2 ด้วยตัวเก็บประจุ C_2 ในสมการ(3.6)



รูปที่ 3.3 วงจรอินทิเกรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-1}{R_1 C_2 s} = \frac{-1}{T_i s} \quad \text{-----}(3.8)$$

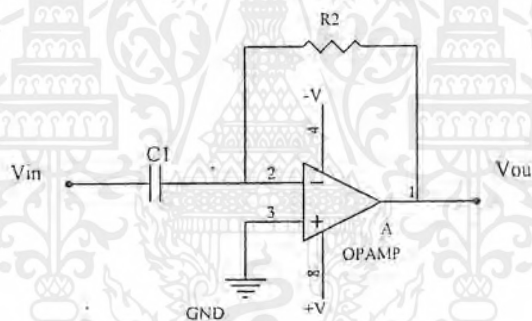
เมื่อ T_i คือ ค่าคงที่(Integrating Time Constant)

วงจรรวมอินทิเกรเตอร์มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตขึ้นอยู่กับขนาดของอินพุตและค่า ค่าคงที่เวลาโดยมีผลเฉลยทางความถี่ เมื่อป้อนอินพุตเป็น สเตปหนึ่งหน่วย คือ ขนาด(Magnitude) ,

$$M = \left| \frac{1}{T\omega_i} \right| \quad \text{และมุมเฟส , } \varphi \text{ เท่ากับ } 90^\circ \text{ นั่นคือจะได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณแรม}$$

3.3 วงจรดิฟเฟอเรนทีเอเตอร์ (Differentiator)

ได้จากการแทน z_1 ด้วยตัวเก็บประจุ C_1 และแทน z_2 ด้วยตัวต้านทาน R_2 ในสมการ(3.6)



รูปที่ 3.4 วงจรดิฟเฟอเรนทีเอเตอร์

จะได้

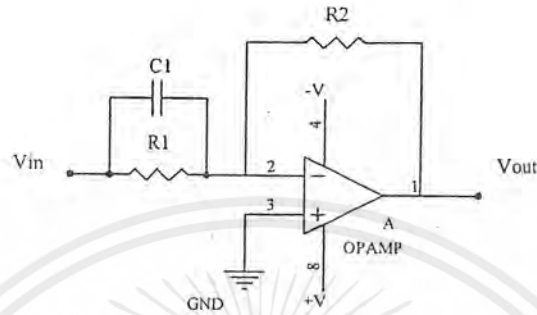
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -R_2 C_1 s = -T_d s \quad \text{-----}(3.9)$$

เมื่อ T_d คือ ค่าคงที่(Differentiating Time Constant)

จากอัตราการขยายของวงจร จะเห็นว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการขยายสูงมาก อาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนหรือเกิดการออสซิลเลชันขึ้นในวงจรได้ ดังนั้นจึงนิยมใส่ตัวต้านทาน, R ต่ออนุกรมกับ C เพื่อทำเป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Lowpass Filter) แทน

3.4 วงจรระบบอันดับหนึ่งแบบลีด (First-Order Lead)

ได้จากการแทน z_1 ด้วยวงจร C_1 ขนานกับ R_1 และแทน z_2 ด้วยตัวต้านทาน R_2 ในสมการ(3.6)



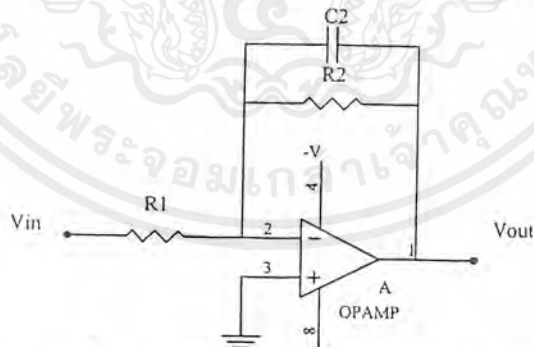
รูปที่ 3.5 วงจรระบบอันดับหนึ่งแบบลีด

จะได้

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = (1 + R_1 C_1 s) \quad \text{-----}(3.10)$$

3.5 วงจรระบบอันดับหนึ่งแบบแล็ก (First-Order Lag)

ได้จากการแทน z_1 ด้วยตัวต้านทาน R_1 และแทน z_2 ด้วยวงจร C_2 ขนานกับ R_2 ในสมการ(3.6)



รูปที่ 3.6 วงจรระบบอันดับหนึ่งแบบแล็ก

จะได้

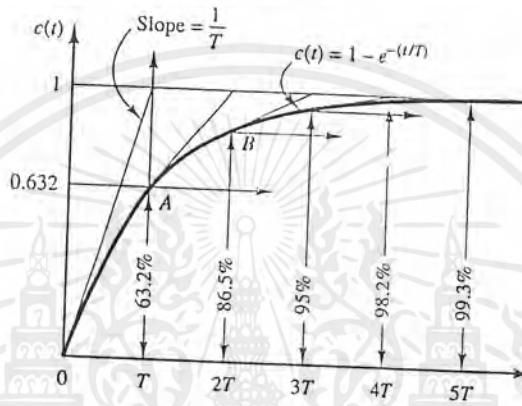
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-R_2}{R_1(R_2 C_2 s + 1)} = \frac{-R_2}{R_1(T_1 s + 1)} \quad \text{-----}(3.11)$$

เมื่อ T_1 คือ เวลาหน่วง(Delay Time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

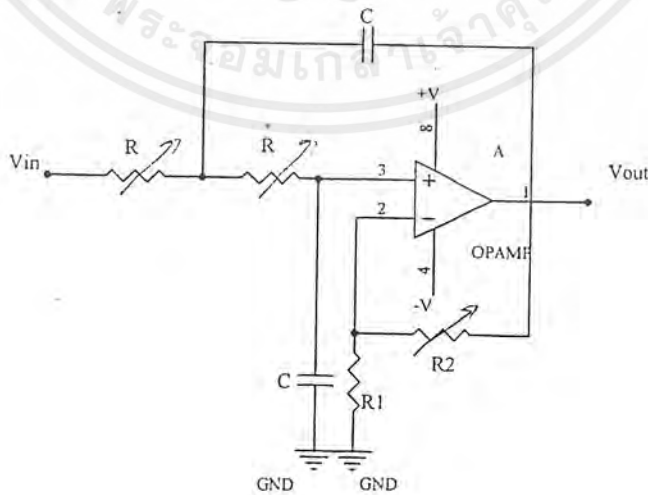
ผลตอบสนองต่อเวลา t เมื่อป้อนอินพุทเป็นสเตปหนึ่งหน่วย จะได้เอาต์พุทเป็น เอ็กซ์โปเนนเชียล โดยมีขนาดเป็น $\frac{R_2}{R_1}$ เท่าของอินพุทที่เวลา $t \rightarrow \infty$ และมีขนาดเท่ากับ 63.2% ของค่าสุดท้ายที่เวลาเท่ากับเวลาหน่วง, T_1

$$v_o(t) = \frac{R_2}{R_1} (1 - e^{-t/T_1}) \quad \text{-----(3.12)}$$



รูปที่ 3.7 เส้นโค้งผลตอบสนองแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

3.6 วงจรระบบอันดับสอง (Second-Order)



รูปที่ 3.8 วงจรระบบอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 แสดงวงจรรบบอันดับสอง โดยสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1/kR^2C^2}{s^2 + (3 - 1/k) + 1/R^2C^2}, \quad k = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{-----(3.13)}$$

จากรูปแบบวงจรรบบอันดับสอง

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \text{-----(3.14)}$$

เมื่อ ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ(Natural Frequency)

ζ คือ อัตราการหน่วง(Damping Ratio)

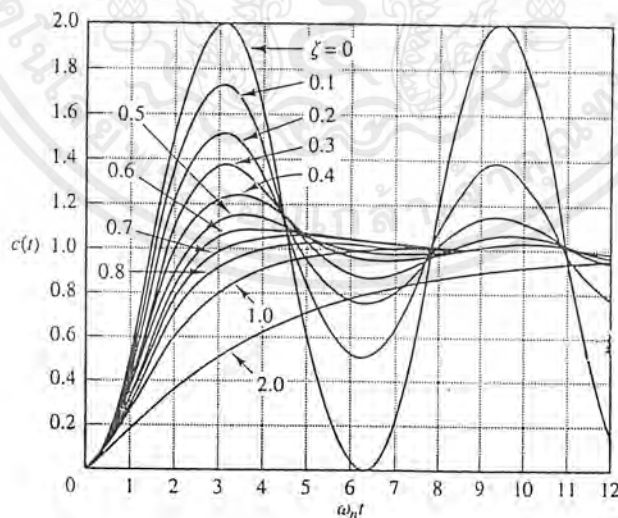
ω_d คือ ความถี่ธรรมชาติของการหน่วง(Damping Natural Frequency) $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$

โดย $0 < \zeta < 1$ เรียกว่า อันเดอร์แด็ม

$\zeta = 1$ เรียกว่า คริติคอลแด็ม จะเกิดการอสซิชิล

$\zeta > 1$ เรียกว่า โอเวอร์แด็ม

เมื่อป้อนอินพุตเป็น สเตปหนึ่งหน่วย จะได้เอาต์พุตดังรูป

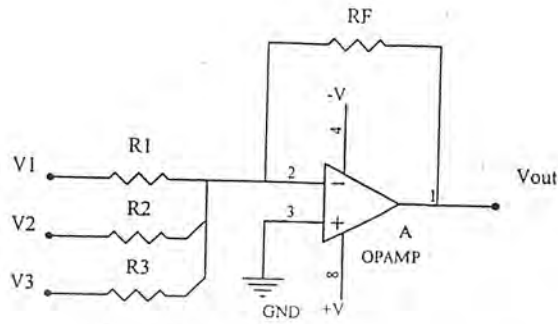


รูปที่ 3.9 Unit-step response curves of the system

จากวงจรจะได้ว่า $\omega_n = \frac{1}{RC}$ และ $\zeta = 1.5 - \frac{1}{2k}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 วงจรบวก (Summing)



รูปที่ 3.10 วงจรบวก

จะได้

$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_1 + \frac{R_f}{R_2}v_2 + \frac{R_f}{R_3}v_3\right) \quad \text{-----}(3.15)$$

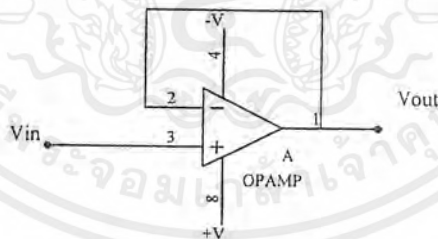
กำหนดให้

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_f$$

จะได้

$$v_o = -(v_1 + v_2 + v_3) \quad \text{-----}(3.16)$$

3.8 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) หรือ โวลต์เตจ ฟอลโลเวอร์ (Voltage Follower)



รูปที่ 3.11 วงจรบัฟเฟอร์

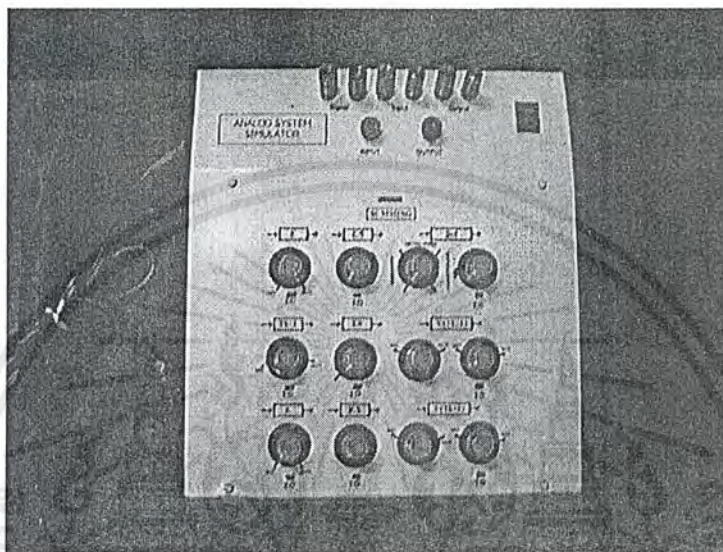
จะได้

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = 1 \quad \text{-----}(3.17)$$

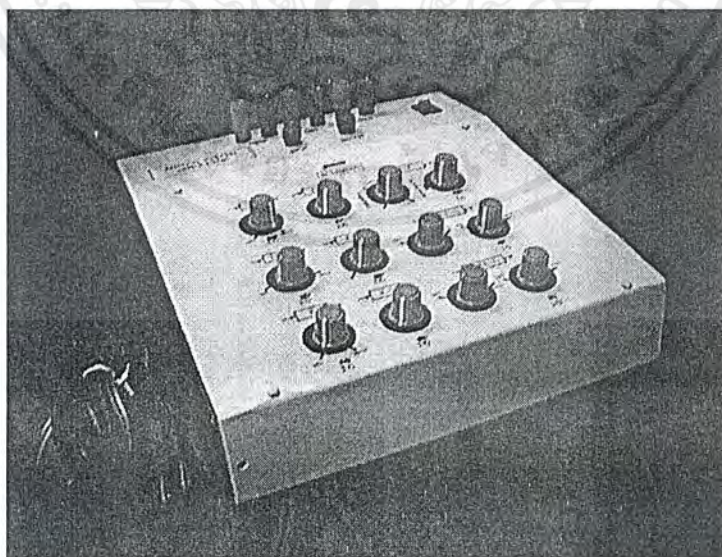
บทที่ 4

ชุดทดลอง คู่มือการใช้งานและผลการทดลอง

4.1 ลักษณะของชุดทดลองระบบควบคุมแบบอนาล็อก



รูปที่ 4.1 แสดงด้านหน้าของชุดทดลองระบบควบคุมแบบอนาล็อก



รูปที่ 4.2 แสดงด้านหลังของชุดทดลองระบบควบคุมแบบอนาล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของชุดทดลอง

ชุดทดลองระบบควบคุมแบบอนาลอก ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงขนาด 12 โวลต์
2. วงจรเกน 2 ชุด
3. วงจรอินทิเกรเตอร์ 2 ชุด
4. วงจรดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์ 1 ชุด
5. วงจรระบบอันดับหนึ่งแบบแฉีก 2 ชุด
6. วงจรระบบอันดับหนึ่งแบบลีด 1 ชุด
7. วงจรระบบอันดับสอง 1 ชุด
8. วงจรกลับเฟส 1 ชุด
9. วงจรรวมสัญญาณ 4 อินพุต 1 ชุด

4.2 การใช้งาน

4.2.1 ขั้นตอนการใช้ชุดทดลอง

1. แยกสมการฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีพาร์เชียลแฟรกชัน จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอน

$$G(s) = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$G(s) = \frac{A_1}{s + B_1} + \frac{A_2}{s + B_2} + \dots + \frac{A_n}{s + B_n}$$

โดยที่

$$A_1 = \lim_{s \rightarrow -B_1} [G(s) \times (s + B_1)]$$

$$A_2 = \lim_{s \rightarrow -B_2} [G(s) \times (s + B_2)]$$

$$\begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array}$$

$$A_n = \lim_{s \rightarrow -B_n} [G(s) \times (s + B_n)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลังจากได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปแบบที่ปาร์เชียลแล้วก็จะทำการเลือกฟังก์ชันที่จะต้องใช้งานทดลอง แล้วป้อนอินพุตเข้าไปที่ฟังก์ชันที่ใช้งานและส่วนของเอาต์พุตนำไปต่อกับฟังก์ชันตัวบวก

3. ทำการป้อนสัญญาณอินพุตของระบบจากเครื่องสร้างสัญญาณ (Signal Generator) และต่อสายวัดสัญญาณที่เชื่อมต่อไปยังสโคปให้เรียบร้อยตรงจุดต่อที่เตรียมไว้ก็จะต่อเสร็จสมบูรณ์พร้อมใช้งาน โดยสัญญาณที่วัดได้จะเป็นสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับอินพุต

4. หลังจากต่อทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว เมื่อเราทำการวัดผลตอบสนองเราสามารถปรับค่าต่าง ๆ ในแต่ละฟังก์ชันได้ตามต้องการดังตาราง

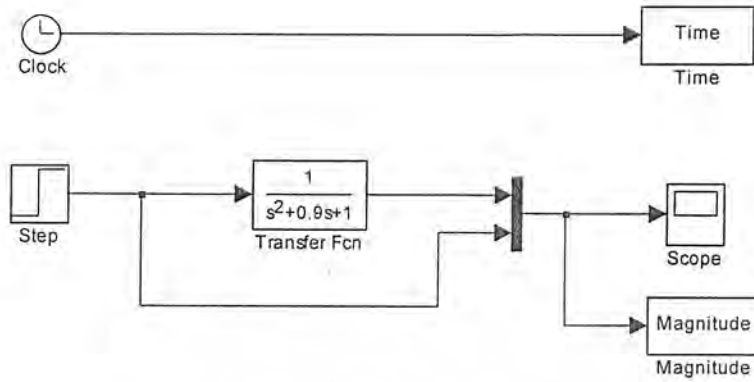
วงจรฟังก์ชันพื้นฐาน	สมการฟังก์ชันถ่ายโอน	พารามิเตอร์ที่ทำการปรับ	ช่วงการปรับใช้งาน
วงจรถ่าย	K	K	0 - 10 เท่า
วงจรถ่ายอินทิเกรเตอร์	1/RCS	K	0 - 10 เท่า
วงจรถ่ายดิฟเฟอเรนเชียล	RCS	K	0 - 10 เท่า
วงจรถ่ายระบบอันดับหนึ่งเล็ก	K/(TS+1)	K, T	0 - 10 เท่า, 0 - 0.01
วงจรถ่ายระบบอันดับหนึ่งลึด	(TS+1)	T	0 - 0.01
วงจรถ่ายระบบอันดับสองคริติคอลแดม	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$	ζ, ω_n	$\zeta = 1$
วงจรถ่ายระบบอันดับสองอานเดอร์แดม	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$	ζ, ω_n	$0 < \zeta < 1$
วงจรถ่ายระบบอันดับสองโอเวอร์แดม	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$	ζ, ω_n	$\zeta > 1$

ตารางที่ 4.1 ตารางรายละเอียดการปรับค่าของฟังก์ชันพื้นฐานต่าง ๆ

4.2.2 การสร้างแบบจำลองของระบบโดยการจำลองด้วยโปรแกรมเมทแล็บ (Matlab)

นอกจากการดูผลตอบสนองของระบบต่าง ๆ จากชุดทดลองแล้วเรายังสามารถดูผลตอบสนองจากการจำลองด้วยโปรแกรมเมทแล็บได้อีกด้วย โดยผลที่ได้จากการจำลองจะได้ผลออกมาดังทฤษฎี ทำให้เราสามารถผลมาเปรียบเทียบกับค่าจากทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงได้ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด โดยในที่นี้จะขอละการอธิบายวิธีการใช้โปรแกรมเมทแล็บไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

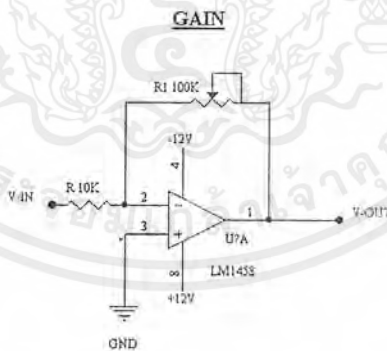


รูปที่ 4.3 แสดงการต่อวงจรสำหรับการจำลองด้วยวิธีแมทแล็บ

4.3 ผลตอบสนองของฟังก์ชันพื้นฐานต่าง ๆ

ในหัวข้อนี้เราจะแสดงผลการทดลองของผลตอบสนองของฟังก์ชันพื้นฐานต่าง ๆ โดยกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลและความแตกต่างให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นและเป็นแนวทางในการนำไปแก้ไขปรับปรุงต่อไป

4.3.1 ผลตอบสนองของเกน



รูปที่ 4.4 แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของเกน

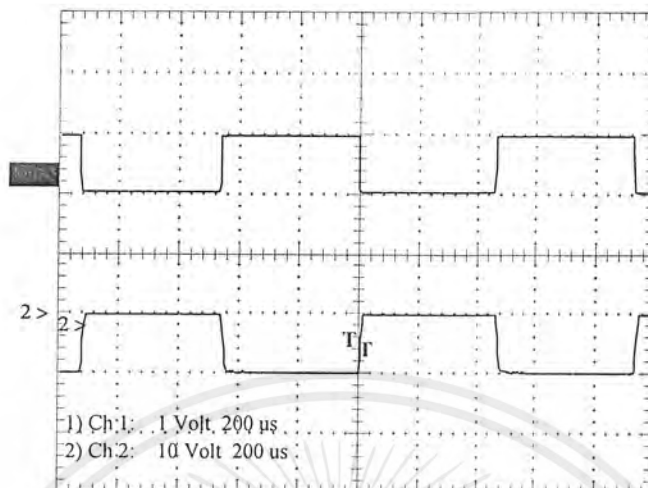
จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอน

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_1}{10K}$$

โดยที่ R_1 จะมีค่าอยู่ในช่วง

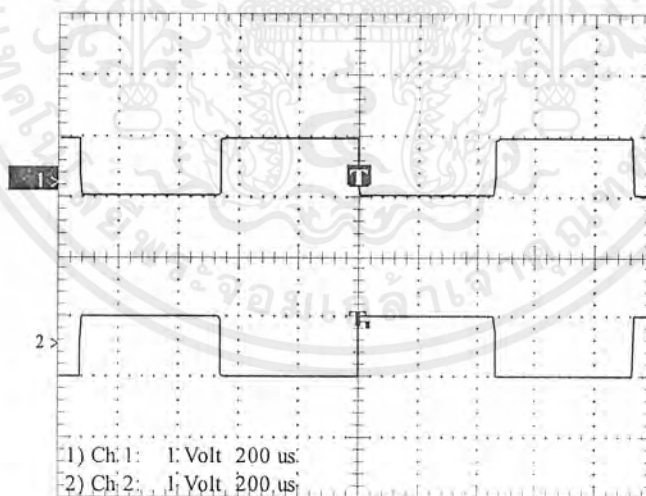
$$0 \leq R_1 \leq 100K$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(CH 1 : Input , CH 2 : Output)

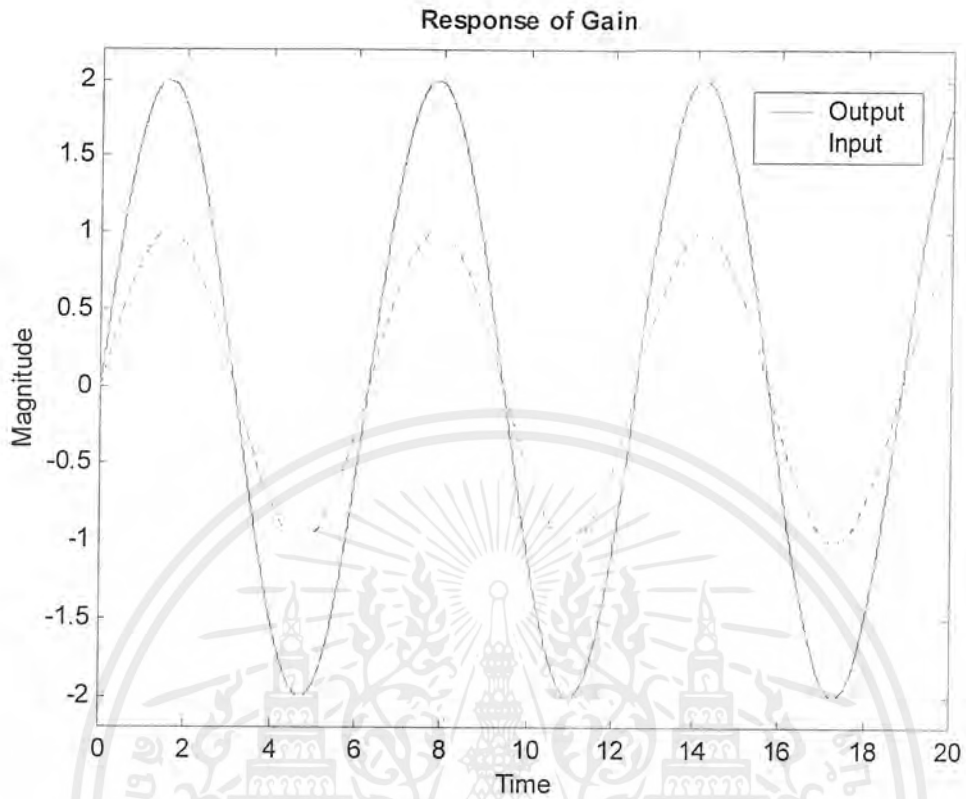
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลตอบสนองของเกนขนาด 10 เท่า



(CH 1 : Input , CH 2 : Output)

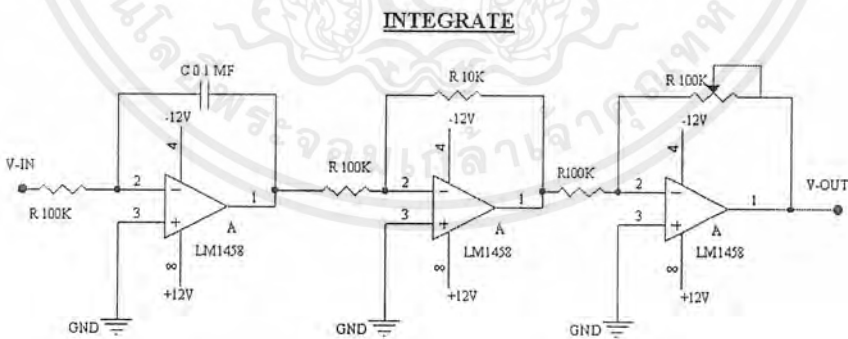
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลตอบสนองของเกนขนาด 1 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของเกนโดยใช้เม็ทแเล็บ

4.3.2 ผลตอบสนองของอินทิเกรเตอร์



รูปที่ 4.8 แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของอินทิเกรเตอร์

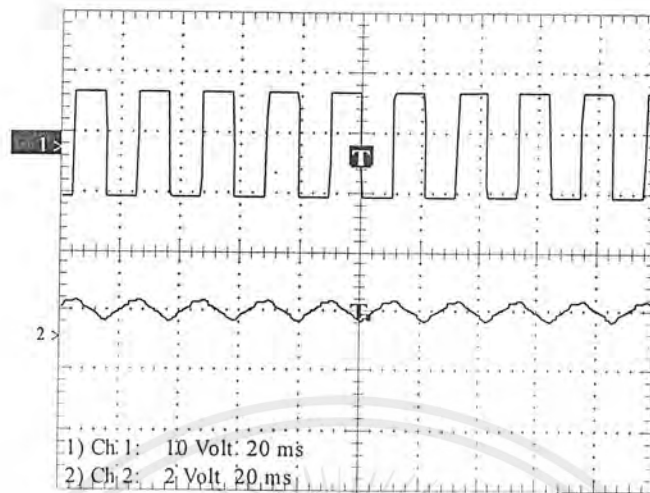
จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอน

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R}{(10K)S}$$

โดยที่ R จะมีค่าอยู่ในช่วง

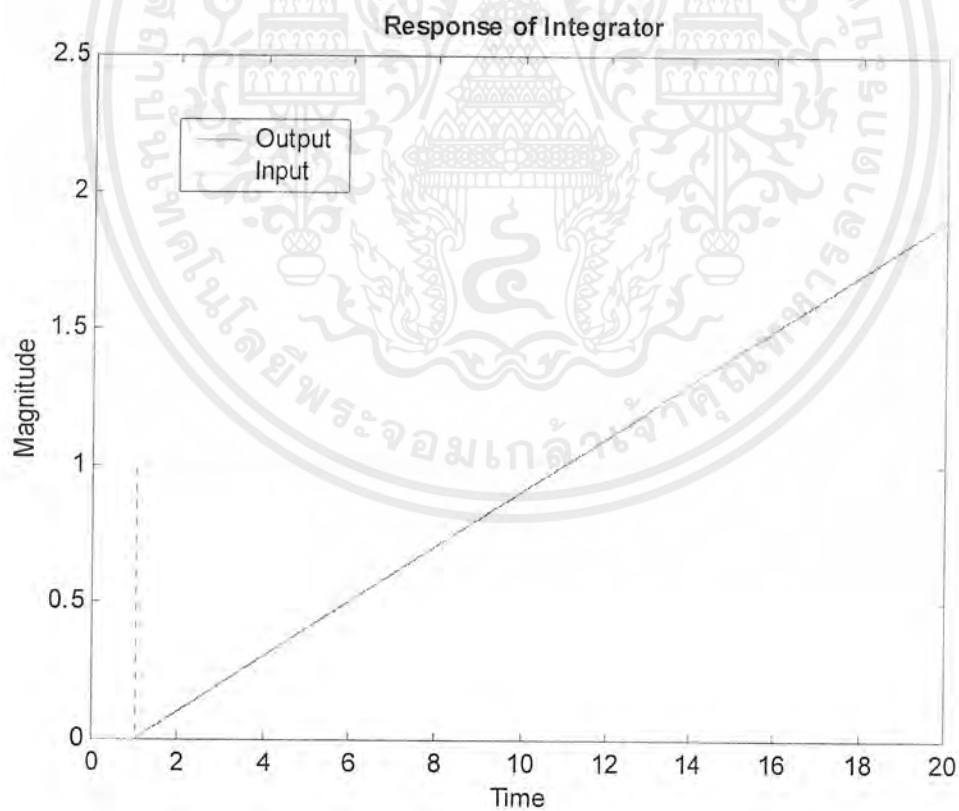
$$0 \leq R \leq 100K$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(CH 1 : Input , CH 2 : Output)

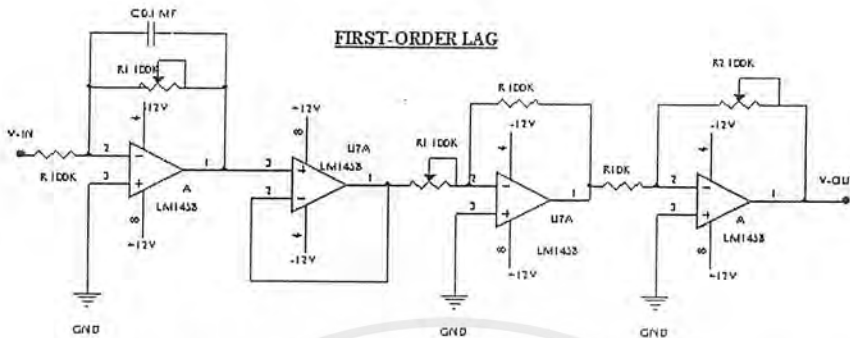
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลตอบสนองของอินทิเกรเตอร์



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของอินทิเกรเตอร์โดยใช้แมทแอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-เล็ก



รูปที่ 4.11 แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของระบบอันดับหนึ่ง-เล็ก

จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอน

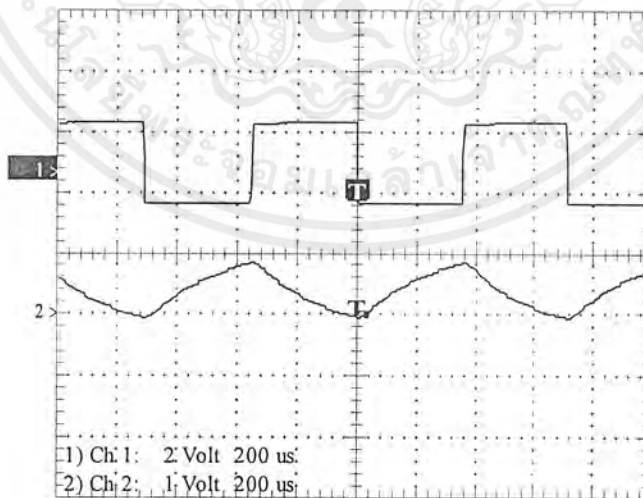
$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_2}{10K} \left(\frac{1}{0.1\mu R_1 S + 1} \right)$$

โดยที่ R_1 จะมีค่าอยู่ในช่วง

$$0 \leq R_1 \leq 100K$$

โดยที่ R_2 จะมีค่าอยู่ในช่วง

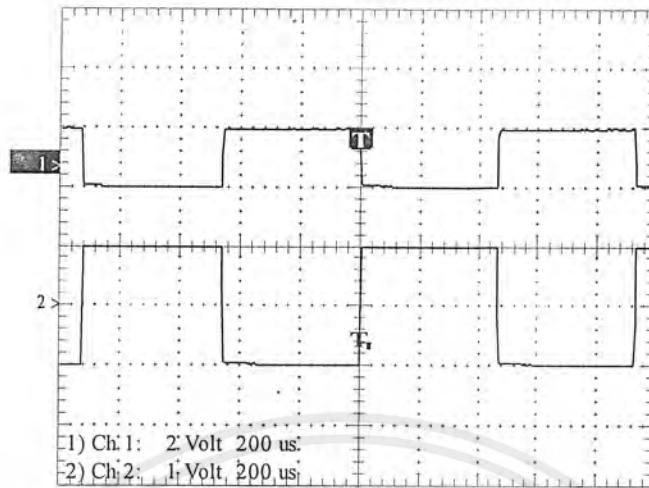
$$0 \leq R_2 \leq 100K$$



(CH 1 : Input , CH 2 : Output)

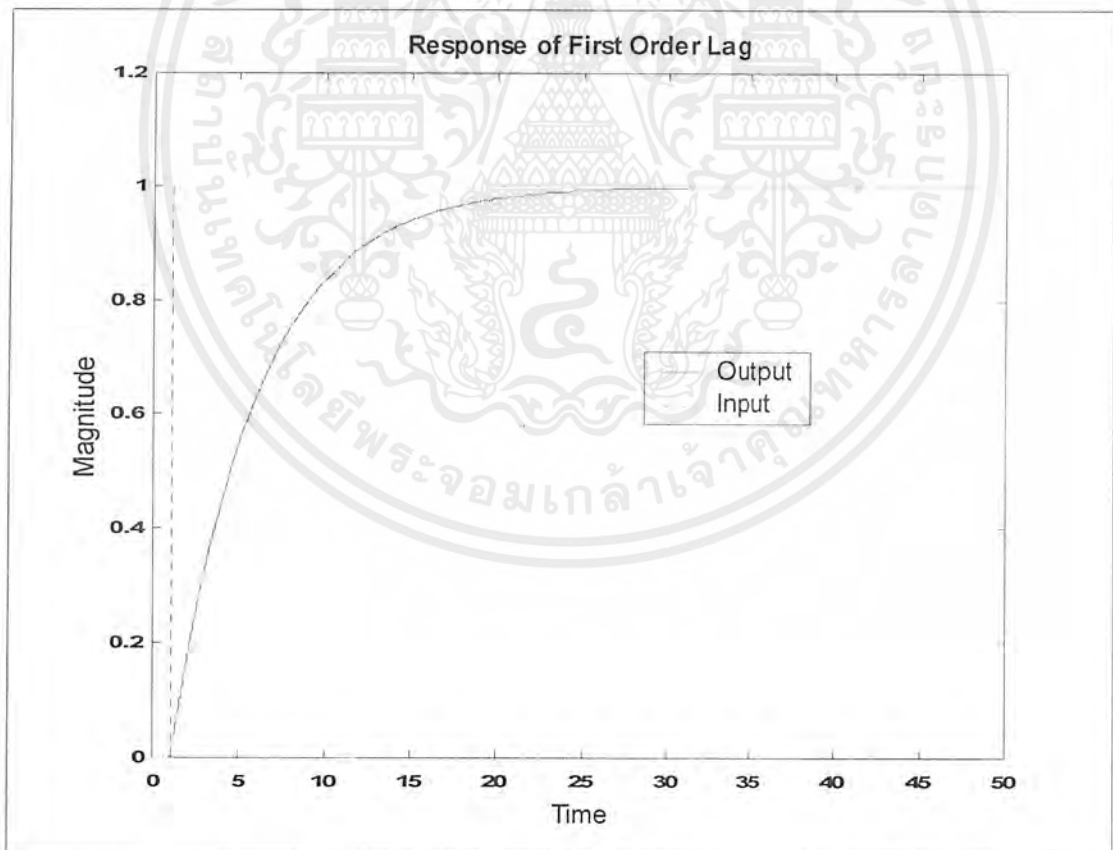
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-เล็ก (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(CH 1 : Input , CH 2 : Output)

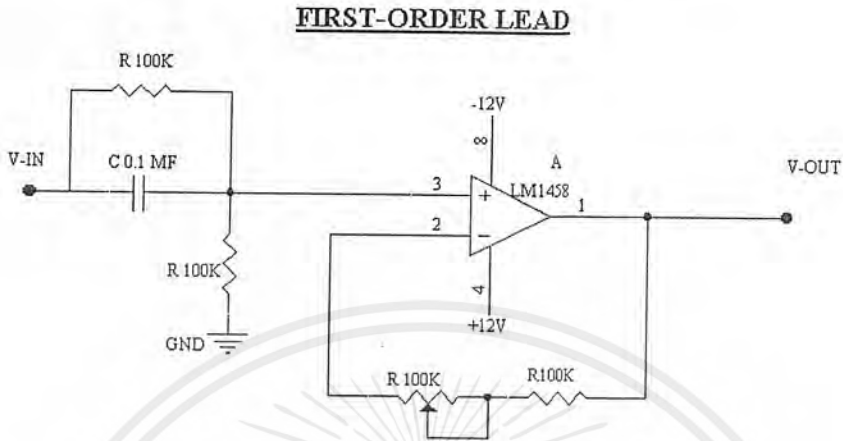
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-เล็ก (2)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-เล็กโดยใช้เมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-ลีด



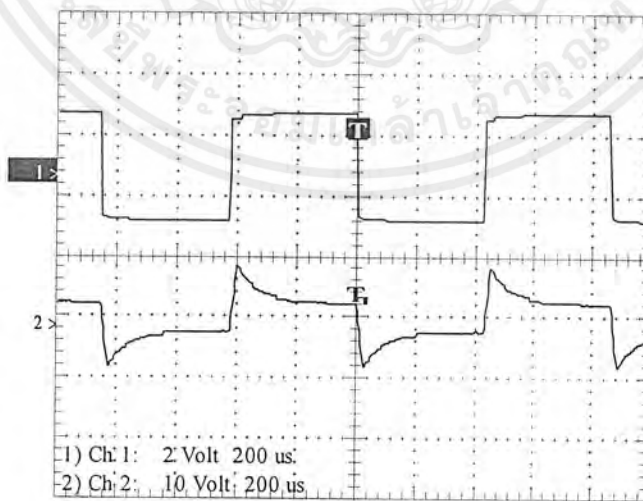
รูปที่ 4.15 แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของระบบอันดับหนึ่ง-ลีด

จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอน

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = (R \cdot 0.1 \mu S + 1)$$

โดยที่ R จะมีค่าอยู่ในช่วง

$$0 \leq R \leq 100K$$

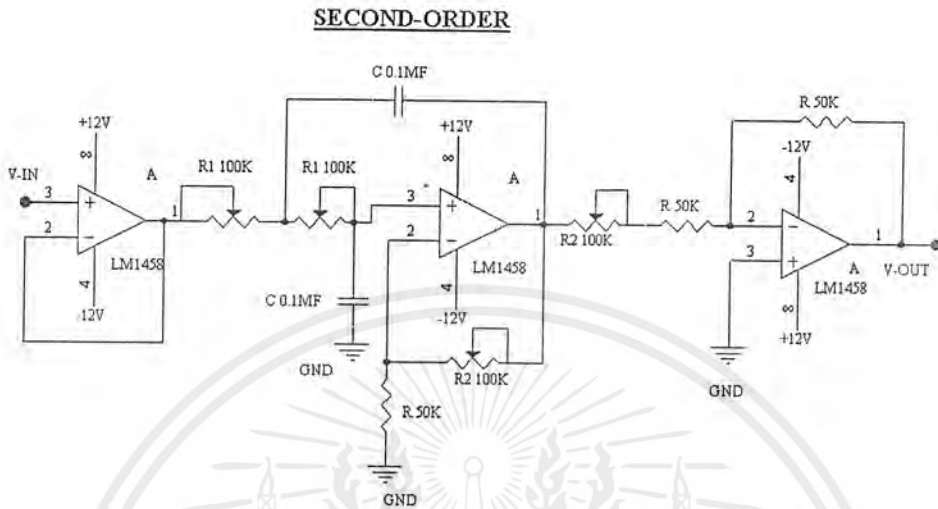


(CH 1 : Input , CH 2 : Output)

รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง-ลีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 ผลตอบสนองของระบบอันดับสอง



รูปที่ 4.17 แสดงวงจรประยุกต์ใช้งานจริงของระบบอันดับสอง
จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอน

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \left(\frac{1}{S^2 + \left(3 - \frac{1}{k}\right)S + \frac{1}{R^2 C^2}} \right), \quad k = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

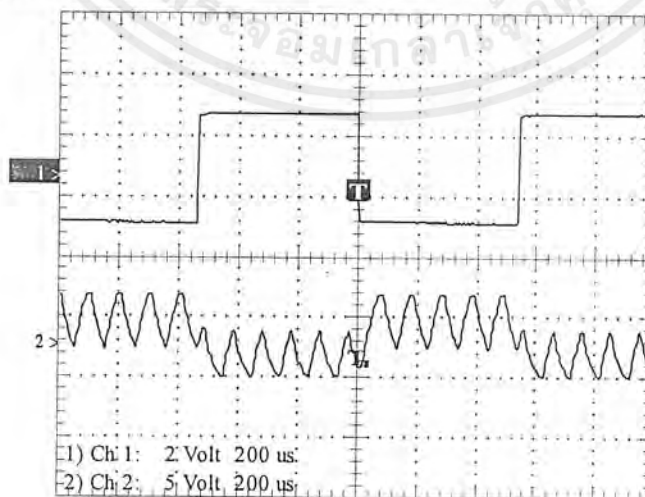
โดยที่ R_1 จะมีค่าอยู่ในช่วง

$$0 \leq R_1 \leq 100K$$

โดยที่ R_2 จะมีค่าอยู่ในช่วง

$$0 \leq R_2 \leq 100K$$

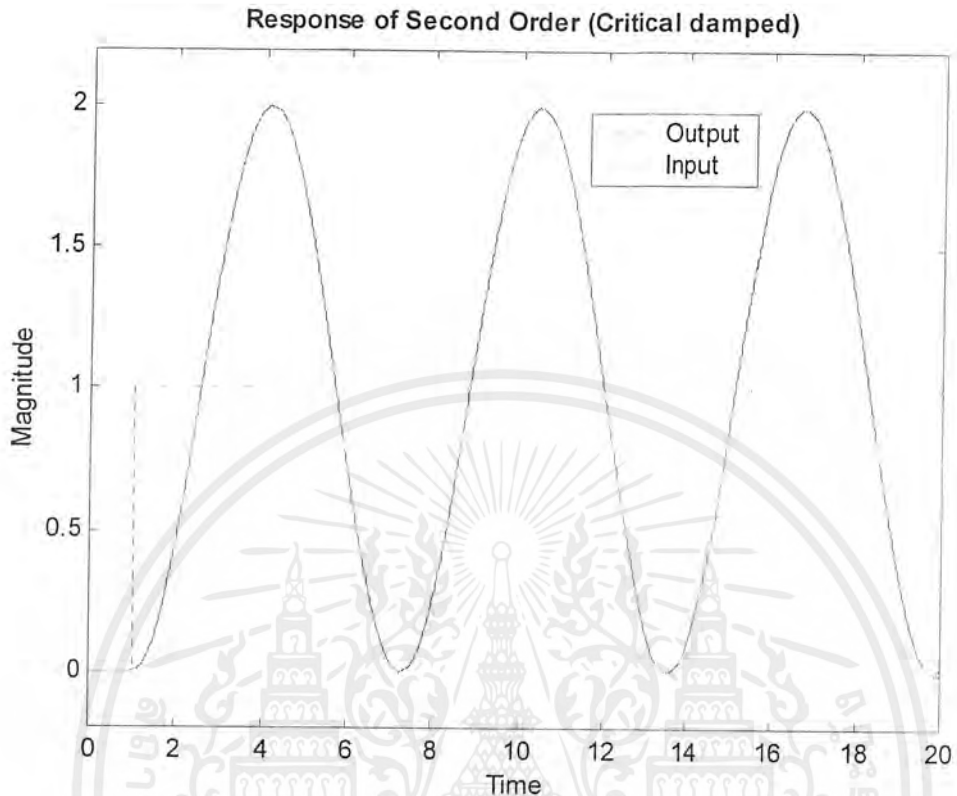
กรณีคริติคอล เด็ม



(CH 1 : Input, CH 2 : Output)

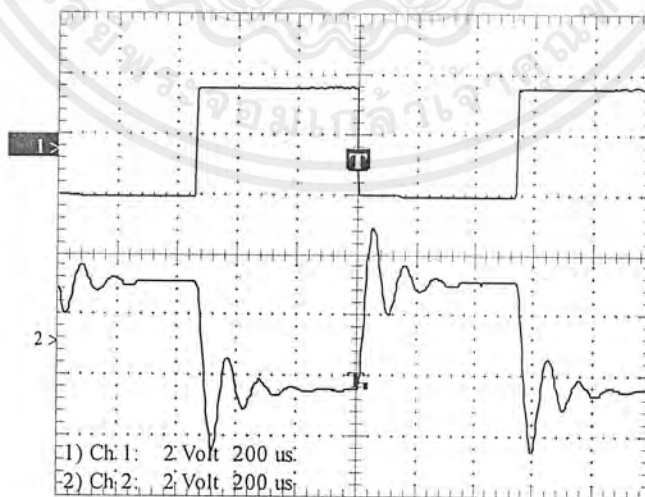
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (กรณีคริติคอล เด็ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (คริติคอล แด้ม)

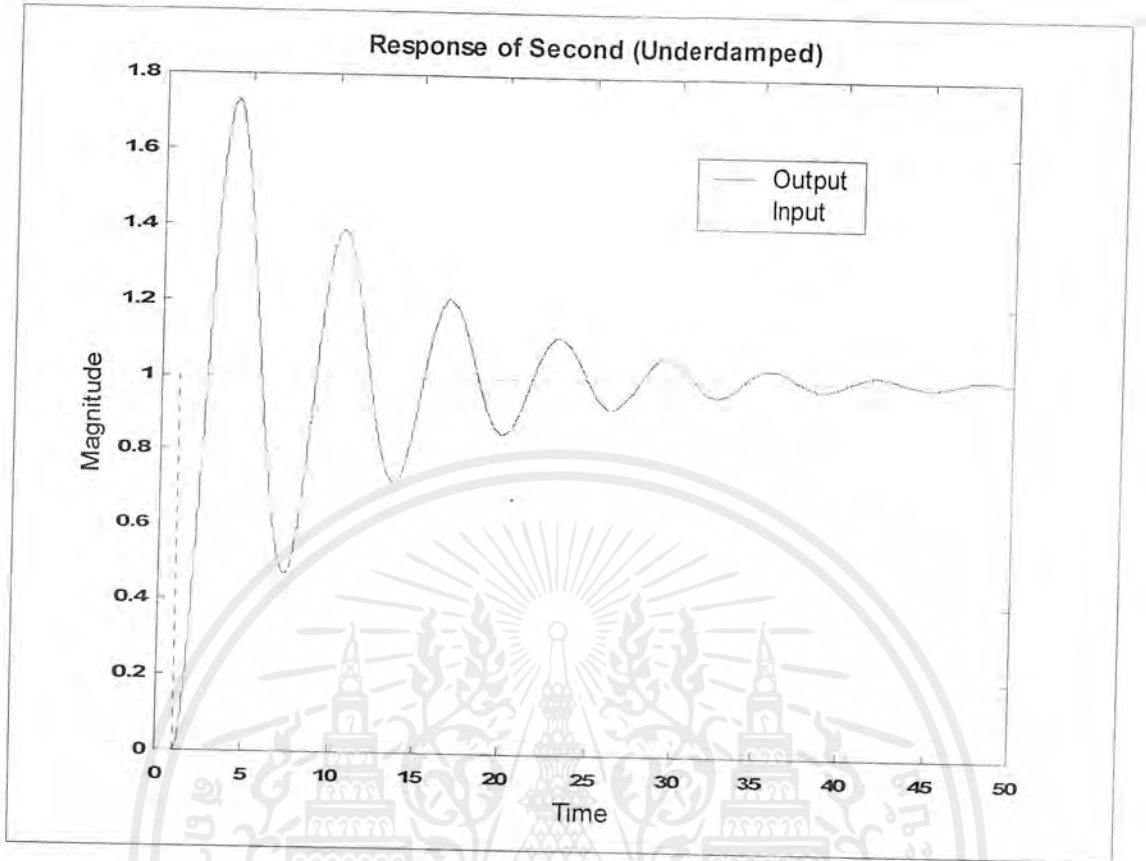
กรณีอันดับสอง



(CH 1 : Input , CH 2 : Output)

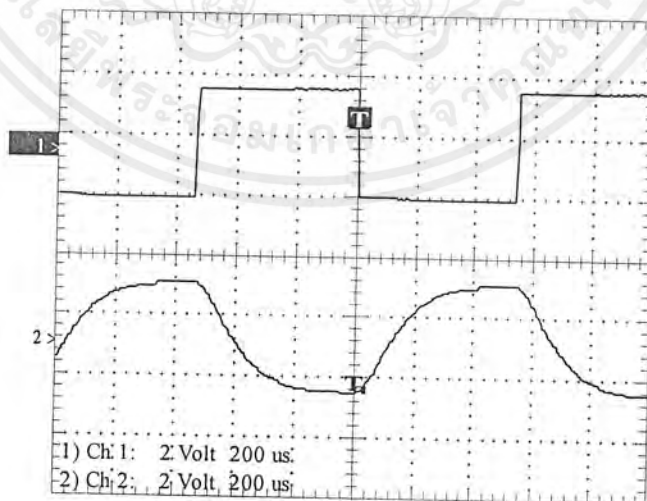
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (อันดับสอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (อินเตอร์เต็ม)

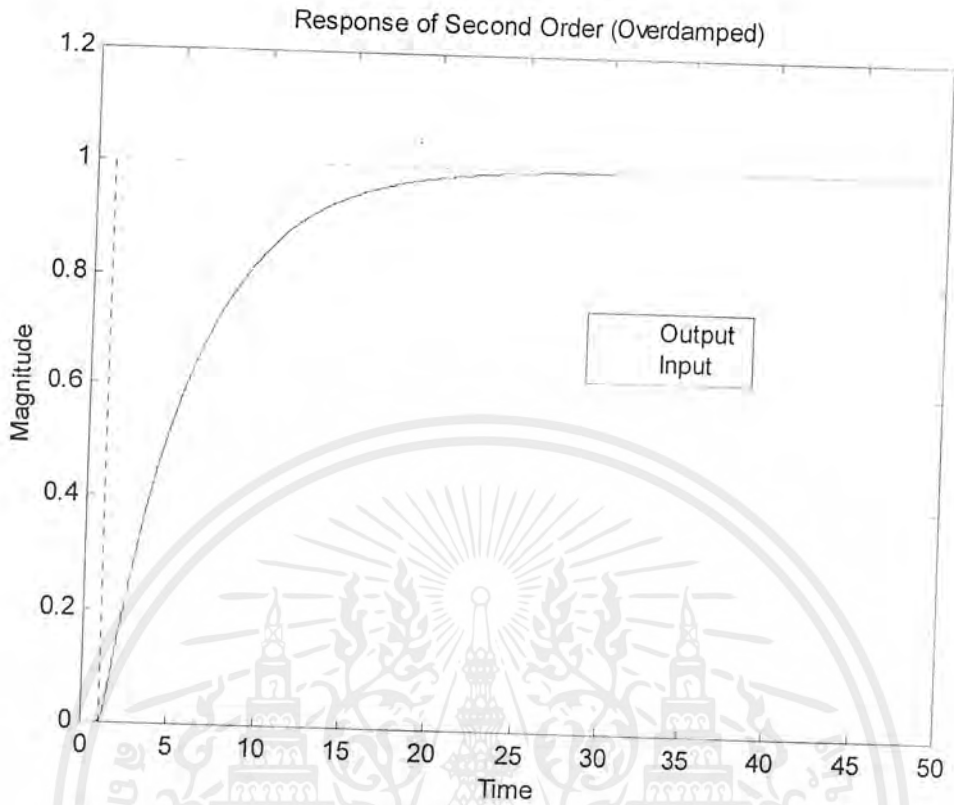
กรณีโอเวอร์เต็ม



(CH 1 : Input , CH 2 : Output)

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (โอเวอร์เต็ม)

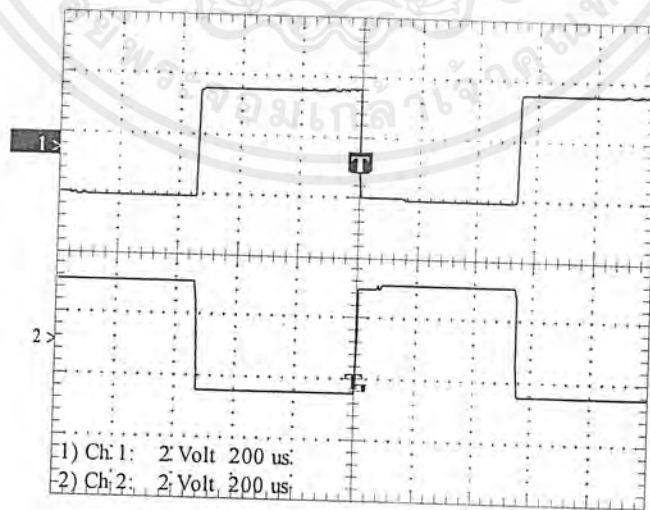
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงแบบจำลองผลตอบสนองของระบบอันดับสอง (โอเวอร์แด็ม)

4.3.6 ผลตอบสนองของอินเวอร์เตอร์

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -1$$



(CH 1 : Input , CH 2 : Output)

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลตอบสนองของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

จากการทดสอบวงจรทั้งหมดที่ใช้ในชุดทดลองปรากฏว่า สามารถทำงานได้ตามต้องการ และเมื่อนำวงจรบรรจุกล่องเป็นชุดทดลองและทำการต่อวงจรให้มีสมการคณิตศาสตร์ที่แทนระบบที่ศึกษาและดูผลทางออสซิลโลสโคปปรากฏว่าผลตอบสนองของระบบมีความผิดเพี้ยนไปจากทฤษฎีบ้าง

5.1 ปัญหาที่พบ

จากโครงการที่ทำมานั้น ได้พบปัญหาอยู่หลายส่วน ซึ่งสามารถพิจารณาและวิเคราะห์ถึงสาเหตุได้ดังต่อไปนี้

1. ปัญหาผลตอบสนองที่คาดเคลื่อนของชุดทดลองซึ่งเกิดจากอุปกรณ์และแสดงผลที่ไม่สามารถแสดงผลได้ละเอียดพอ
2. ปัญหาจากสัญญาณรบกวนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์

5.2 แนวทางแก้ไข

สามารถวางแนวทางแก้ไขได้ดังนี้

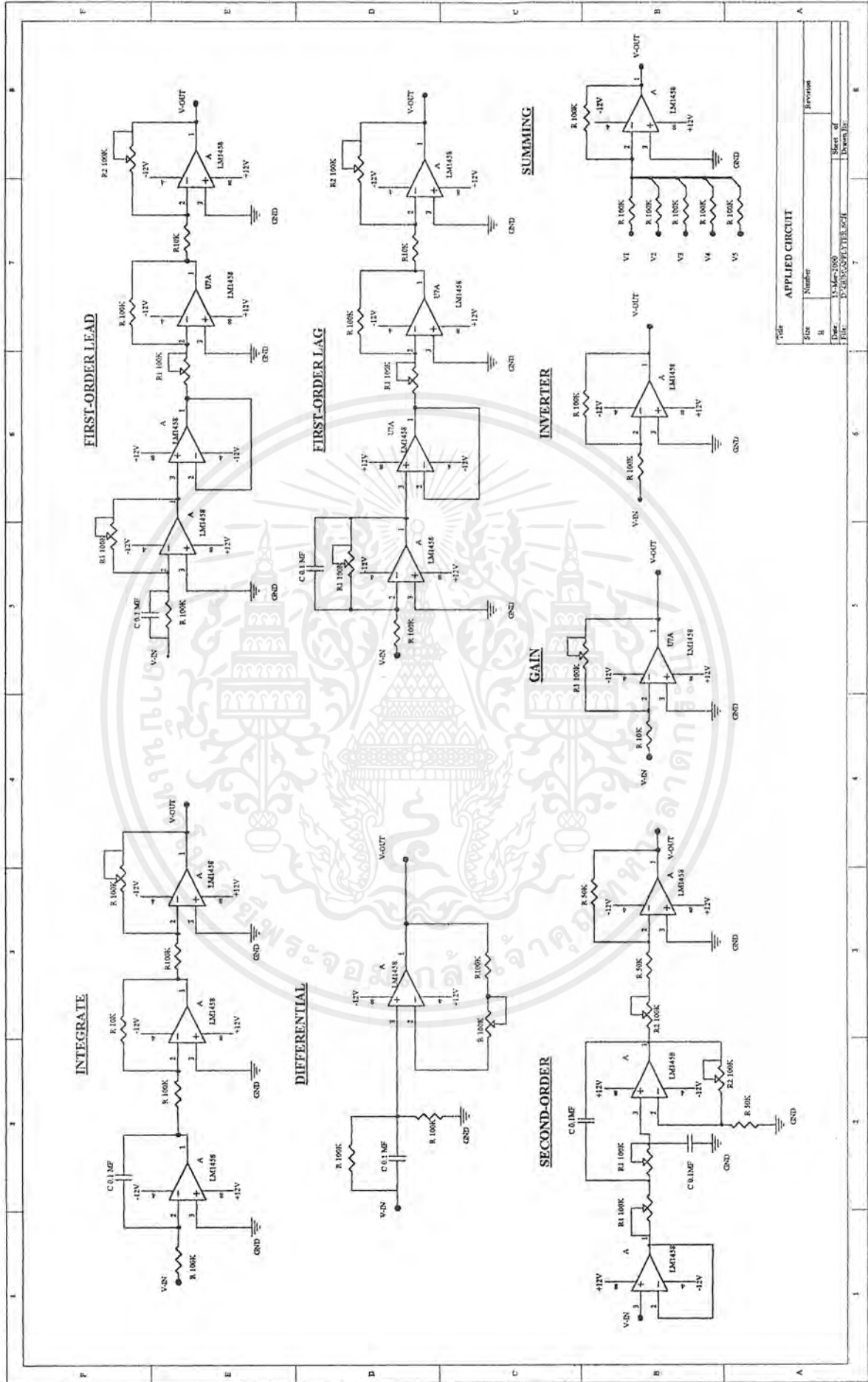
1. การแก้ปัญหาผลตอบสนองที่คาดเคลื่อนจากการวัดนั้น จะต้องเลือกใช้อุปกรณ์วัดและแสดงผลที่สามารถวัดค่าได้ละเอียด เช่น ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัลที่สามารถวัดค่าได้ละเอียดและยังสามารถเก็บผลจากการวัดค่าได้ด้วย
2. ใช้โปรแกรมแมทแล็บช่วยในการจำลองผลทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับผลที่ทดลองได้
3. การแก้ไขในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาใช้ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่มีความผิดพลาดน้อย

5.3 วิจารณ์

จากปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการทำโครงการชิ้นนี้ จะต้องทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุและทำการแก้ไข ทำให้ได้รับความรู้เพิ่มเติมมากมายทั้งทางด้านระบบควบคุมและอิเล็กทรอนิกส์ และยังได้เรียนรู้ถึงการทำงานร่วมกับผู้อื่น โดยคาดว่าโครงการชิ้นนี้จะสามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นไป เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการศึกษาระบบควบคุมให้ผู้ที่สนใจสามารถเข้าใจในเนื้อหาวิชาทางระบบควบคุมมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title	Number	Revision
APPLIED CIRCUIT		
Size		
Date		
File		
Sheet of		
Project No.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM1558/LM1458 Dual Operational Amplifier

General Description

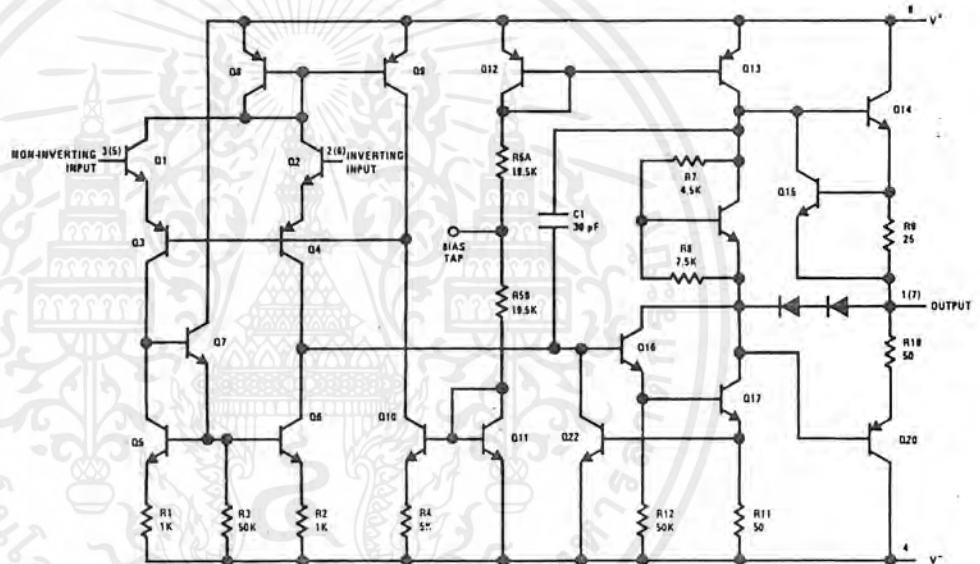
The LM1558 and the LM1458 are general purpose dual operational amplifiers. The two amplifiers share a common bias network and power supply leads. Otherwise, their operation is completely independent.

The LM1458 is identical to the LM1558 except that the LM1458 has its specifications guaranteed over the temperature range from 0°C to +70°C instead of -55°C to +125°C.

Features

- No frequency compensation required
- Short-circuit protection
- Wide common-mode and differential voltage ranges
- Low-power consumption
- 8-lead can and 8-lead mini DIP
- No latch up when input common mode range is exceeded

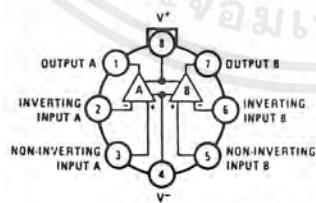
Schematic and Connection Diagrams



Note: Numbers in parentheses are pin numbers for amplifier B.

TL/H/7885-1

Metal Can Package

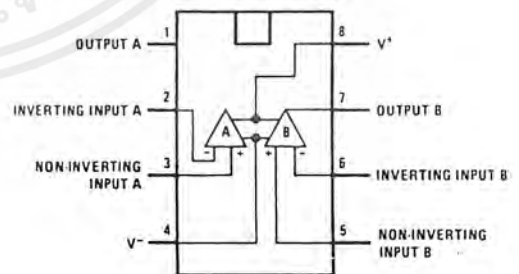


TL/H/7885-2

Top View

Order Number LM1558H,
LM1558H/883 or LM1458H
See NS Package Number H08C

Dual-In-Line Package



Top View

Order Number LM1558J, LM1558J/883, LM1458J, LM1458M or LM1458N
See NS Package Number J08A, M08A or N08E

TL/H/7885-3

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications. (Note 4)

Supply Voltage	
LM1558	±22V
LM1458	±18V
Power Dissipation (Note 1)	
LM1558H/LM1458H	500 mW
LM1458N	400 mW
Differential Input Voltage	±30V
Input Voltage (Note 2)	±15V
Output Short-Circuit Duration	Continuous

Operating Temperature Range	
LM1558	-55°C to +125°C
LM1458	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	260°C
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.	
ESD tolerance (Note 5)	300V

Electrical Characteristics (Note 3)

Parameter	Conditions	LM1558			LM1458			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}, R_S \leq 10\text{ k}\Omega$		1.0	5.0	1.0	6.0		mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		80	200	80	200		nA
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		200	500	200	500		nA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.3	1.0		0.3	1.0		M Ω
Supply Current Both Amplifiers	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 15\text{V}$		3.0	5.0	3.0	5.6		mA
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 15\text{V}$ $V_{OUT} = \pm 10\text{V}, R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	50	160		20	160		V/mV
Input Offset Voltage	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			6.0			7.5	mV
Input Offset Current				500			300	nA
Input Bias Current				1.5			0.8	μA
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 15\text{V}, V_{OUT} = \pm 10\text{V}$ $R_L \geq \text{k}\Omega$	25			15			V/mV
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 15\text{V}, R_L = 10\text{ k}\Omega$ $R_L = 2\text{ k}\Omega$	±12	±14		±12	±14		V
Input Voltage Range	$V_S = \pm 15\text{V}$	±12			±12			V
Common Mode Rejection Ratio	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	70	90		70	90		dB
Supply Voltage Rejection Ratio	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	77	96		77	96		dB

Note 1: The maximum junction temperature of the LM1558 is 150°C, while that of the LM1458 is 100°C. For operating at elevated temperatures, devices in the HO8 package must be derated based on a thermal resistance of 150°C/W, junction to ambient or 20°C/W, junction to case. For the DIP the device must be derated based on a thermal resistance of 187°C/W, junction to ambient.

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

Note 3: These specifications apply for $V_S = \pm 15\text{V}$ and $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq 125^\circ\text{C}$, unless otherwise specified. With the LM1458, however, all specifications are limited to $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 70^\circ\text{C}$ and $V_S = \pm 15\text{V}$.

Note 4: Refer to RETS 1558V for LM1558J and LM1558H military specifications.

Note 5: Human body model, 1.5 k Ω in series with 100 pF.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM741 Operational Amplifier

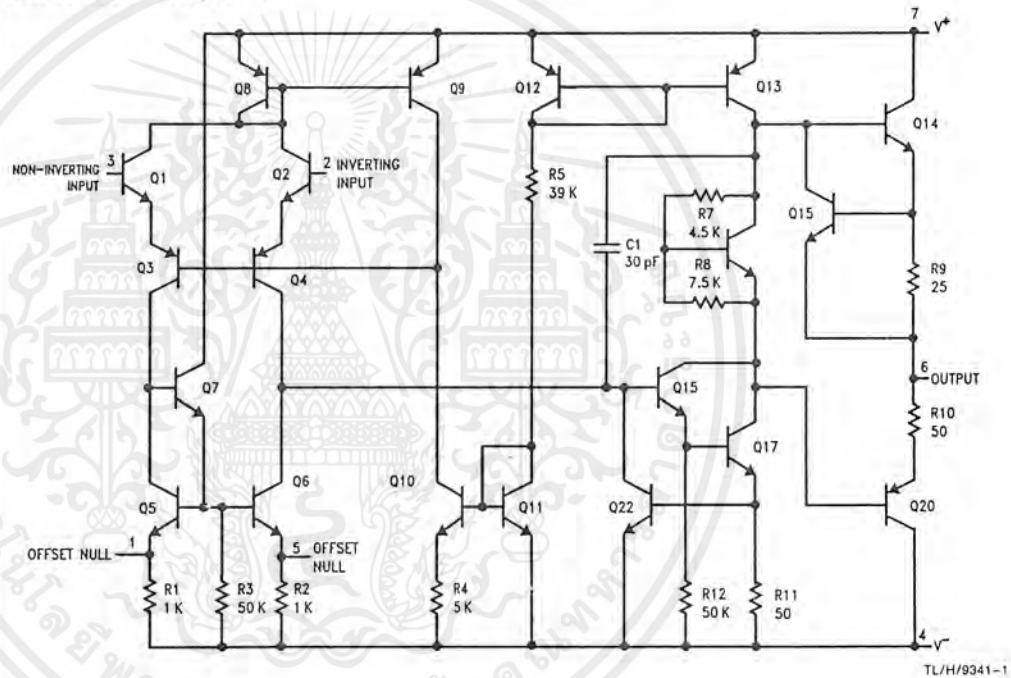
General Description

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

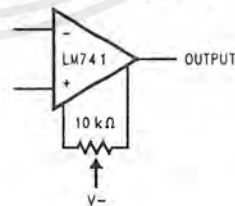
output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

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

Schematic Diagram



Offset Nulling Circuit



Absolute Maximum Ratings

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

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

Electrical Characteristics (Note 3)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics (Note 3) (Continued)

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

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

Thermal Resistance	CerDip (J)	DIP (N)	HO8 (H)	SO-8 (M)
θ_{JA} (Junction to Ambient)	100°C/W	100°C/W	170°C/W	195°C/W
θ_{JC} (Junction to Case)	N/A	N/A	25°C/W	N/A

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

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

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

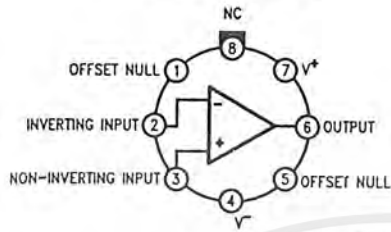
Note 5: For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.

Note 6: Human body model, 1.5 k Ω in series with 100 pF.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connection Diagrams

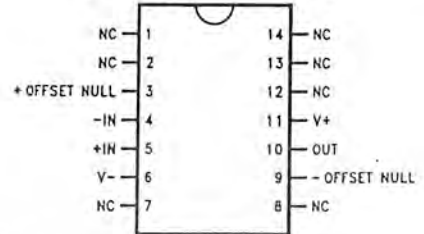
Metal Can Package



TL/H/9341-2

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

Ceramic Dual-In-Line Package



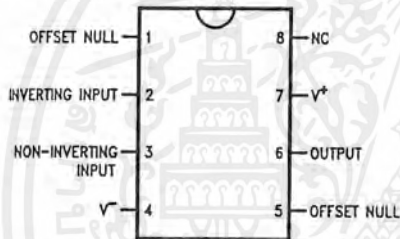
TL/H/9341-5

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

*also available per JM38510/10101

**also available per JM38510/10102

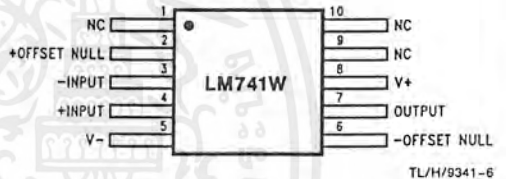
Dual-In-Line or S.O. Package



TL/H/9341-3

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

Ceramic Flatpak



TL/H/9341-6

Order Number LM741W/883
See NS Package Number W10A

*LM741H is available per JM38510/10101

บรรณานุกรม

Friedrich Frohr and Fritz Ottenburger, “**Introduction to Electronic Control Engineering**”, original ed, Siemen Aktiengesellschaft Heyden & Son Ltd.,North Island,1981

Katsuhiko Ogata, “**Modern Control Engineering**”2nd ed., Prentice-Hal International Editions,New jersey,1990

กิตติ ตีรเศรษฐ , “ การวิเคราะห์ระบบควบคุมเชิงเส้น ” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2525



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากความอนุเคราะห์จากบุคคลต่าง ๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร. วันชัย ธีรรัฐจา อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาจนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และที่จะลืมเสียมิได้ คือ เพื่อน ๆ ที่ได้คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้