สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อนาลอกคอมพิวเตอร์

ANALOG COMPUTER

โดย

นายกิตติพงศ์ อินวอ

นางสาวนิรินธร เสรีพิทักษ์

นางสาวอังศุมาลี เถลิงศรี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 33930

วัน, เดือน, ปี 20 ก.ย. 2542

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนาลอกคอมพิวเตอร์

ANALOG COMPUTER

โดย

นายกิตติพงศ์ อินวอ รหัส 38014026

นางสาวนิรินธร เสรีพิทักษ์ รหัส 38014247

นางสาวอังศุมาลี เถลิงศรี รหัส 38014640

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. วันชัย ริ้วรุจา

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อนาลอกคอมพิวเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติพงค์ อินวอ รหัส 38014026
2. นางสาวนิรินธร เสรีพิทักษ์ รหัส 38014247
3. นางสาวอังศุมาลี เถลิงศรี รหัส 38014640

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(.....รศ.ดร.วันชัย ริ้วรุจา.....)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนาลอกคอมพิวเตอร์

ANALOG COMPUTER

นายกิตติพงค์ อินวอ รหัส 38014026

นางสาวนิรินธร เสรีพิทักษ์ รหัส 38014247

นางสาวอังศุมาลี เถลิงศรี รหัส 38014640

โครงงานได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมที่จะทำการสอบได้

.....

(รศ.ดร.วันชัย ริ้วรุจา)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนาลอกคอมพิวเตอร์

(ANALOG COMPUTER)

นายกิตติพงศ์ อินวอ
นางสาวนิรินธร เสรีพิทักษ์
นางสาวอังศุมาลี เถลิงศรี
รศ.ดร. วันชัย ริ้วรุจา อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการแก้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสอง โดยมีการทำสเกลเวลา สเกลขนาด เพื่อให้สามารถแสดงผลตอบสนองที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรของปัญหาที่ต้องการทราบค่าจากหน่วยแสดงผล นอกจากนี้ชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ยังสามารถแสดงผลตอบสนองของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสามและสี่ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของระบบที่มีความสัมพันธ์กับค่ารากสมการ

Abstract

This thesis is presented the analog computer that can solve the first and second order differential equation by time and magnitude scaling for obtaining the relationship between the responses and problem variable that want to know from the display unit. In addition, the analog computer can perform the responses of third and forth order differential equation for analyzing the relationship between system characteristic and roots of equation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
สารบัญ	II
สารบัญรูปภาพ	IV
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตโครงงาน	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงงาน	2
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานของโครงงาน	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานของอนาลอกคอมพิวเตอร์	3
2.1 วงจรพื้นฐานของอนาลอกคอมพิวเตอร์	3
2.2 สเกลเวลา	7
2.3 สเกลขนาด	8
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบควบคุม	9
3.1 การตอบสนองต่อเวลาของระบบ	9
3.2 ระนาบเอส (s - plane)	11
3.3 ระบบอันดับหนึ่ง	13
3.4 ระบบอันดับสอง	16
บทที่ 4 การออกแบบและผลการทดลอง	22
4.1 การออกแบบวงจรพื้นฐาน	22
4.2 การหาค่าไทม์สเกลสิ่งแฟคเตอร์	26
4.3 การหาตัวคูณของระบบ	31
4.4 การทำสเกลขนาด	36
บทที่ 5 ชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์	39
5.1 ลักษณะชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า 5.2 การใช้งานชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ 41
5.3 ตัวอย่างการใช้งานชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ 43
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ 53
กิตติกรรมประกาศ
บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงวงจรขยายแบบกลับเฟส 3

รูปที่ 2.2 แสดงวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส 4

รูปที่ 2.3 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณแบบปรับค่าได้ 5

รูปที่ 2.4 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ 6

รูปที่ 3.1 แสดงสัญญาณสเต็ป 9

รูปที่ 3.2 แสดงสัญญาณแรมป์ 10

รูปที่ 3.3 แสดงสัญญาณอิมพัลส์ 10

รูปที่ 3.4 แสดงระบบอันดับหนึ่ง 13

รูปที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองต่อยูนิตสเต็ปของระบบอันดับหนึ่ง 15

รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดค่าของ β 20

รูปที่ 4.1 แสดงวงจรกลับเฟสสัญญาณ 22

รูปที่ 4.2 แสดงสัญลักษณ์วงจรกลับเฟส 22

รูปที่ 4.3 แสดงวงจรรวมสัญญาณหลายอินพุท 23

รูปที่ 4.4 แสดงสัญลักษณ์ของวงจรรวมสัญญาณ 23

รูปที่ 4.5 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณ 24

รูปที่ 4.6 แสดงสัญลักษณ์วงจรลดทอนสัญญาณ 24

รูปที่ 4.7 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ 25

รูปที่ 4.8 แสดงผลการอินทิเกรต 25

รูปที่ 4.9 แสดงสัญลักษณ์วงจรอินทิเกรเตอร์ 26

รูปที่ 4.10 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับหนึ่งของอนาลอกคอมพิวเตอร์ 34

รูปที่ 4.11 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับสองของอนาลอกคอมพิวเตอร์ 35

รูปที่ 4.12 แสดงไดอะแกรมของระบบโดยไม่ใช้ค่าอัตราขยาย 38

รูปที่ 4.13 รูปของระบบ $\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.8}{s^2 + 0.32s + 0.8}$ ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB 38

รูปที่ 5.1 แสดงด้านหน้าของชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ 39

รูปที่ 5.2 แสดงด้านข้างของชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 5.3 แสดงวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง 40
รูปที่ 5.4 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม 40
รูปที่ 5.5 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับหนึ่ง 41
รูปที่ 5.6 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับสอง 41
รูปที่ 5.7 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับสาม 42
รูปที่ 5.8 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับสี่ 42
รูปที่ 5.9 แสดงไดอะแกรมของสมการ $\frac{dy(t)}{dt} = -\sqrt{2}y(t) + \sqrt{2}x(t)$ 43
รูปที่ 5.10 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{dy(t)}{dt} = -\sqrt{2}y(t) + \sqrt{2}x(t)$ ที่ได้จาก
อนาลอกคอมพิวเตอร์ 44
รูปที่ 5.11 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{dy(t)}{dt} = -\sqrt{2}y(t) + \sqrt{2}x(t)$ ที่ได้จาก
การใช้โปรแกรม MATLAB 44
รูปที่ 5.12 แสดงไดอะแกรมของระบบ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -6\frac{dy(t)}{dt} - 25y(t) + 25x(t)$ 46
รูปที่ 5.13 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -6\frac{dy(t)}{dt} - 25y(t) + 25x(t)$ ที่ได้จาก
อนาลอกคอมพิวเตอร์ 46
รูปที่ 5.14 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -6\frac{dy(t)}{dt} - 25y(t) + 25x(t)$ ที่ได้จาก
การใช้โปรแกรม MATLAB 47
รูปที่ 5.15 แสดงไดอะแกรมของระบบ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -0.12\frac{dy(t)}{dt} - 0.04y(t) + 0.04x(t)$ 48
รูปที่ 5.16 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -0.12\frac{dy(t)}{dt} - 0.04y(t) + 0.04x(t)$ 49
รูปที่ 5.17 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -0.12\frac{dy(t)}{dt} - 0.04y(t) + 0.08x(t)$ จาก
โปรแกรม MATLAB 49
รูปที่ 5.18ก. แสดงผลตอบสนองของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสามที่ได้จาก
อนาลอกคอมพิวเตอร์ 50
รูปที่ 5.18ข. แสดงผลตอบสนองของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสามที่ได้จาก
อนาลอกคอมพิวเตอร์ 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 5.18ค. แสดงผลตอบสนองของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสามที่ได้จากอนาลอกคอมพิวเตอร์ 51

รูปที่ 5.18ง. แสดงผลตอบสนองของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสามที่ได้จากอนาลอกคอมพิวเตอร์ 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน

อนาลอกคอมพิวเตอร์ และดิจิตอลคอมพิวเตอร์ทั้งสองชนิดใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่พบในงานวิศวกรรม เช่น การออกแบบ การวิจัย และการพัฒนาอื่น ๆ ในปัจจุบันนี้พบว่าอนาลอกคอมพิวเตอร์กลายเป็นสิ่งที่หลายคนไม่รู้จัก และไม่คิดว่าอนาลอกคอมพิวเตอร์ยังคงมีใช้อยู่ในงานควบคุมกระบวนการทางวิศวกรรมโครงงานนี้จึงมุ่งเน้นให้เห็นความสำคัญในการนำอนาลอกคอมพิวเตอร์มาใช้ในการแก้ปัญหา และวิเคราะห์ระบบทางวิศวกรรมที่สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นได้

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางอิเล็กทรอนิคส์ในการสร้าง และออกแบบอนาลอกคอมพิวเตอร์
- เพื่อใช้ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับระบบควบคุม
- เพื่อศึกษาและใช้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอนาลอกคอมพิวเตอร์
- เพื่อศึกษาผลตอบสนองของระบบควบคุมจากรากสมการ
- เพื่อแสดงการหาผลตอบสนองของสมการเชิงอนุพันธ์

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

- สามารถสร้างอนาลอกคอมพิวเตอร์ ที่สามารถแสดงคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ได้ 4 อันดับ
- สามารถแสดงคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง โดยมีการทำสเกลเวลาและสเกลขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงงาน

- มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีของออปแอมป์
- มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง ถึง ระบบอันดับสี่
- มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีทางระบบควบคุมมากขึ้น
- เข้าใจหลักการทำงานของอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลเวลาและขนาด
- เข้าใจในการทำงานที่เกี่ยวกับการเก็บข้อมูลและการทำงานวิจัย

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานของโครงงาน

- ทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของออปแอมป์
- ศึกษาการทำงานพื้นฐานของตัวอนาลอกคอมพิวเตอร์
- ทำการออกแบบ ทดลองวงจรพื้นฐานที่ใช้ในอนาลอกคอมพิวเตอร์ แล้วทำการเก็บข้อมูล
- ทำการทดลองนำวงจรพื้นฐานมาจำลองเป็นอนาลอกคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์และหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการแสดงคำตอบของอนาลอกคอมพิวเตอร์แล้วทำการเก็บข้อมูล
- นำสมการเชิงอนุพันธ์ต่าง ๆ มาหาคำตอบโดยอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น
- เก็บข้อมูล และสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ความรู้เบื้องต้นของอนาลอกคอมพิวเตอร์

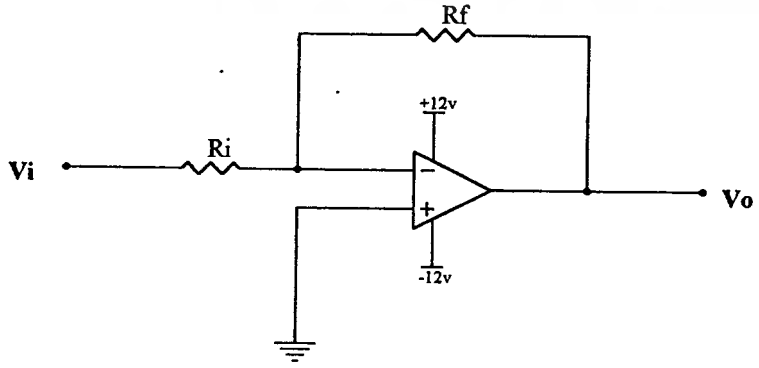
อนาลอกคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือทางอิเล็คทรอนิคส์ชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และเลียนแบบพฤติกรรมของระบบที่สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ การแก้ปัญหาของอนาลอกคอมพิวเตอร์ทำได้โดยการจัดสมการของวงจรพื้นฐานอนาลอกคอมพิวเตอร์ให้เหมือนกับสมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหา และผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของปริมาณทางไฟฟ้าที่แทนปริมาณทางฟิสิกส์ เช่น ความเร็ว ความเร่ง แรง อุณหภูมิ เป็นต้น

อนาลอกคอมพิวเตอร์จะแสดงคำตอบเป็นค่าต่อเนื่องของเวลา โดยความสัมพันธ์ระหว่างเวลาของอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่ใช้กับตัวแปรของสมการที่นำมาหาคำตอบโดยช่วงเวลาของอนาลอกคอมพิวเตอร์จะสามารถแสดงให้เห็นคำตอบของสมการซึ่งจะต้องมีการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาที่เรียกว่า การสเกลเวลา (time scaling) และมีการปรับเปลี่ยนขนาดเรียกว่า การสเกลขนาด (magnitude scale)

2.1 วงจรพื้นฐานของอนาลอกคอมพิวเตอร์

2.1.1วงจรขยายแบบกลับเฟส

จากรูปที่ 2.1 เป็นวงจรขยายสัญญาณที่สามารถขยายสัญญาณได้ทั้ง AC และ DC ที่ประกอบด้วยความต้านทานทางด้านอินพุท (Ri) และความต้านทานป้อนกลับ (Rf) ที่ต่ออยู่ระหว่างขาลบและขาเอาท์พุทของออปแอมป์ โดยสัญญาณที่ออกมาจากวงจร (Vo) จะกลับเฟสกับสัญญาณอินพุท(Vi)เสมอ ซึ่งอัตราขยายของวงจรมีความสัมพันธ์กับขนาดของความต้านทานทางด้านอินพุท (Ri) และความต้านทานป้อนกลับ(Rf) ดังสมการ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรขยายแบบกลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

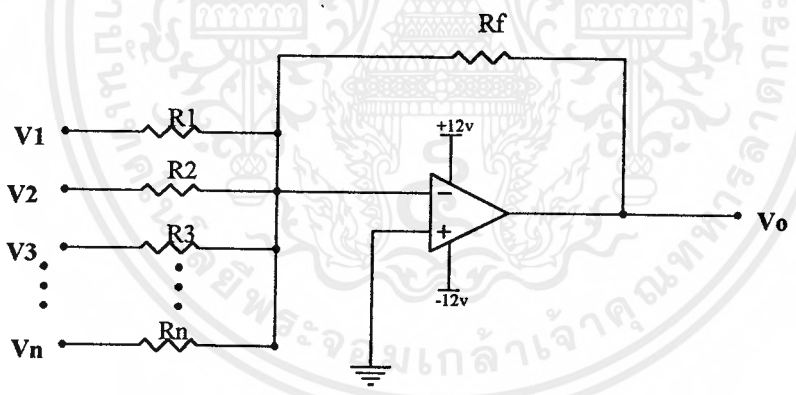
$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{-Rf}{Ri} \qquad 2.1$$

อัตราขยายของวงจรขยายแบบกลับเฟสมีลักษณะดังนี้

- มากกว่า 1 เมื่อ ความต้านทานป้อนกลับ มากกว่า ความต้านทานอินพุท
- น้อยกว่า 1 เมื่อ ความต้านทานป้อนกลับ น้อยกว่า ความต้านทานอินพุท
- เท่ากับ 1 เมื่อ ความต้านทานป้อนกลับ เท่ากับ ความต้านทานอินพุท

2.1.2 วงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส

จากรูปที่ 2.2 เป็นวงจรรวมสัญญาณทางด้านอินพุท สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จะกลับเฟสกับผลรวมของสัญญาณทางด้านอินพุท (V1 , V2 , V3 , ... , Vn) เสมอ โดยอัตราขยายของสัญญาณอินพุทแต่ละตัวจะมีความสัมพันธ์ดังสมการ 2.2



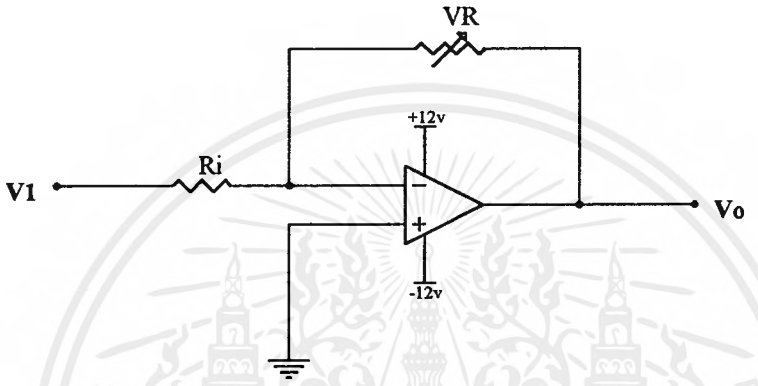
รูปที่ 2.2 แสดงวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส

$$Vo = -\left(\frac{Rf}{R1}V1 + \frac{Rf}{R2}V2 + \frac{Rf}{R3}V3 + \ldots\ldots + \frac{Rf}{Rn}Vn\right) \qquad 2.2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 วงจรลดทอนสัญญาณแบบปรับค่าได้

จากรูปที่ 2.3 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณแบบปรับค่าได้ ที่ประกอบด้วยความต้านทานทางด้านอินพุท (Ri) และความต้านทานแบบปรับค่าได้ (VR) สัญญาณเอาท์พุท (Vo) ที่ออกมาจะกลับเฟสกับสัญญาณทางด้านอินพุท (Vi) ซึ่งอัตราส่วนการลดทอนจะเป็นดังสมการ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณแบบปรับค่าได้

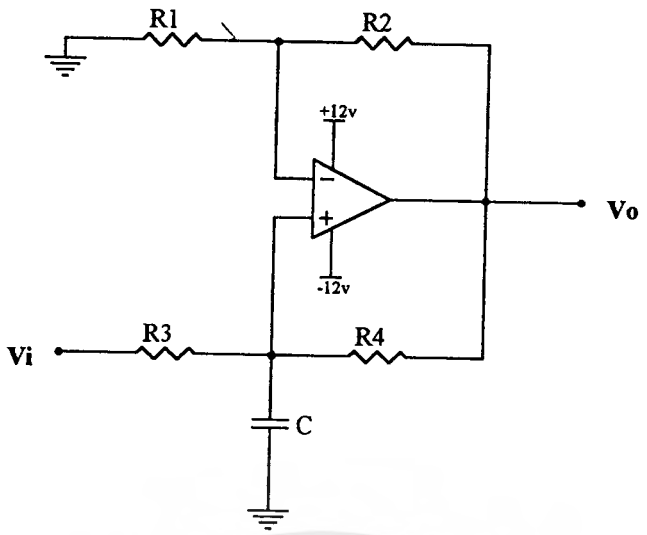
$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{-VR}{Ri} \qquad 2.3$$

อัตราการลดทอนสัญญาณจะขึ้นกับค่าของความต้านทานปรับค่าได้ (VR) และความต้านทานด้านอินพุท(Ri) โดยค่าความต้านทานปรับค่าได้(VR) นั้นต้องมีค่าสูงสุดเท่ากับ ความต้านทานทางด้านอินพุท (Ri) จะทำให้สัญญาณที่ถูกลดทอน มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1

2.1.4 วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรอินทิเกรเตอร์ถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอนาลอกคอมพิวเตอร์ จากรูปที่ 2.4 เป็นวงจรอินทิเกรเตอร์แบบแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส ชนิดกราวด์โหลด เมื่อโหลดของวงจรคือตัวเก็บประจุ (C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์

โดยวงจรอินทิเกรเตอร์ดังรูปที่ 2.4 มีคุณสมบัติที่ดีคือสามารถเลือกลักษณะสัญญาณของเอาท์พุท (Vo) ที่ออกมาได้ คือ

- เมื่อจ่ายสัญญาณเข้าทางด้านความต้านทาน R1 ที่ต่อเข้ากับขาอินเวอร์ติงของออปแอมป์ จะมีผลทำให้สัญญาณเอาท์พุทกลับเฟสกับสัญญาณอินพุท
- เมื่อจ่ายสัญญาณเข้าทางด้านความต้านทาน R3 ที่ต่อเข้ากับขานอนอินเวอร์ติงของออปแอมป์ จะมีผลให้สัญญาณเอาท์พุทมีเฟสเดียวกับกับสัญญาณอินพุท

สมการที่ 2.4 คือความสัมพันธ์ของบาลานซ์บริดจ์ ที่เป็นเงื่อนไขของตัวแปลงแรงดันเป็นกระแส ชนิดกราวด์โหลด

$$\frac{R4}{R3} = \frac{R2}{R1} \qquad 2.4$$

เมื่อ $R1 = R3$, $R4 = R2$

นอกจากนี้แล้ว สมการที่ 2.5 จะเป็นสมการที่ใช้ช่วยกำหนดค่าความต้านทาน ซึ่งจะเห็นว่าควรกำหนดให้ค่าความต้านทาน R2 มีค่าน้อยกว่า R1

$$|V_L| < \left(\frac{R1}{R1 + R2}\right) V_{SAT} \qquad 2.5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นรูปที่ 2.4 จึงมีชื่อว่าเดบูอินทิเกรเตอร์ (Deboo integrator) ซึ่งเป็นแบบนอนอินเวอร์ติ้งอินทิเกรเตอร์ โดยมีความสัมพันธ์ของวงจรดังสมการ 2.7

$$Vo(t) = \left(\frac{1 + \frac{R2}{R1}}{R1 * C} \right) \int Vi(t)dt \qquad 2.7$$

2.2 สเกลเวลา

เมื่อนำอนาลอกคอมพิวเตอร์มาใช้หาผลลัพธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาถึงคือ การสเกลเวลา เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้สมการของอนาลอกคอมพิวเตอร์ทั้งหมด ต้องแสดงออกมาให้เห็นภายในช่วงเวลาของอนาลอกคอมพิวเตอร์ (τ) ดังนั้น เมื่อปัญหาที่นำมาคำนวณหาผลลัพธ์มีช่วงเวลาไม่เท่ากัน จึงต้องมีการปรับสเกลเวลาของปัญหาให้เข้ากับช่วงเวลาของอนาลอกคอมพิวเตอร์

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาของปัญหาที่แสดงผลลัพธ์ทั้งหมดกับช่วงเวลาที่ใช้แสดงผลของอนาลอกคอมพิวเตอร์เป็นไปตามสมการ 2.8

$$\tau = \alpha t \qquad 2.8$$

เมื่อ τ คือ ช่วงเวลาที่อนาลอกคอมพิวเตอร์ใช้แสดงผล

t คือ ช่วงเวลาของปัญหา

α คือ ไทม์สเกลแฟกเตอร์

จากสมการที่ 2.8 จะได้ว่า

เมื่อ $\alpha > 1$ แสดงว่าช่วงเวลาของอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่แสดงผลลัพธ์ยาวกว่าช่วงเวลาของปัญหา

เมื่อ $\alpha < 1$ แสดงว่าช่วงเวลาของอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่แสดงผลลัพธ์สั้นกว่าช่วงเวลาของปัญหา

ดังนั้นจะต้องทำการจัดรูปสมการของปัญหา โดยการแทนค่า t ที่เป็นตัวแปรอิสระของปัญหาด้วยเวลาของอนาลอกคอมพิวเตอร์ จากความสัมพันธ์ในสมการ 2.8 สมการที่ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเกลเวลาแล้วจะมีตัวแปรที่เปลี่ยนตามเวลาอยู่ในรูปตัวแปรอิสระตัวใหม่ และเมื่อมีการสเกลเวลาแล้ว ต้องมีการทำสเกลขนาดด้วย ผลลัพธ์ของแต่ละปัญหาจะมีช่วงเวลาที่ต่างกันหมายความว่าแต่ละปัญหามีสเกลเวลาและไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์เป็นของตัวเอง เมื่อทำการสเกลเวลาของปัญหาไม่ว่าจะเป็นการขยายสเกลเวลา หรือลดสเกลเวลา เพื่อให้อนาลอกคอมพิวเตอร์แสดงผลลัพธ์จากการแก้สมการได้หมด จะมีผลทำให้ไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ เปลี่ยนตามการสเกลเวลาโดยมีสัดส่วนตามการสเกลเวลาเช่น เมื่อขยายสเกลเวลา 10 เท่า ไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์จะเพิ่มเป็น 10 เท่าด้วย เป็นต้น

2.3 สเกลขนาด

สเกลแฟกเตอร์ จะแสดงบทบาทสำคัญในการคำนวณขนาดของอนาลอกคอมพิวเตอร์ เมื่อขนาดของผลลัพธ์ของปัญหานั้นสามารถมีค่าต่าง ๆ ได้ไม่จำกัด แต่ขนาดของผลลัพธ์ที่อนาลอกคอมพิวเตอร์จะถูกจำกัดอยู่ในช่วง ± 100 โวลท์ จำเป็นต้องทำการสเกลขนาดในสมการของปัญหาให้สามารถแสดงโดยอนาลอกคอมพิวเตอร์ได้

สเกลแฟกเตอร์สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าสูงสุด ของอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่สามารถแสดงออกมาได้ต่อค่าประมาณสูงสุดของตัวแปรปัญหาที่เกิดขึ้นดังสมการ 2.9

$$S = \frac{100}{Xm} \qquad 2.9$$

เมื่อ S เป็น สเกลแฟกเตอร์

Xm เป็น ค่าประมาณสูงสุดของตัวแปรปัญหา

ถ้าค่าสูงสุดของตัวแปรทางฟิสิกส์ถูกประมาณค่าไว้สูงเกิน จะทำให้สเกลแฟกเตอร์มีค่าน้อยเกินไปมีผลต่อความถูกต้องของอนาลอกคอมพิวเตอร์ แต่ถ้าค่าสูงสุดของตัวแปรถูกกำหนดให้ต่ำเกินไป จะทำให้ผลลัพธ์ที่ออกมามีขนาดเกินค่าที่จำกัดเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีพื้นฐานทางระบบควบคุม

3.1 การตอบสนองต่อเวลาของระบบ

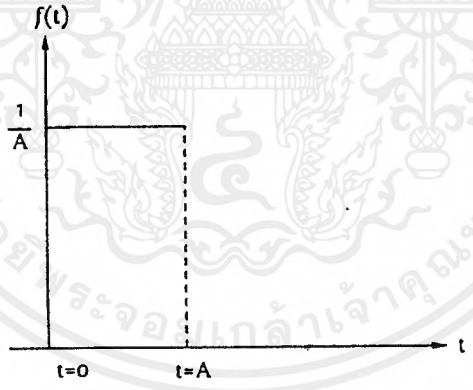
การตอบสนองต่อเวลาของระบบหนึ่ง ๆ จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

- การตอบสนองช่วงทรานเซียนท์ (transient response) คือการตอบสนองซึ่งเริ่มต้นจากสภาวะเริ่มต้นจนถึงสภาวะสุดท้าย

- การตอบสนองที่สภาวะคงตัว (steady state response) คือพฤติกรรมของเอาท์พุทของระบบที่เวลาเข้าสู่อนันต์

สัญญาณมาตรฐานที่ใช้เป็นอินพุทในการทดสอบผลตอบสนองของระบบมี 3 แบบดังนี้

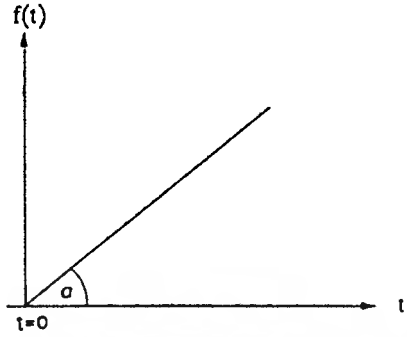
- สัญญาณสเต็ป เป็นสัญญาณที่ง่ายต่อการวิเคราะห์มีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงสัญญาณสเต็ป

- สัญญาณแรมป์ เป็นสัญญาณที่ใช้กับอินพุทที่ต้องการลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องแบบเชิงเส้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงสัญญาณแรมป์

-สัญญาณอิมพัลส์ คือพัลส์ที่มีความกว้างเป็นศูนย์และเพื่อจะให้มีเวจเป็นหนึ่งจึงมีขนาดเป็นอนันต์ ใช้กับการตอบสนองที่ต้องตอบสนองต่ออินพุทที่มีลักษณะเป็นสัญญาณกระตุ้น มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 แสดงสัญญาณอิมพัลส์

จะได้ว่า

การตอบสนองทั้งหมด = การตอบสนองที่สภาวะคงตัว + การตอบสนองช่วงทรานเซียนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ระนาบเอส (S - plane)

3.2.1 สมการคุณลักษณะ

พิจาณาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันดังต่อไปนี้

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{output}{input} = G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \qquad 3.1$$

เมื่อ N(s) คือ เศษของทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

D(s) คือ ส่วนของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

จากสมการ 3.1 จะได้ว่า

$$Y(s)D(s) = U(s)N(s) \qquad 3.2$$

เมื่ออินพุทของระบบเป็นศูนย์ (U(s) = 0) จะทำให้การตอบสนองของระบบมีแต่ผลของการตอบสนองช่วงทรานเซียนท์ เนื่องจากผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวเป็นศูนย์

ดังนั้นจะสามารถหาผลตอบสนองช่วงทรานเซียนท์ของระบบใดใดได้จากการให้อินพุทของระบบเป็นศูนย์จะได้ว่า

$$Y(s)D(s) = 0 \qquad 3.3$$

เนื่องจากเอาท์พุท Y(s) ต้องไม่เป็นศูนย์ค่าของผลตอบสนองช่วงทรานเซียนท์จึงถูกกำหนดโดยสมการ 3.4

$$D(s) = 0 \qquad 3.4$$

โดย D(s) คือส่วนของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันวงปิดที่เป็นศูนย์เรียกสมการที่ 3.4 ว่าสมการคุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 โพล และซีโร่ของระบบ

ค่ารากของสมการคุณลักษณะคือค่าของ s ที่ทำให้ส่วนของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันเป็นศูนย์ ค่ารากดังกล่าวนี้เรียกว่า โพลของระบบกล่าวคือ

$D(s) = 0$ จะทำให้ทราบค่าโพลของระบบ

สัญลักษณ์ของโพลบนระนาบเอสคือ x

ซีโร่คือค่าของ s ที่ทำให้ส่วนของเศษของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันเป็นศูนย์ กล่าวคือ

$N(s) = 0$ ทำให้ทราบค่าซีโร่ของระบบ

สัญลักษณ์ของซีโรบนระนาบเอสคือ O

3.2.3 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งโพลกับการตอบสนองช่วงทรานเชียนท์ของระบบ

- เมื่อโพลเป็นจำนวนจริง

$s = \sigma$ คือ ตำแหน่งโพล , $y(t) = Ce^{\sigma t}$ คือ ทรานเชียนท์เทอม

ถ้าค่าทรานเชียนท์ลดลงตามเวลาค่าของ σ ที่เป็นลบกล่าวคือโพลจะต้องอยู่บนครึ่งซ้ายของแกนจินตภาพบนระนาบเอส และยิ่งโพลอยู่ด้านซ้ายมากเพียงใดผลตอบสนองช่วงทรานเชียนท์จะยิ่งลดลงจนเป็นศูนย์หรือหายไปจากผลตอบสนองรวมของระบบเร็วขึ้น ระบบที่ผลตอบสนองช่วงทรานเชียนท์สามารถลดลงจนสูญไปจากระบบเรียกว่า ระบบเสถียร

สำหรับโพลที่อยู่ด้านขวาของแกนจินตภาพจะทำให้ฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลเป็นฟังก์ชันเพิ่มขึ้นตามเวลาและยิ่งโพลอยู่ขวาเพียงใดก็จะยิ่งทำให้อัตราการเพิ่มของฟังก์ชันเร็วขึ้น ระบบที่มีโพลอยู่ทางด้านขวาของแกนจินตภาพบนระนาบเอสนี้จัดว่าเป็นระบบไม่เสถียร

- เมื่อโพลเป็นจำนวนจินตภาพ

ค่ารากของสมการคุณลักษณะอันดับสองหรือมากกว่าอาจให้ค่ารากเป็นจำนวนจินตภาพได้ สำหรับระบบที่เป็นระบบจริงจะได้โพลจินตภาพที่เป็นลักษณะของคู่คอนจูเกต

$s = \sigma \pm jw$ คือตำแหน่งโพล , $y(t) = Re^{\sigma t}$ คือทรานเชียนท์เทอม

ยิ่งโพลนั้นมีส่วนจินตภาพ (ค่าของ w) ค่ามากเท่าใดก็จะทำให้ความถี่ของการแกว่งสูงขึ้น สำหรับความเร็วของการหายไปของผลตอบสนองช่วงทรานเชียนท์ของระบบจะขึ้นกับส่วนจริงของโพลนั้น ๆ เช่นเดียวกับกรณีแรก

ถ้าโพลที่เป็นจำนวนจินตภาพนั้นอยู่บนครึ่งซ้ายของระนาบเอสจะได้ระบบที่เสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อโพลมีค่าซ้ำ

ในกรณีที่มีสมการคุณลักษณะมีค่ารากซ้ำกันหลายตัวจะทำให้ผลตอบสนองช่วงทรานเซียนท์ของระบบอยู่ในรูป

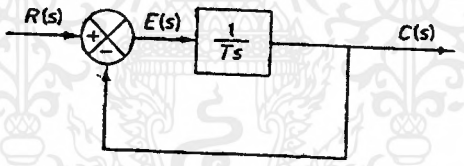
$$y(t) = (c_1+c_2t+c_3t^2+\ldots+c_mt^m)e^{\alpha t}$$

เมื่อ ค่าของ $c_1, c_2, \ldots, c_m$ ขึ้นกับค่า ซีโร่ , อินพุท และเงื่อนไขเริ่มต้น

โดย m = อันดับของรากที่ซ้ำกัน , α ขึ้นกับตำแหน่งของโพลที่ซ้ำกัน

3.3 ระบบอันดับหนึ่ง

พิจารณาระบบดังรูป



รูปที่ 3.4 แสดงระบบอันดับหนึ่ง

ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทเอาท์พุทเขียนได้เป็น

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s+1} \qquad 3.5$$

โดย τ= ค่าเวลาคงตัวของระบบ

- เมื่ออินพุทเป็นยูนิตสเต็ปจะได้

$$y(t) = 1-e^{\frac{-t}{\tau}} \;;(t \geq 0)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง

ผลตอบสนองต่อยูนิตสเต็ปอินพุท

สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งของระบบอันดับหนึ่งจะอยู่ในรูป

$$\frac{dy(t)}{dt}+\frac{1}{\tau}y(t)=\frac{k}{\tau}x(t) \qquad 3.6$$

จะมีพารามิเตอร์อยู่สองตัว คือ τ และ k ในสมการ 3.6

τ เรียกว่า ค่าเวลาคงตัวของระบบ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความเร็วในการตอบสนองต่ออินพุทของระบบ

k เรียกว่า ดีซีเกนของระบบ จะทำให้ค่าสุดท้ายของเอาท์พุท(คือค่าที่เอาท์พุทมีค่าเข้าใกล้ที่สภาวะคงตัว)ในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุทเป็นยูนิตสเต็ป

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบอันดับหนึ่ง

$$\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{\frac{k}{\tau}}{s+\frac{1}{\tau}}=\frac{k}{\tau s+1}$$

จากทรานสเฟอร์ฟังก์ชันจะได้ว่าระบบมีโพลเดี่ยวอยู่ที่ $s=\frac{-1}{\tau}$

$$Y(s)=\frac{\frac{k}{\tau}}{s(s+\frac{1}{\tau})}$$

แยกเศษส่วนย่อยได้เป็น

$$Y(s)=\frac{\frac{k}{\tau}}{\frac{1}{\tau}}+\frac{\frac{k}{\tau}}{\frac{-1}{\tau}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ผลตอบสนองต่อสเต็ปเป็น

$$y(t) = k - ke^{\frac{-t}{\tau}}$$

ถ้า τ เป็นลบแล้วโพลจะอยู่บนซีกขวาของระนาบเอสทำให้ขนาดของผลตอบสนองต่อสเต็ป y(t) เพิ่มขึ้นตามเวลาทำให้ระบบไม่เสถียร

ในกรณีที่ k = 1 จะได้

$$y(t) = 1 - e^{\frac{-t}{\tau}}$$

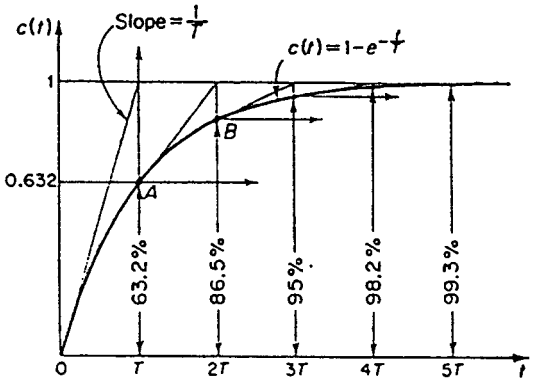
ซึ่งแสดงว่าตอนเริ่มต้นค่าเอาท์พุท y(t) เป็นศูนย์และผลสุดท้าย y(t) จะเป็น 1 นอกจากนี้ยังมีผลตอบสนองของเอกซ์โปเนนเชียล ที่ทำให้ $t = \tau$ ค่าของ y(t) = 0.632 กล่าวคือผลตอบสนอง y(t)จะมีค่า 63.2% ของค่าสุดท้าย

$$y(t) = 1\text{-}e^{-1} = 0.632$$

และยิ่งค่า τ น้อยเพียงใดก็จะยิ่งทำให้ระบบตอบสนองเร็วขึ้น คุณสมบัติอีกประการหนึ่งของเอ็กซ์โปเนนเชียลเดิร์ฟคือความชันที่ t = 0 จะเท่ากับ $1/\tau$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{\tau}e^{\frac{-t}{\tau}}\Big|_{t=0} = \frac{1}{\tau}$$

และความชันจะลดลงอย่างต่อเนื่องจาก $1/\tau$ ที่ t = 0 จนเป็น 0 ที่ $t = \infty$



รูปที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองต่อยูนิตสเต็ปของระบบอันดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุด A มีค่าเวลาคงตัว $t = \tau$ ค่าตอบสนองจะเริ่มจากศูนย์ไปจนถึง 63.2% ของค่าสุดท้าย ที่ $t = 2\tau$ ค่าตอบสนองจะไปจนถึง 86.5% ของค่าสุดท้าย ที่ $t = 3\tau$, 4τ และ 5τ กราฟค่าตอบสนองจะมีค่าเป็น 95% , 98.2% และ 99.3% ของค่าสุดท้ายตามลำดับ

ดังนั้นจึงสรุปว่าที่ $t \geq 4\tau$ ค่าตอบสนองจะมีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วง 2% ของค่าสุดท้าย ในการประมาณค่าตอบสนองที่ถูกต้องและใกล้เคียงค่าสุดท้ายจะใช้ค่า $t \geq 4\tau$ เพื่อประมาณค่าตอบสนองของเอาท์พุท

3.4 ระบบอันดับสอง

3.4.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับสอง

สมการเชิงอนุพันธ์ของระบบอันดับสองเป็นดังสมการ 3.7

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\tau}\frac{dy(t)}{dt} + \frac{1}{\tau^2}y(t) = \frac{1}{\tau^2}x(t) \qquad 3.7$$

โดยกำหนดสภาวะเริ่มต้นเป็นศูนย์

ζ เรียกว่า damping ratio , W_n เรียกว่า undamping natural frequency

จะได้

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_n^2}{s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2} \qquad 3.8$$

และจะมีโพลอยู่ที่

$$s = -\zeta W_n \pm \sqrt{(\zeta^2 - 1)W_n^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไดนามิคของระบบอันดับสองจะขึ้นกับตัวแปร 2 ตัวคือ ζ และ W_n โดยค่าของ W_n จะทำหน้าที่ปรับไทม์สเกล ส่วนค่าของ ζ จะเป็นตัวกำหนดสถานะของโพลว่าเป็นจำนวนจริงหรือจำนวนเชิงซ้อน

- ถ้า $0 \leq \zeta \leq 1$ จะได้ค่าโพลวงปิดเป็นคอมเพล็กซ์คอนจูเกตอยู่บนซีกซ้ายของระนาบเอสมีค่า

$$s = -\zeta W_n \pm jW_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

และเรียกระบบนี้ว่า อันเดอร์แดมพ์ ผลตอบสนองช่วงทรานเซียนท์จะเกิดการแกว่ง

- ถ้า $\zeta = 1$ ค่าโพลวงปิดทั้งสองตัวจะมีค่าเท่ากันอยู่ที่ $s = -W_n$ เรียกระบบนี้ว่า คริติคอลแดมพ์ผลตอบสนองช่วงทรานเซียนท์ของระบบแบบคริติคอลแดมพ์และโอเวอร์แดมพ์จะไม่มีการแกว่ง

- ถ้า $\zeta = 0$ จะทำให้ผลตอบสนองช่วงทรานเซียนท์ไม่หายไปจากผลตอบสนองรวมของระบบ

3.4.2 ชนิดของผลตอบสนองของระบบอันดับสอง

3.4.2.1 กรณีอันเดอร์แดมพ์ ($0 < \zeta < 1$)

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_n^2}{(s+\zeta W_n + jW_d)(s+\zeta W_n - jW_d)} \qquad 3.9$$

โดย

$$W_d = W_n\sqrt{1-\zeta^2} \qquad 3.10$$

W_d = เรียกว่า damped natural frequency

เมื่ออินพุทเป็นยูนิตสเต็ปจะได้

$$y(t) = 1 - \frac{e^{\zeta W_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}}\sin(W_d + \tan^{-1}\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}) \qquad 3.11$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22920

จะได้ว่าความถี่ของการแกว่งช่วงทรานเซียนท์คือ W_d หรือ damped natural frequency

- ค่าสัญญาณผิดพลาดของระบบนี้คือ

$$e(t) = x(t) - y(t)$$

$$e(t) = e^{-\zeta W_n t}\left(\cos(W_d t) + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\sin(W_d t)\right) \qquad 3.12$$

$$e(\infty) = 0$$

ฉะนั้นที่สภาวะคงตัว ($t = \infty$) จะไม่มีค่าผิดพลาด

- พิจารณาที่ $\zeta = 0$

ถ้า damping ratio ζ เท่ากับ 0 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นอันแดมพ์และจะเกิดการแกว่งต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ในกรณีนี้จะได้

$$y(t) = 1 - \cos(W_n t) \qquad ; (t \geq 0)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า W_n ซึ่งแทนค่า undamped natural frequency ของระบบเป็นความถี่ที่ระบบแกว่งเมื่อค่า ζ ลดลงจนเป็นศูนย์

โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะไม่ทราบค่าของความถี่ W_n แต่ความถี่ที่สามารถสังเกตได้ในระบบจะ เป็นความถี่ W_d ซึ่งมีค่าเป็น $W_n\sqrt{1-\zeta^2}$ ซึ่งมักจะมีค่าต่ำกว่า W_n

การเพิ่ม ζ จะทำให้ค่า W_d ลดลงและถ้าค่า ζ เพิ่มขึ้นจนเกินหนึ่งจะทำให้ผลการตอบสนองกลายเป็นโอเวอร์แดมพ์ซึ่งไม่มีการแกว่ง

3.4.2.2 กรณีคริติคอลแดมพ์ ($\zeta = 1$)

ในกรณีนี้ค่าโพลวงปิดทั้งสองมีค่าเท่ากันให้อินพุทเป็นยูนิตสเต็ป ; X(s) = 1/s

$$Y(s) = \frac{W_n^2}{s(s+W_n)^2}$$

$$y(t) = 1 - e^{W_n t}(1 + W_n t) \qquad ; (t \geq 0)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.3 กรณีโอเวอร์แดมพ์ ($\zeta \geq 1$)

โพลวงปิดทั้งสองเป็นจำนวนจริงลบที่ไม่เท่ากัน เมื่ออินพุทเป็นยูนิตสเต็ปจะได้

$$Y(s) = \frac{W_n^2}{s(s+\zeta W_n + W_n\sqrt{\zeta^2-1})(s+\zeta W_n - W_n\sqrt{\zeta^2-1})}$$

จะได้ค่าการตอบสนองทางเวลาคือ

$$y(t) = 1 + \frac{W_n}{2\sqrt{\zeta\ -1}}\left(\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2}\right) \qquad ;\ (t \geq 0)$$

เมื่อ ζ มากกว่า 1 y(t) จะประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียล 2 ฟังก์ชันโดยฟังก์ชันหนึ่งจะลดลงเร็วกว่าอีกส่วนหนึ่ง ถ้าส่วนนั้นเร็วกว่ามากจะทำให้โพลที่ทำให้เกิดฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลนั้น ๆ ถูกละทิ้งไปได้

นั่นคือถ้า $-s_2$ อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมากกว่า s_1 สามารถประมาณ y(t) ได้โดยการละทิ้ง $-s_1$ เนื่องจากผลของ $-s_1$ มีต่อระบบน้อยมากเนื่องจากเอ็กซ์โปเนเชียลเทอม ซึ่ง $-s_1$ ประกอบอยู่นั้นลดลงและหายไปจากระบบอย่างรวดเร็ว

ในกรณีนี้จะได้ผลตอบสนองของระบบใกล้เคียงกับกรณีระบบอันดับหนึ่งเนื่องจาก $-s_2$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} \approx \frac{\zeta W_n - W_n\sqrt{\zeta^2-1}}{(s+\zeta W_n - W_n\sqrt{\zeta^2-1})s} = \frac{s_2}{s+s_2}$$

เมื่ออินพุทของระบบเป็นยูนิตสเต็ปจะได้ผลตอบสนองทางเวลาคือ

$$y(t) = 1 - e^{-(\zeta-\sqrt{\zeta^2-1})W_n t} \quad ;(t \geq 0) \qquad 3.12$$

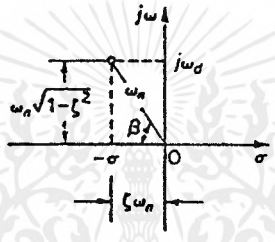
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 คำจำกัดความคุณลักษณะสนองช่วงทรานเซียนท์ของผลตอบ

- ดีเลย์ไทม์ (t_d) คือ เวลาที่ผลตอบสนองมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสุดท้ายเป็นครั้งแรก

- ไรส์ไทม์ (t_r) คือ เวลาที่ระบบมีค่าจาก 10 - 90% ของค่าสุดท้ายสำหรับระบบโอเวอร์แดมพ์ และ0 - 100% ของค่าสุดท้ายสำหรับระบบอันเดอร์แดมพ์

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{W_d} \qquad 3.14$$



รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดค่าของ β

- พีคไทม์ (t_p) คือเวลาของระบบที่ขึ้นถึงยอดแรกของโอเวอร์ชูท ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการ 3.15

$$t_p = \frac{\pi}{W_d} \qquad 3.15$$

- ค่าเปอร์เซนต์สูงสุดของโอเวอร์ชูท (M_p) คือ คือค่าสูงสุดของผลตอบสนองเมื่อเทียบกับค่าสุดท้าย ที่พีคไทม์

$$\%M_p = e^{-(\frac{\sigma\pi}{W_d})} * 100 \qquad 3.16$$

- เซตติ้งไทม์ (t_s) คือเวลาที่การตอบสนองช่วงทรานเซียนท์มีค่าอยู่ในช่วง ±2% หรือ ±5% ของค่าสถานะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 2% criterion

$$t_s = \frac{4}{\zeta W_n} \qquad 3.17$$

ที่ 5% critetion

$$t_s = \frac{3}{\zeta W_n} \qquad 3.18$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

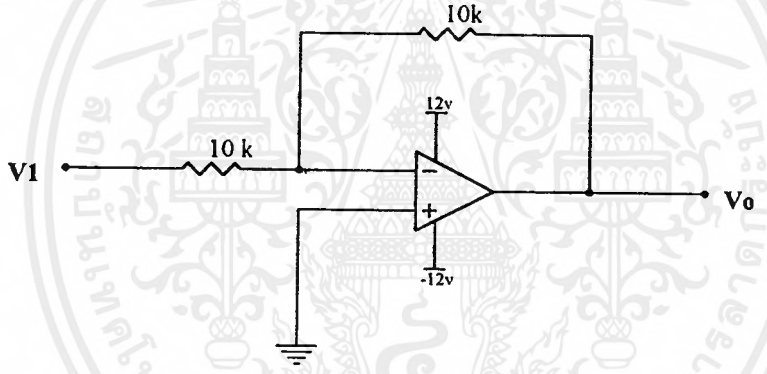
บทที่ 4

การออกแบบและผลการทดลอง

4.1 การออกแบบวงจรพื้นฐาน

4.1.1 วงจรกลับเฟสสัญญาณ

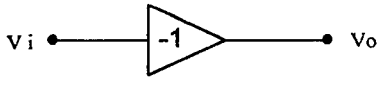
จากวงจรขยายแบบกลับเฟสได้ทำการออกแบบให้มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง เพื่อให้สัญญาณเอาท์พุทกลับเฟสกับสัญญาณอินพุท ดังสมการ 4.1 ดังนั้นความต้านทานอินพุทจึงต้องมีค่าเท่ากับความต้านทานป้อนกลับ มีค่าเท่ากับ 10kΩ ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรกลับเฟสสัญญาณ

$$Vo = -Vi \qquad 4.1$$

สัญลักษณ์วงจรกลับเฟสสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.2

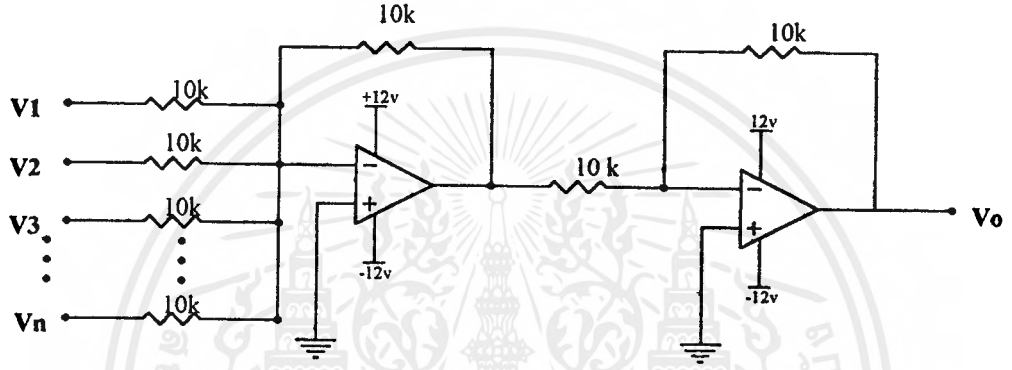


รูปที่ 4.2 แสดงสัญลักษณ์ วงจรกลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 วงจรรวมสัญญาณ

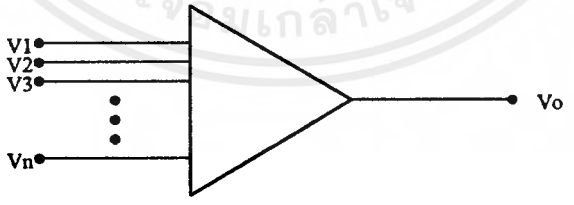
วงจรรวมสัญญาณที่ใช้ในอนาลอกคอมพิวเตอร์นั้น สัญญาณเอาท์พุตจะมีค่าเท่ากับผลรวมของสัญญาณทางด้านอินพุท โดยแต่ละอินพุทไม่มีการขยายขนาด จึงกำหนดให้ความต้านทานที่ต่ออยู่ด้านอินพุททุกตัว เท่ากับความต้านทานป้อนกลับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10k Ω วงจรรวมสัญญาณที่ใช้ในอนาลอกคอมพิวเตอร์จะมีตั้งแต่ 2 อินพุทขึ้นไปดังรูปที่ 4.3 และความสัมพันธ์จะเป็นไปตามสมการ 4.2



รูปที่ 4.3 แสดงวงจรรวมสัญญาณหลายอินพุท

$$Vo = (V1 + V2 + V3 + ... + Vn) \qquad 4.2$$

สัญลักษณ์ที่แทนวงจรรวมสัญญาณในอนาลอกคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.4



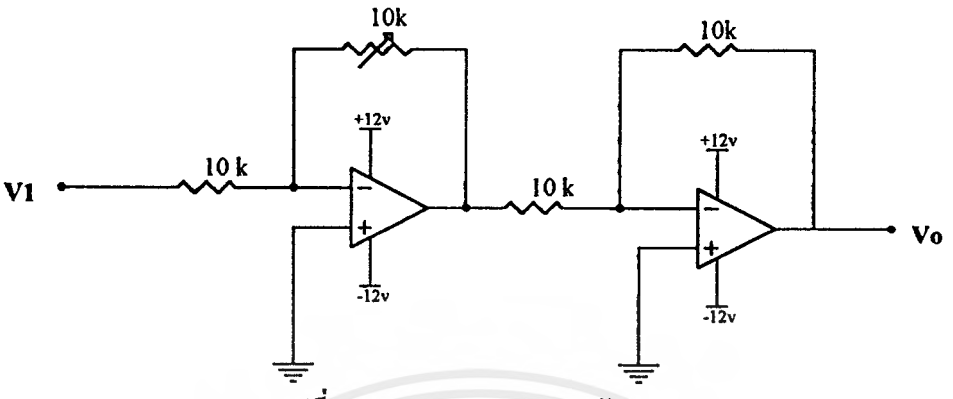
รูปที่ 4.4 แสดงสัญลักษณ์ของวงจรรวมสัญญาณ

4.1.3 วงจรลดทอนสัญญาณ

รูปที่ 4.5 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณที่มีค่าความต้านทานด้านอินพุท (Ri) เท่ากับ 10kΩ และความต้านทานปรับค่าได้มีค่าเท่ากับ 10kΩ ลักษณะของสัญญาณเอาท์พุทจะมีเฟสเดียวกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอินพุท เนื่องจากมีการต่อวงจรกลับเฟสเพิ่ม โดยค่าของสัญญาณเอาท์พุตจะเป็นดังสมการ 4.3



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณ

$$Vo = aVi \qquad 4.3$$

เมื่อ $0 \leq a \leq 1$

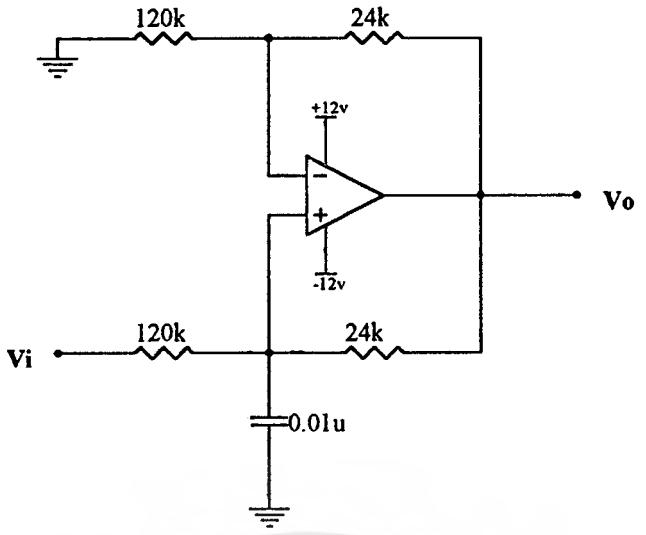
สัญลักษณ์ของวงจรลดทอนสัญญาณที่ใช้ในอนาลอกคอมพิวเตอร์ แสดงในรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.6แสดงสัญลักษณ์วงจรลดทอนสัญญาณ

4.1.4 วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรอินทิเกรเตอร์ตามรูปที่ 4.7 มีอัตรขยาย (Ki) เท่ากับ 1000 หมายความว่าวงจรมีค่าเวลาของการอินทิเกรต (τi) เท่ากับ 0.001 วินาที ค่านี้จะถูกนำมาพิจารณาร่วมกับ ความสัมพันธ์ของบาลานซ์บริดจ์เพื่อกำหนดค่าความต้านทาน และตัวเก็บประจุของวงจรที่แสดงในรูปที่ 4.7 โดยกำหนดให้ R1 = 5R2

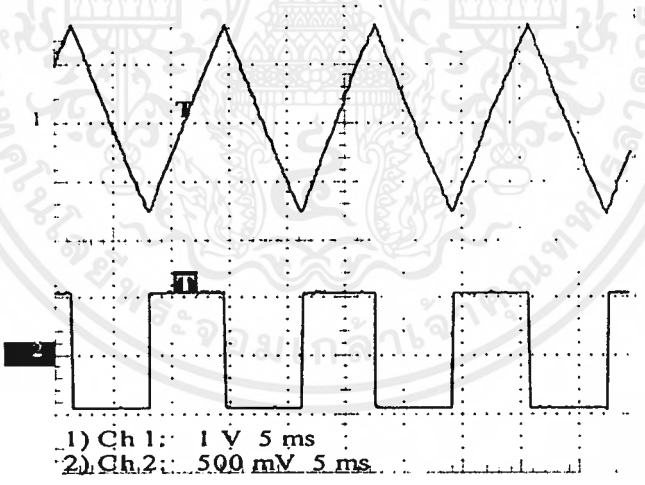
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์

ดังนั้นสัญญาณเอาท์พุทจะมีความสัมพันธ์ดังสมการ 4.4

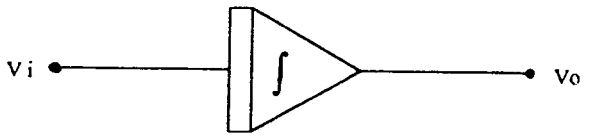
$$Vo(t) = 1000\int Vi(t)dt \qquad 4.4$$



รูปที่ 4.8 แสดงผลการอินทิเกรต

สัญลักษณ์ของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ในอนาลอกคอมพิวเตอร์เป็นดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 สัญลักษณ์วงจรอินทิเกรเตอร์

4.2 การหาค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์

จากบทที่แล้วไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ (α) จะเป็นตัวบอกความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลา ของอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณกับช่วงเวลาของปัญหาที่แสดงว่าอนาลอกคอมพิวเตอร์มีช่วงเวลาในการคำนวณมากหรือน้อยกว่าช่วงเวลาของปัญหา ฉะนั้นความเร็วในการคำนวณผลลัพธ์ของอนาลอกคอมพิวเตอร์ จึงขึ้นอยู่กับคาบเวลาในการอินทิเกรต (τi) ของวงจรอินทิเกรตที่ใช้

เพื่อให้ทราบค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ หรือความเร็วในการคำนวนของอนาลอกคอมพิวเตอร์มีความจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีของระบบควบคุมอันดับสองร่วมด้วย เพราะมีความสัมพันธ์ที่สามารถบอกถึงลักษณะของผลลัพธ์ได้

ขั้นตอนของการหาค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์เป็นดังนี้

1.จัดรูปสมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหาตัวอย่างที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับอนาลอกคอมพิวเตอร์ คือจัดตัวแปรที่มีอันดับสูงสุดให้อยู่ทางด้านซ้ายของสมการแล้ววาดไดอะแกรมที่ไม่ได้ทำการสเกลเวลาเพื่อนำไปใช้กับอนาลอกคอมพิวเตอร์

2.ใช้โปรแกรมที่สามารถดูผลการตอบสนองของระบบตัวอย่างได้เช่น MATLAB, CODAS เพื่อใช้ผลตอบสองของระบบหรือผลลัพธ์ของสมการมาเป็นหลักในการปรับการแสดง คำตอบของสมการจากอนาลอกคอมพิวเตอร์ ในที่นี้ขอยกตัวอย่างระบบที่ใช้เป็นแบบมาตรฐานในการหาค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ คือ

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{S^2 + S + 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากระบบนี้มี Wn = 1 และเมื่อทราบสเกลลิ่งแฟคเตอร์ของระบบก็สามารถนำมาเป็นค่าเปรียบเทียบในการเปลี่ยนสเกลเวลา เพราะจำนวนเท่าของการทำสเกลเวลาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ ดังนั้นการสเกลเวลาในที่นี้คือการเพิ่มหรือลดความถี่ของ Wn เพื่อทำการเพิ่มหรือลดสเกลเวลา

3. เขียนสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบตัวอย่างอีกครั้งโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการ 2.8 จะได้สมการที่มีตัวแปรอิสระตัวใหม่แล้วทำการแปลงลาปลาซ ซึ่งจะได้ระบบอันดับสองที่มีการสเกลเวลา

จาก

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{dy}{dt} - y - x$$

จากสมการ 2.8

$$\tau = \alpha t$$

ดังนั้น

$$d\tau = \alpha dt$$

$$d\tau^2 = \alpha^2 dt^2 \qquad 4.5$$

จะได้

$$\alpha^2 \frac{d^2y}{d\tau^2} = -\alpha \frac{dy}{d\tau} - y + x$$

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} = -\frac{1}{\alpha}\frac{dy}{d\tau} - \frac{1}{\alpha^2}y + \frac{1}{\alpha^2}x \qquad 4.6$$

ทำการแปลงลาปลาซ สมการที่ 4.6

$$s^2Y(s) = -\frac{1}{\alpha}sY(s) - \frac{1}{\alpha^2}Y(s) + \frac{1}{\alpha^2}X(s)$$

$$(s^2 + \frac{s}{\alpha} + \frac{1}{\alpha^2})Y(s) = \frac{1}{\alpha^2}X(s)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{1}{\alpha^2}}{s^2 + \frac{s}{\alpha} + \frac{1}{\alpha^2}} \qquad 4.7$$

จากสมการรูปแบบมาตรฐานระบบอันดับสอง

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_n^2}{s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2} \qquad 4.8$$

สามารถปรับสมการ 4.7ให้เข้ากับรูปแบบมาตรฐานตามสมการ 4.8ได้ดังสมการ 4.9

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{W_n^2}{\alpha^2}}{s^2 + \frac{2\zeta W_n}{\alpha} s + \frac{W_n^2}{\alpha^2}} \qquad 4.9$$

4. ทำการปรับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของอนาลอกคอมพิวเตอร์ให้เหมือนกับผลที่ได้จากโปรแกรม หลังจากนั้นทำการวัดค่า M_p และ W_d จากผลของอนาลอกคอมพิวเตอร์แล้วใช้ความสัมพันธ์ในสมการ 3.16 และสมการ 3.10 ในการหาค่าของ ζ และ W_n ของระบบที่อนาลอกคอมพิวเตอร์แสดงผลออกมา

5. นำค่า ζ และค่า W_n ที่ได้จากข้อ 4 มาเขียนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบอันดับสองใหม่อีกครั้งแล้วจัดรูปตามสมการ 4.8

6. ทำการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ของระบบตัวอย่างที่จัดอยู่ในรูปที่มีการสเกลเวลาตามสมการ 4.9 กับทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบที่ได้จากข้อ 5 จะได้ไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ของระบบออกมา

ซึ่งไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ที่ได้จากระบบที่ได้ทำการทดลอง W_n มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อระบบมี $W_n = 1$

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน	ζ	α
$\frac{1}{s^2+0.2s+1}$	0.2	0.001012
$\frac{1}{s^2+0.3s+1}$	0.3	0.000953
$\frac{1}{s^2+0.4s+1}$	0.4	0.001014
$\frac{1}{s^2+0.5s+1}$	0.5	0.000958

:เมื่อ $W_n = 1$ ได้ $\alpha \approx 0.001$

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการหาค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ที่ $W_n = 1$

- เมื่อระบบมี $W_n = 0.1$

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน	ζ	α
$\frac{0.01}{s^2+0.04s+0.01}$	0.2	0.0001012
$\frac{0.01}{s^2+0.06+0.01}$	0.3	0.0000953
$\frac{0.01}{s^2+0.08s+0.01}$	0.4	0.0001014
$\frac{0.01}{s^2+0.1s+0.01}$	0.5	0.0000958

:เมื่อ $W_n = 0.1$ ได้ค่า $\alpha \approx 0.0001$

ตารางที่ 4.2 แสดงการหาค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ที่ $W_n = 0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อระบบมี $W_n = 0.5$

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน	ζ	α
$\frac{0.25}{s^2 + 0.2s + 0.25}$	0.2	0.000506
$\frac{0.25}{s^2 + 0.3s + 0.25}$	0.3	0.000476
$\frac{0.25}{s^2 + 0.4s + 0.25}$	0.4	0.000507
$\frac{0.25}{s^2 + 0.5s + 0.25}$	0.5	0.000479

:เมื่อ $W_n = 0.5$ ได้ $\alpha \approx 0.0005$

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการหาค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ที่ $W_n = 0.5$

จากผลการทดลองที่ได้จากตาราง สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. ค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ (α) มีค่าขึ้นกับค่าของ W_n

2. ค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ไม่มีความสัมพันธ์กับ ζ ที่เป็นตัวบ่งลักษณะผลตอบสนองของระบบ

3. ระบบที่ค่า W_n ต่างกันจะมีไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ต่างกัน ซึ่งจะมีค่าเป็นเท่าใดนั้น สามารถหาได้จากการพิจารณาว่าระบบนั้นมี W_n เป็นกี่เท่าของ $W_n=1$ ที่มีค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ (α) = 0.001 ก็สามารถทราบค่าของไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์โดยการคูณ α = 0.001 ด้วย W_n ของระบบ

4. นอกจากการเปลี่ยนแปลงค่าของ W_n ในระบบต่าง ๆ จะมีผลต่อ ไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์แล้ว W_n ของระบบที่ต่างจาก $W_n = 1$ ยังเกี่ยวกับการทำสเกลเวลา ของระบบต่าง ๆ ดังนี้

- การขยายสเกลจะทำให้ W_n ของระบบลดลง อนาลอกคอมพิวเตอร์จะแสดงผลตอบสนองกว้างมากขึ้น

- การลดสเกลจะทำให้ W_n ของระบบเพิ่มขึ้น อนาลอกคอมพิวเตอร์จะแสดงผลตอบสนองแคบกว่าเดิม

5. การเพิ่มหรือลดสเกลเวลาควรทำอย่างต่ำเท่ากับ W_n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการทำสเกลเวลา

ระบบตัวอย่าง

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{25}{s^2 + 5s + 25}$$

ระบบมี $W_n = 5$ แสดงว่าระบบมีความถี่มากกว่า $W_n = 1$ จึงต้องทำการขยายสเกลเวลาเพื่อให้ระบบนี้สามารถแสดงผลตอบสนองออกทางหน่วยแสดงผลได้

จาก

$$T = \frac{1}{f}$$

และ

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_n^2}{s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2}$$

เมื่อทำการขยายสเกลเวลาก็คือการลดความถี่ลง และเมื่อทำการขยายสเกลเวลา 5 เท่านั้น ตำแหน่งที่แสดงความถี่ในระบบจะมีค่าลดลงด้วย โดยจะได้ว่า

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{25}{5^2}}{s^2 + \frac{5}{5}s + \frac{25}{5^2}}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s^2 + s + 1} \qquad 4.10$$

สมการที่ 4.10 แสดงระบบที่ได้ทำการสเกลเวลาแล้ว และลักษณะของผลตอบสนองของระบบยังคงเหมือนเดิม

4.3 การหาตัวคูณของระบบ

จากทฤษฎีของอนาลอกคอมพิวเตอร์ วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้จะมีอัตราขยาย (Ki) หรือมีคาบเวลาในการอินทิเกรต (τ) มีค่าเท่ากับ 1 แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้มีอัตราขยายเท่ากับ 1 ได้ เพราะถ้าหากวงจรอินทิเกรเตอร์มีความเวลาในการอินทิเกรตเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งอนาลอกคอมพิวเตอร์จะทำงานได้ช้า ดังนั้นเพื่อให้อนาลอกคอมพิวเตอร์มีความเร็วในการทำงานที่เหมาะสม วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้จึงมีอัตราขยายเท่ากับ 1000 เมื่อมีการนำเอาวงจรอินทิเกรเตอร์มาใช้หาผลลัพธ์ให้ได้ตามทฤษฎี จำเป็นต้องมีการลดทอนอัตราขยายของวงจรให้เป็นหนึ่ง แต่ปัญหาที่ตามมาคือ ขีดจำกัดของวงจรลดทอนไม่สามารถลดทอนให้มีอัตราขยายต่ำ ๆ ได้ละเอียด เพื่อที่อนาลอกคอมพิวเตอร์จะสามารถแสดงผลลัพธ์ของปัญหาได้ถูกต้อง โดยไม่ต้องลดทอนอัตราขยายของวงจรอินทิเกรเตอร์ให้เป็นหนึ่ง ดังนั้นเมื่อใช้อนาลอกคอมพิวเตอร์แสดงผลให้ได้เหมือนกับผลลัพธ์จริงของปัญหา แสดงว่าจะต้องมีตัวเลขชุดหนึ่งเป็นของระบบโดยรวม เพื่อให้อนาลอกคอมพิวเตอร์สามารถแสดงผลลัพธ์ที่ตรงกับผลลัพธ์จริงออกมา

การหาค่าของตัวเลขที่ปรากฏอยู่ในระบบอันดับต่าง ๆ ของอนาลอกคอมพิวเตอร์ สามารถทำได้ดังนี้

1.จัดรูปสมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหาตัวอย่างที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองที่อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับอนาลอกคอมพิวเตอร์ คือจัดตัวแปรที่มีอันดับสูงสุดให้อยู่ทางด้านซ้ายของสมการแล้ววาดไดอะแกรมที่ไม่ได้ทำการสเกลเวลาเพื่อนำไปใช้กับอนาลอกคอมพิวเตอร์

2. ทำการปรับค่าของตัวลดทอนสัญญาณที่ใช้ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากอนาลอกคอมพิวเตอร์เหมือนกับผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมในการแสดงผลลัพธ์ออกมา

3. เมื่อลักษณะผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกันแล้วทำการลดทอนขนาดของผลลัพธ์ ให้มีในสถานะคงตัว(steady state) เท่ากับ 1

4.บันทึกค่าจากตัวลดทอนสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในไดอะแกรมการทำงานของอนาลอกคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาเขียนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันใหม่

4.3.1 ตัวคูณของระบบอันดับหนึ่ง

ผลการทดลองการหาตัวคูณของระบบอันดับหนึ่งในตารางที่ 4.4

k คือ ตัวลดทอนทางด้านอินพุท

a คือ ตัวลดทอนของ y(t) ที่ป้อนกลับ

ผลการทดลองหาตัวคูณของระบบอันดับสองในตารางที่ 4.5

k คือ ตัวลดทอนทางด้านอินพุท

a1 คือ ตัวลดทอนของ y(t) ที่ป้อนกลับ

a2 คือ ตัวลดทอนของ $\frac{dy(t)}{dt}$ ที่ป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน	τ	ค่าของตัวลดทอน (โวลท์)		ความสัมพันธ์ของการเกิดทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ตัวลดทอน		ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันใหม่
		a	k	a	k	
$\frac{0.5}{s+0.5}$	2	0.192	0.208	$\frac{0.192}{2}$	$\frac{0.208}{2}$	$\frac{0.208}{s+0.192}$
$\frac{1}{s+1}$	1	0.200	0.212	$\frac{0.200}{1}$	$\frac{0.212}{1}$	$\frac{0.212}{s+0.200}$
$\frac{2}{s+2}$	0.5	0.198	0.210	$\frac{0.198}{0.5}$	$\frac{0.210}{0.5}$	$\frac{0.210}{s+0.198}$

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการหาค่าตัวคูณของระบบอันดับหนึ่ง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าตัวคูณของระบบที่จะต้องนำมาคูณเข้ากับทรานสเฟอร์ฟังก์ชันเดิมคือ

$$\frac{0.2}{\tau} \qquad 4.11$$

เมื่อ τ คือ ค่าเวลาคงตัวของระบบ

ดังนั้นสามารถนำอนาลอกคอมพิวเตอร์มาแสดงผลลัพธ์ของสมการระบบอันดับหนึ่งได้ดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง 4.1

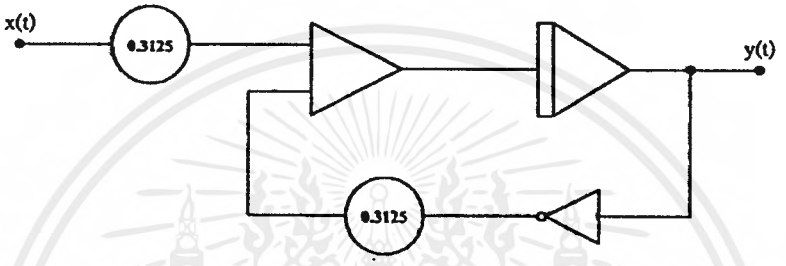
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1.25}{s+1.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 3.5 สมการมีค่า $\tau = 0.8$ ฉะนั้นตัวคูณของระบบจะมีค่าเท่ากับ $\frac{0.2}{0.8} = 0.25$ จะได้

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.25 * 1.25}{s + (0.25 * 1.25)}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.3125}{s + 0.3125}$$



รูปที่ 4.10 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับหนึ่งของอนาลอกคอมพิวเตอร์

4.3.2 ตัวคูณระบบดันดับสอง

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน	ค่าของตัวลดทอน			ความสัมพันธ์ของการเกิดทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ตัวลดทอน			ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันใหม่
	a1	a2	k	a1	a2	k	
$\frac{1}{s^2 + 0.4s + 1}$	0.28	0.85	0.81	0.7*0.4	0.85*1	0.81*1	$\frac{0.81}{s^2 + 0.28s + 0.85}$
$\frac{1}{s^2 + 0.6s + 1}$	0.53	0.9	0.85	0.88*0.6	0.9*1	0.85*1	$\frac{0.85}{s^2 + 0.53s + 0.9}$
$\frac{1}{s^2 + 0.8s + 1}$	0.69	0.8	0.75	0.69*1	0.8*1	0.75*1	$\frac{0.75}{s^2 + 0.69s + 0.8}$
$\frac{1}{s^2 + s + 1}$	0.8	0.8	0.78	0.8*1	0.8*1	0.78*1	$\frac{0.78}{s^2 + 0.8s + 0.8}$

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการหาตัวคูณของระบบอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองระบบอันดับสองสามารถสรุปได้ว่าตัวคูณระบบที่จะต้องนำมาคูณเข้ากับทรานสเฟอร์ฟังก์ชันคือ 0.8

ตัวอย่าง 4.2

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s^2 + s + 1}$$

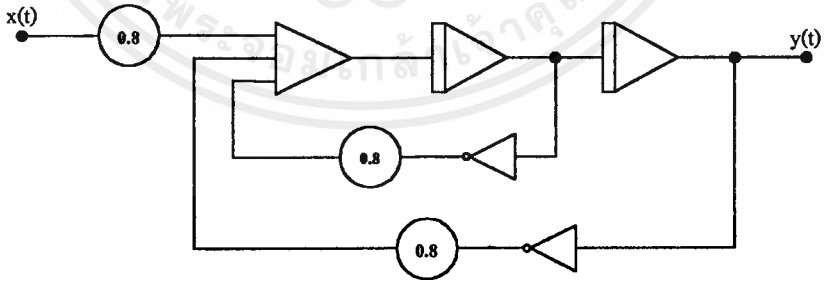
ทำการคูณด้วยตัวคูณของระบบที่มีค่า 0.8 จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นใหม่ที่จะนำปรับที่ตัวลดทอน ณ.ตำแหน่งที่ตรงกับการเขียนไดอะแกรมของอนาลอกคอมพิวเตอร์คือ

$$\frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{(1*08)}{s^2 + (0.8*1)s + (1*0.8)}$$

จะได้

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.8}{s^2 + 0.8s + 0.8}$$

ไดอะแกรมของระบบอันดับสองของอนาลอกคอมพิวเตอร์เป็นดังรูปที่4.11



รูปที่ 4.11 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับสองของอนาลอกคอมพิวเตอร์

ในระบบอันดับสองจำเป็นต้องทำการสเกลเวลาโดยต้องทำให้ค่า W_n ของระบบต้องมีค่าน้อยกว่าหนึ่งก่อนแล้วจึงคูณด้วยตัวคูณของระบบเพราะเนื่องจากว่าตัวลดทอนของอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่เป็นตัวปรับลักษณะของผลลัพธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ระบบอันดับสาม และระบบอันดับสี่

การหาค่าตัวคูณในระบบอันดับสาม และอันดับสี่เป็นเรื่องที่ทำได้ยากมากเนื่องจากต้องมีการปรับค่าของตัวลดทอนที่มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของรากสมการ ซึ่งในการปรับค่านี้มักจะทำให้รากสมการไปอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอสเมื่อมีรากสมการที่เป็นคู่คอมเพล็กซ์คอนจูเกตเป็นรากสมการที่เด่นจะทำให้ผลตอบสนองที่ได้เกิดการแกว่งซึ่งหมายความว่าระบบนั้นไม่มีเสถียรภาพ

จะพบว่าในระบบอันดับสามและสี่หรือในระบบที่มีอันดับสูง ๆ ขึ้นไปนั้นจะมีโอกาสที่ระบบนั้นจะไม่มีเสถียรภาพสูง เนื่องมาจากในการปรับค่าของตัวลดทอนในแต่ละครั้งไม่สามารถที่จะทราบค่าได้ว่ารากสมการนั้นมีค่าเท่าใด และอยู่ตำแหน่งใดของระนาบเอส

ดังนั้นในการทำชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์นี้เพียงเพื่อมุ่งพิจารณาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรากสมการที่เกิดจากการปรับตัวลดทอนสัญาณอนาลอกคอมพิวเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองที่มีลักษณะต่าง ๆ

4.4 การทำสเกลขนาด

เพื่อที่จะสามารถสังเกตเห็นผลลัพธ์ที่ได้จาก อนาลอกคอมพิวเตอร์ในช่วงที่หน่วยแสดงผลสามารถแสดงให้เห็นทั้งหมดได้นั้นจะเป็นต้องมีการสเกลขนาดของระบบหรือปัญหาให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง ปัญหาหรือระบบทุกระบบจะให้ผลลัพธ์ที่ออกมาแตกต่างกันออกไป ดังนั้นเพื่อให้สามารถสังเกตเห็นผลลัพธ์ของปัญหาได้ทั้งหมด จึงกำหนดให้ทำการสเกลขนาดคือทำการเพิ่มหรือลดอัตราขยายผลลัพธ์ของปัญหาเป็นจำนวนเท่าของ 1 ที่ถือเป็นค่าสภาวะคงตัวของระบบ

การทำสเกลขนาดมีดังนี้

1. จัดสมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหาให้เป็นรูปของทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน โดยการแปลงลาปลาซ

2. จัดทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบอันดับต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปมาตรฐานดังนี้

- ระบบอันดับหนึ่ง

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k * \frac{1}{\tau}}{s + \frac{1}{\tau}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบอันดับสอง

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k * W_n^2}{s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2}$$

3. ทำสเกลเวลาถ้า W_n มากกว่า 1 แล้วคูณด้วยตัวคูณของระบบแต่ละอันดับโดยยังแสดงค่าของอัตราขยายเอาไว้

4. เขียนไดอะแกรมของอนาลอกคอมพิวเตอร์โดยตัวลดทอนสัญญาณอินพุทไม่ได้คูณด้วยค่า k หมายความว่า k เท่ากับ 1

5. ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากอนาลอกคอมพิวเตอร์ จะเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นค่าของผลลัพธ์ ณ.ตำแหน่งเวลาต่าง ๆ เมื่อได้ออกมาแล้วจึงทำการคูณด้วยค่า k ที่เป็นอัตราขยายหรือลดทอนก็จะได้ค่าผลลัพธ์ที่แท้จริงของสัญญาณ ณ.เวลาที่ต้องการได้

ตัวอย่างการทำสเกลขนาด

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{2}{s^2 + 0.4s + 1}$$

จัดให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน

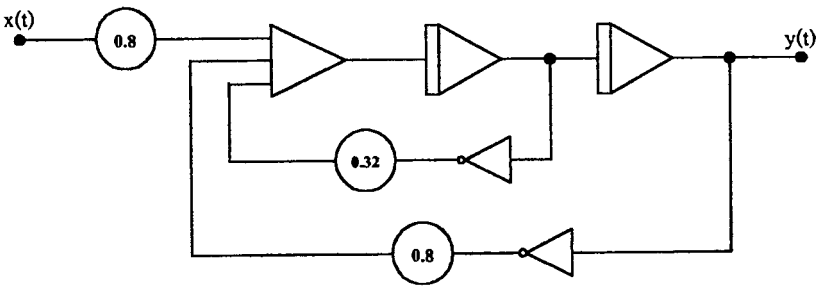
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{2 * 1}{s^2 + 0.4s + 1}$$

ระบบที่มีอัตราขยายเท่ากับ 2 และ $W_n = 1$ จึงไม่ต้องสเกลเวลาไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์จึงเท่ากับ 0.001 จากนั้นทำการใช้ตัวคูณของระบบจะได้

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{2 * 0.8}{s^2 + 0.32s + 0.8}$$

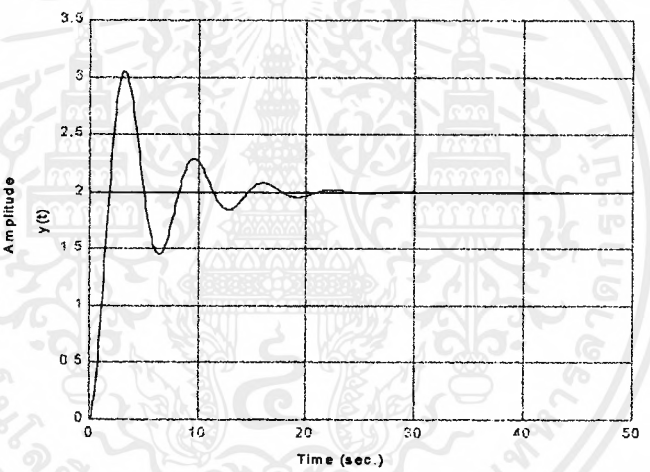
เขียนไดอะแกรมของอนาลอกโดยไม่ใช้ค่าของอัตราขยายได้ดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงไดอะแกรมของระบบโดยไม่ใช้ค่าอัตราขยาย

ผลตอบสนองที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.13



รูป 4.13 รูปของระบบ $\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.8}{s^2 + 0.32s + 0.8}$ ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB

ที่ t = 3.206

$\tau = \alpha t = 0.001 * 3.206 = 0.003206$ sec

ค่าผลลัพธ์จากตำแหน่งเวลาของอนาลอกเท่ากับ 1.5

ค่าของผลลัพธ์จริงจะมีค่าเท่ากับ 1.5 * 2 = 3

ที่ t = 5

$\tau = \alpha t = 0.001 * 5 = 0.005$ sec

ค่าผลลัพธ์จากตำแหน่งเวลาของอนาลอกเท่ากับ 1.105

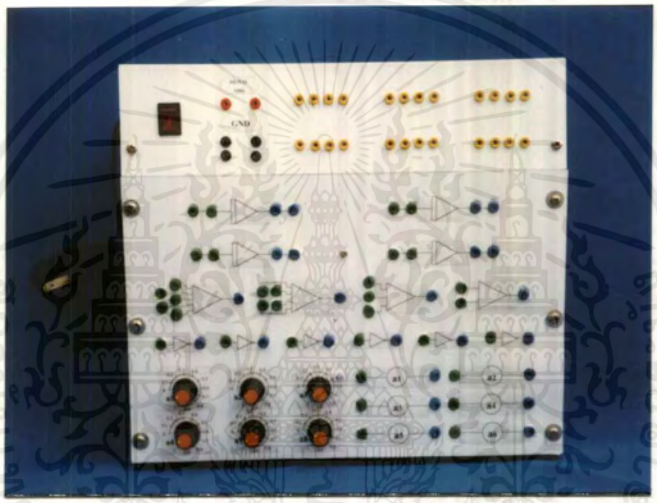
ค่าของผลลัพธ์จริงจะมีค่าเท่ากับ 1.105 * 2 = 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์

5.1 ลักษณะชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์

ชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะตามรูปที่ 5.1 และ 5.2



รูปที่ 5.1 แสดงด้านหน้าของชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์

รูปที่ 5.2แสดงด้านข้างของชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. วงจรอินทิเกรเตอร์ 4 ชุด

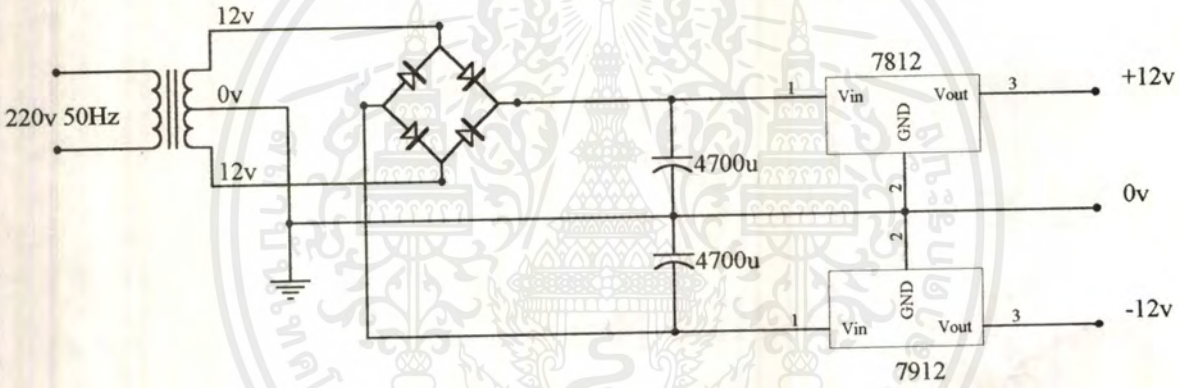
2. วงจรรวมสัญญาณ

- 5 อินพุท 1 ชุด
- 4 อินพุท 1 ชุด
- 3 อินพุท 1 ชุด
- 2 อินพุท 1 ชุด

3. วงจรกลับเฟสสัญญาณ 6 ชุด

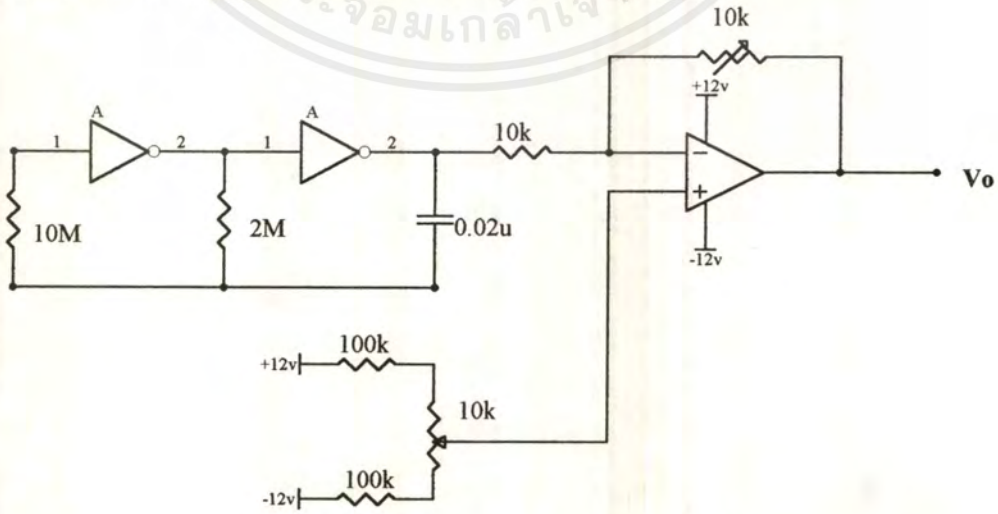
4. วงจรลดทอนสัญญาณ 6 ชุด

5. วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงขนาด $\pm$ 12 โวลท์ ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

6. วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม ความถี่ 11.36 Hz ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จุดเชื่อมสัญญาณ 6 ชุด

8. จุดกราวด์ 1 ชุด

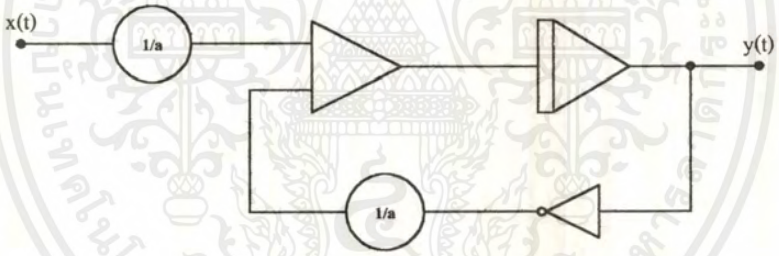
5.2 การใช้งานชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์

การใช้งานอนาลอกคอมพิวเตอร์สิ่งที่ต้องทำอันดับแรกคือ การจัดรูปสมการทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานอนาลอกคอมพิวเตอร์ดังนี้

1. จัดสมการทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ โดยให้ตัวแปรที่มีอันดับสูงสุดอยู่ทางด้านซ้ายมือและค่าสัมประสิทธ์ข้างหน้าเป็น 1 ซึ่งไดอะแกรมของระบบอันดับต่าง ๆ มีดังนี้

- ระบบอันดับหนึ่ง

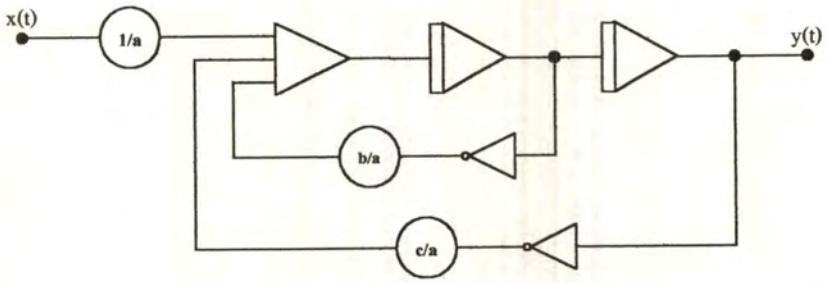
$$\frac{dy(t)}{dt} = -\frac{1}{a}y(t) + \frac{1}{a}x(t)$$



รูป 5.5 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับหนึ่ง

- ระบบอันดับสอง

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -\frac{b}{a}\frac{dy(t)}{dt} - \frac{c}{a}y(t) + \frac{1}{a}x(t)$$

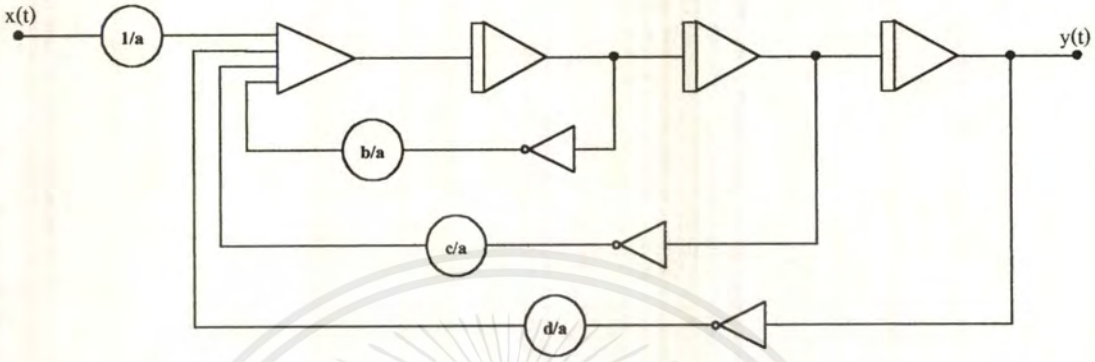


รูปที่ 5.6 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบอันดับสาม

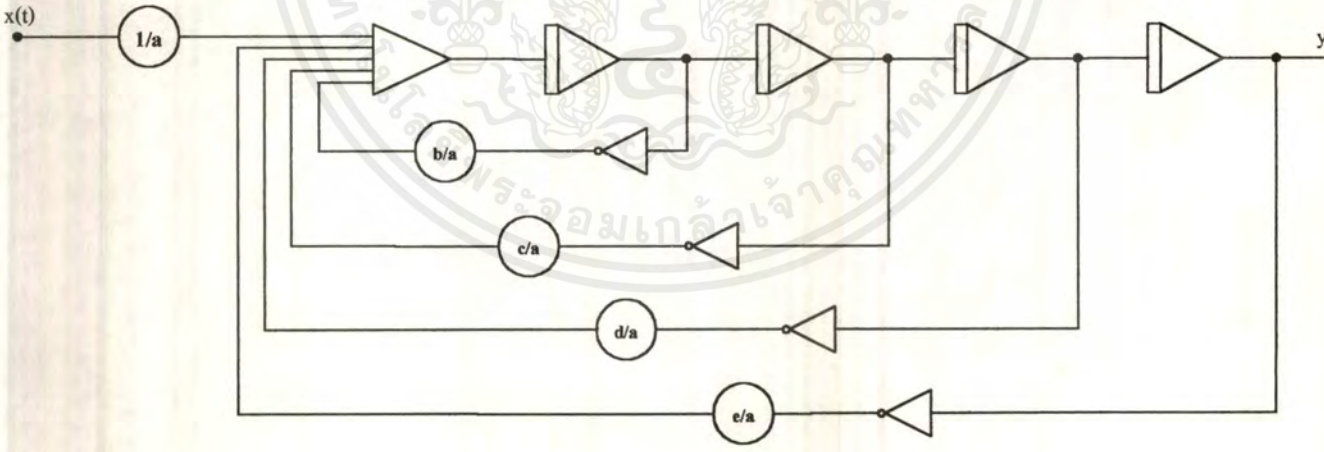
$$\frac{d^3y(t)}{dt^3} = -\frac{b}{a}\frac{d^2(t)}{dt^2} - \frac{c}{a}\frac{dy(t)}{dt} - \frac{d}{c}y(t) + \frac{1}{a}x(t)$$



รูป 5.7 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับสาม

- ระบบอันดับสี่

$$\frac{d^4y(t)}{dt^4} = -\frac{b}{a}\frac{d^3y(t)}{dt^3} - \frac{c}{a}\frac{d^2y(t)}{dt^2} - \frac{d}{a}\frac{dy(t)}{dt} - \frac{e}{a}y(t) + \frac{1}{a}x(t)$$



รูป 5.8 แสดงไดอะแกรมของระบบอันดับสี่

หลังจากทำการจัดรูปสมการเรียบร้อยแล้วถ้าค่า τ ของสมการมีค่ามากกว่าหนึ่ง หรือน้อยกว่าหนึ่ง ต้องทำการสเกลเวลา เพื่อให้อนาลอกคอมพิวเตอร์สามารถแสดงผลลัพธ์ของสมการออกมาได้ แล้วใส่ตัวคูณของระบบ เมื่อสมการที่นำมาพิจารณาเป็นของระบบอันดับหนึ่งและอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ตัวอย่างการใช้งานชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์

ตัวอย่างที่ 5.1

$$\frac{dy(t)}{dt} + \sqrt{2}y(t) = \sqrt{2}x(t)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = -\sqrt{2}y(t) + \sqrt{2}x(t)$$

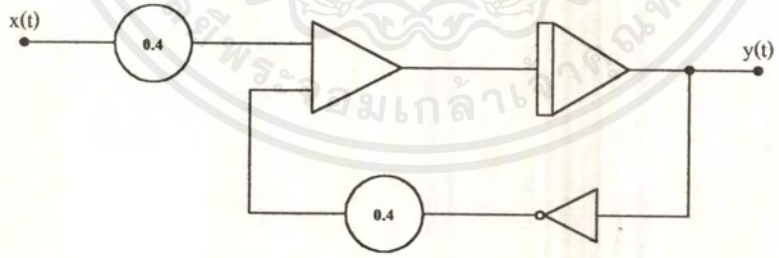
จากสมการที่ 3. 5 ดังนั้นสมการนี้มี $\tau = 0.707$ และมี $K = 1$

ใส่ตัวคูณที่มีค่าเท่ากับ $(0.2/\tau) = (0.2/0.707) = 0.2828$ ทางด้านขวามือของสมการเพื่อทำการสเกลเวลา จะได้

$$\frac{dy(t)}{dt} = -(\sqrt{2} * 0.2828)y(t) + (\sqrt{2} * 0.2828)x(t)$$

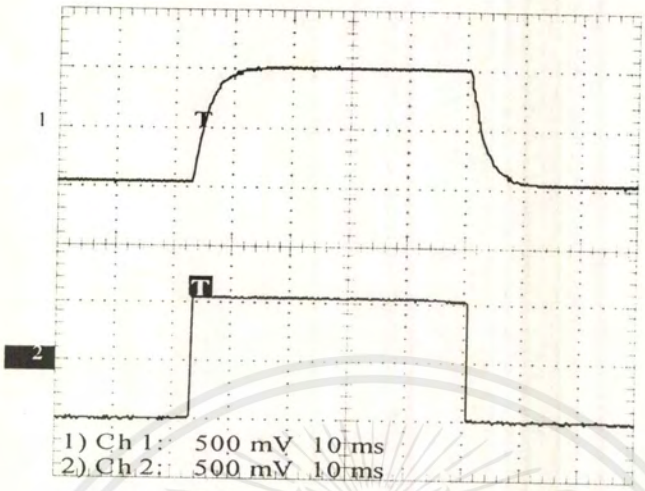
$$\frac{dy(t)}{dt} = -0.4y(t) + 0.4x(t)$$

จะได้ไดอะแกรมดังรูปที่ 5.9

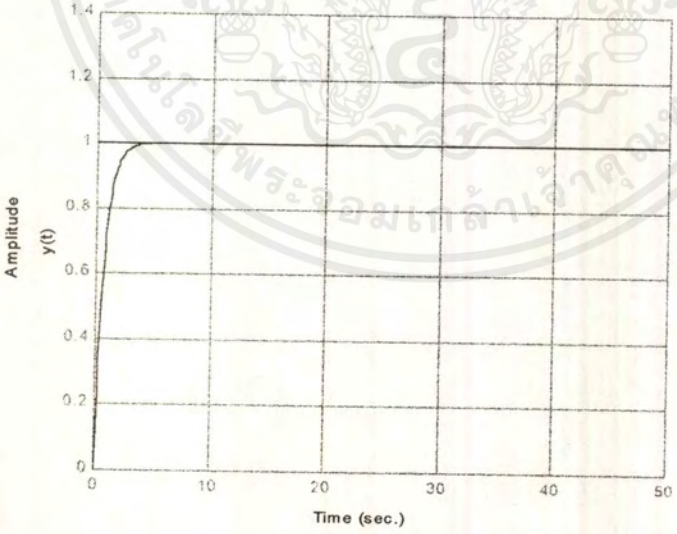


รูปที่ 5.9 แสดงไดอะแกรมของสมการ $\frac{dy(t)}{dt} = -\sqrt{2}y(t) + \sqrt{2}x(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{dy(t)}{dt} = -\sqrt{2}y(t) + \sqrt{2}x(t)$ ที่ได้จากอนาลอกคอมพิวเตอร์



รูป 5.11 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{dy(t)}{dt} = -\sqrt{2}y(t) + \sqrt{2}x(t)$ จากการใช้โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 5.2

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 6\frac{dy(t)}{dt} + 25y(t) = 25x(t)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -6\frac{dy(t)}{dt} - 25y(t) + 25x(t)$$

จากสมการที่ 3. 7 ระบบนี้จึงมี k=1 และมี $\tau = \frac{1}{W_n} = \frac{1}{5}$ เห็นว่าค่าของ τ น้อยกว่า 1 จึงทำการสเกลเวลาโดยขยายสเกล 5 เท่า

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -\frac{6}{5}\frac{dy(t)}{dt} - \frac{25}{5^2}y(t) + \frac{25}{5^2}x(t)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -1.2\frac{dy(t)}{dt} - y(t) + x(t)$$

สมการที่ถูกสเกลเวลาจะมีค่า $\tau = \frac{1}{W_n} = 1$ แล้วค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ตัวใหม่จะมีค่าเท่ากับ 0.001*1= 0.001

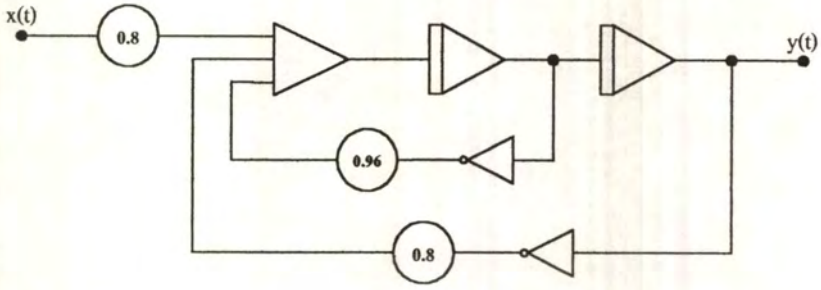
เมื่อทำการสเกลเวลาแล้ว ลำดับต่อไปจึงทำการใส่ตัวคูณของระบบอันดับสองที่มีค่าเท่ากับ 0.8 เข้ากับทางด้านขวาของสมการ

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -(1.2*0.8)\frac{dy(t)}{dt} - (1*0.8)y(t) + (1*0.8)x(t)$$

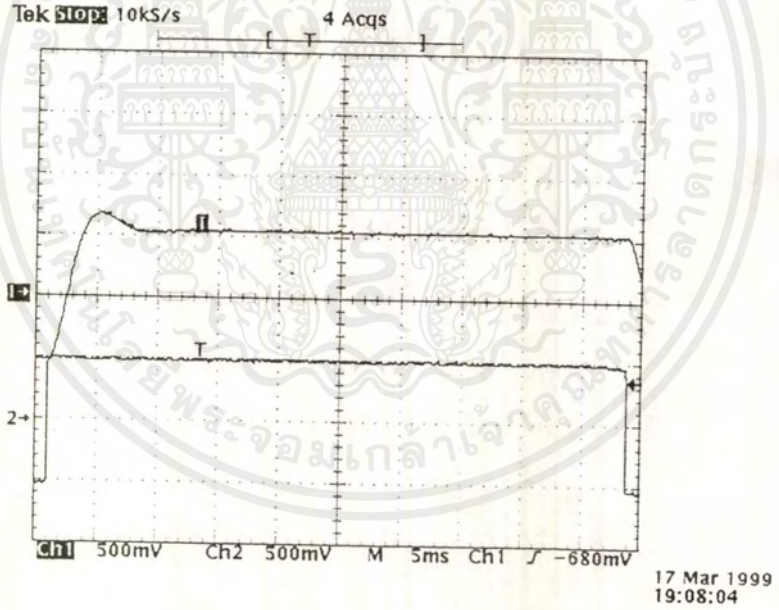
$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -0.96\frac{dy(t)}{dt} - 0.8y(t) + 0.8x(t)$$

จะได้ไดอะแกรมดังรูปที่ 5.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



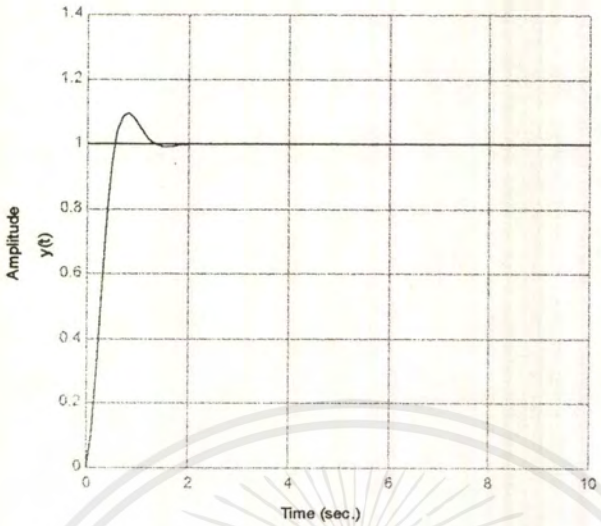
รูปที่5.12 แสดงไดอะแกรมของระบบ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -6\frac{dy(t)}{dt} - 25y(t) + 25x(t)$



รูปที่ 5.13 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -6\frac{dy(t)}{dt} - 25y(t) + 25x(t)$ ที่ได้จากอนาลอกคอมพิวเตอร์

การทราบผล ณ. เวลา t ใดใด นั้นจะใช้ความสัมพันธ์ $\tau = \alpha t$ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นเวลาของอนาลอกคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 แสดงผลลัพธ์ของสมการ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -6\frac{dy(t)}{dt} - 25y(t) + 25x(t)$ จากการใช้โปรแกรม MATLAB

โดยจะสามารถหาค่าผลลัพธ์ของสมการที่เวลา t ต่าง ๆ ได้ดังนี้

ที่ t = 1 วินาที $\tau = \alpha t = 0.001*1 = 0.001$, y(t) = 0.24 โวลท์

ที่ t = 2 วินาที $\tau = \alpha t = 0.001*2 = 0.002$, y(t) = 0.72 โวลท์

ที่ t = 5 วินาที $\tau = \alpha t = 0.001*5 = 0.005$, y(t) = 1.18 โวลท์

ที่ t = 10 วินาที $\tau = \alpha t = 0.001*10 = 0.01$, y(t) = 1.04 โวลท์

ที่ t = 15 วินาที $\tau = \alpha t = 0.001*15 = 0.015$, y(t) = 1.04 โวลท์

ตัวอย่างที่ 5.3

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 0.12\frac{dy(t)}{dt} + 0.04y(t) = 0.08x(t)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -0.12\frac{dy(t)}{dt} - 0.04y(t) + (2*0.04)x(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.7 ระบบนี้จึงมี k=2 และมี $\tau = \frac{1}{W_n} = \frac{1}{0.2}$ เห็นว่าค่าของ τ มากกว่า 1 จึงทำการลดสเกลเวลา ลง 2.5 เท่า และต้องลดสเกลขนาดลงเท่ากับ 2

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -(0.12*2.5)\frac{dy(t)}{dt} - (0.04*(2.5)^2)y(t) + (0.04*(2.5)^2)x(t)$$

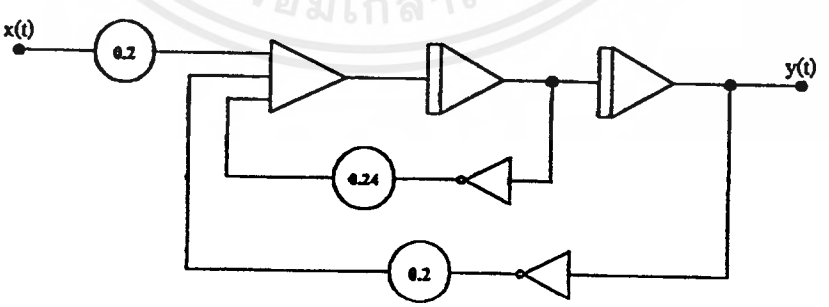
$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -0.3\frac{dy(t)}{dt} - 0.25y(t) + 0.25x(t)$$

สมการที่ถูกสเกลเวลาจะมีค่า τ เท่ากับ $\frac{1}{0.5}$ แล้วค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์ตัวใหม่จะมีค่าเท่ากับ $0.001*\sqrt{0.25} = 0.0005$ เมื่อทำการสเกลเวลาแล้ว ลำดับต่อไปจึงทำการใส่ตัวคูณของระบบอันดับสองที่มีค่าเท่ากับ 0.8 เข้ากับทางด้านขวาของสมการ

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -(0.3*0.8)\frac{dy(t)}{dt} - (0.25*0.8)y(t) + (0.25*0.8)x(t)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -0.24\frac{dy(t)}{dt} - 0.2y(t) + 0.2x(t)$$

จะได้ไดอะแกรมดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แสดงไดอะแกรมของระบบ $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -0.12\frac{dy(t)}{dt} - 0.04y(t) + 0.04x(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะสามารถหาค่าผลลัพธ์ของสมการที่เวลา t ต่าง ๆ ได้ดังนี้

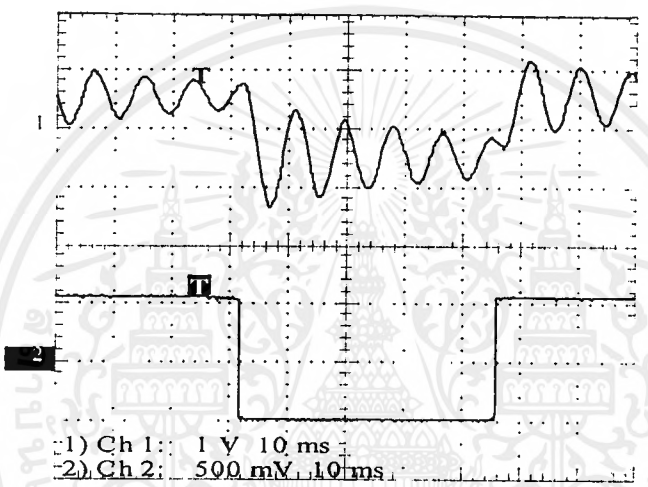
ที่ t = 20 วินาที $\tau = \alpha t = 0.0005*20 = 0.01$, $y(t) = 2*1.175 = 2.35$ โวลท์

ที่ t = 35 วินาที $\tau = \alpha t = 0.0005*35 = 0.0175$, $y(t) = 2*0.956 = 1.912$ โวลท์

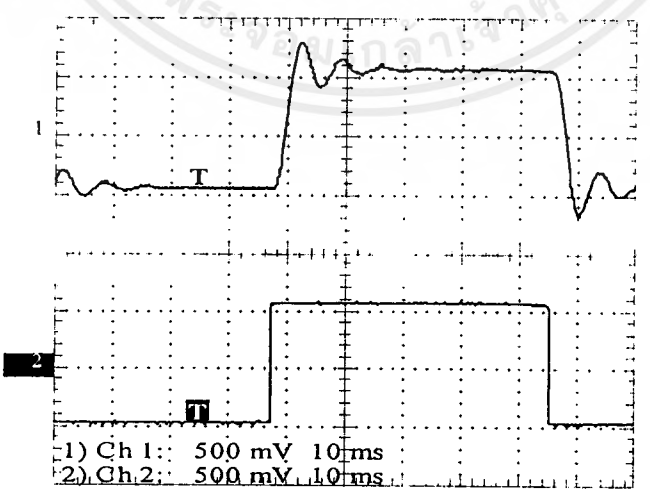
ที่ t = 50 วินาที $\tau = \alpha t = 0.0005*50 = 0.025$, $y(t) = 2*1 = 2$ โวลท์

ที่ t = 90 วินาที $\tau = \alpha t = 0.0005*90 = 0.045$, $y(t) = 2*1 = 2$ โวลท์

ตัวอย่างที่ 5.4 สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสาม และอันดับสี่

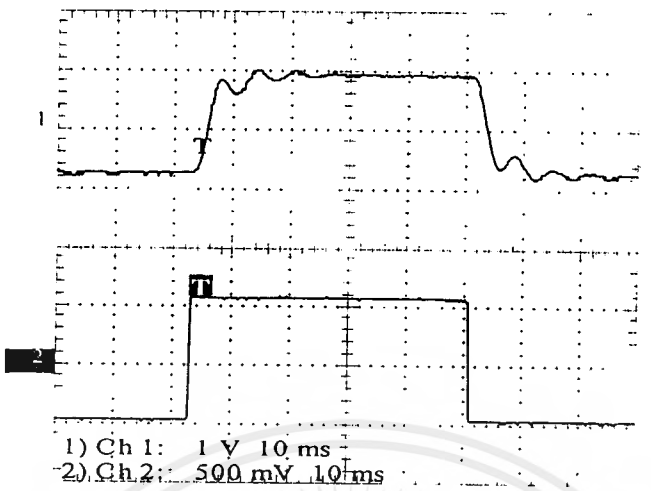


ก.

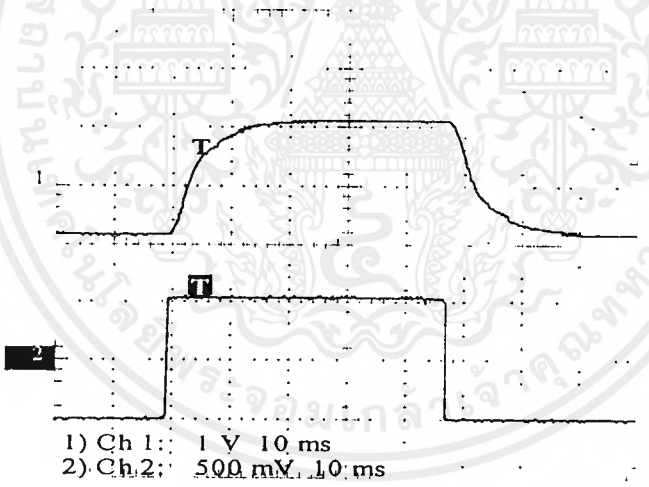


ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค.



ง.

รูปที่ 5.18 แสดงผลตอบสนองของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสามที่ได้จากอนาลอกคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 5.18 แสดงผลตอบสนองของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสามที่ได้จากอนาลอกคอมพิวเตอร์โดยการปรับตัวลดทอนสัญญาณ ณ. ตำแหน่งต่าง ๆ ตามไดอะแกรมของอนาลอกคอมพิวเตอร์ แล้วนำค่าที่ได้จากการปรับตัวลดทอนมาเขียนเป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันเพื่อพิจารณาตำแหน่งรากของสมการที่มีผลต่อการแสดงผลตอบสนองดังตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน จากตัวลดทอน	ตำแหน่งของรากสมการ บนระนาบเอส
รูปที่ 5.18 ก	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.46}{s^3 + 0.925s^2 + 0.58s + 0.47}$	-0.876 , -0.0247±0.7322j
รูปที่ 5.18ข	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.46}{s^3 + 0.928s^2 + s + 0.47}$	-0.5675 , -0.1720±0.878j
รูปที่ 5.18ค	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.46}{s^3 + 0.54s^2 + s + 0.47}$	-0.3432 , -0.0984±0.960j
รูปที่ 5.18ง	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.46}{s^3 + 0.95s^2 + s + 0.17}$	-0.200 , -0.3250±0.8422j

ตารางที่ 5.1 แสดงทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน และรากของสมการคุณลักษณะที่ได้จากการปรับตัวลดทอนของอนาลอกคอมพิวเตอร์

จากตารางที่ 5.1 ค่ารากสมการที่ได้จากทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของการปรับตัวลดทอนสัญญาณนั้น สามารถนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นได้เหมือนกับการทราบค่ารากสมการจริง พิจารณาได้นี้

- เมื่อรากสมการจริงลบอยู่ทางซ้ายมือของรากคอมเพลกซ์คอนจูเกต ถ้าหากว่ารากจำนวนจริงอยู่ห่างจากจุดกำเนิดมากกว่ารากที่เป็นคอมเพลกซ์คอนจูเกต และเมื่อรากจำนวนจริงลบนี้เคลื่อนไปตามแกนจริงลบเข้าไปหารากคอมเพลกซ์คอนจูเกตทำให้ผลของการเคลื่อนรากจริงลบมีผลต่อผลตอบสนองรวมของระบบมากขึ้น คือผลตอบสนองจะเฉื่อยลงหรือมีค่าเวลาคงตัวมากขึ้น ดังรูปที่ 5.18ก ,5.18ข ,5.18ค

- เมื่อรากจำนวนจริงลบอยู่ทางด้านขวาของรากคอมเพลกซ์คอนจูเกต และอยู่ใกล้จุดกำเนิดมากกว่าจะทำให้ รากสมการตัวนี้กลายเป็นรากสมการที่มีผลต่อผลตอบสนองโดยรวมของระบบมากกว่ารากที่เป็นคอมเพลกซ์คอนจูเกตซึ่งผลที่ได้จะมีลักษณะคล้ายผลตอบสนองจากระบบอันดับหนึ่งดังรูปที่ 5.18ง

ส่วนผลตอบสนองของระบบดันดับสี่ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับของระบบอันดับสามและมีหลักการในการพิจารณาการตอบสนองของระบบเช่นเดียวกับระบบอันดับสาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและวิจารณ์

สรุป

จากการทดสอบวงจรทั้งหมดที่ใช้ในชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ปรากฏว่าวงจรทั้งหมดทำงานได้ตามต้องการ และเมื่อนำวงจรทั้งหมดบรรจุกล่องเป็นชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์แล้วทำการต่อวงจรต่าง ๆ ให้มีสมการทางคณิตศาสตร์เหมือนกับปัญหาที่นำมาหาคำตอบ ปรากฏว่าชุดทดลองสามารถแก้สมการเชิงอนุพันธ์ได้แต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่ดีเท่าที่ควร

ปัญหาที่พบ

จากโครงงานที่ทำมานั้นได้พบปัญหาอยู่หลายส่วน ซึ่งสามารถพิจารณาและวิเคราะห์ถึงปัญหาได้ว่าเกิดมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. ปัญหาผลลัพธ์ที่ได้จากชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์คลาดเคลื่อนจากทฤษฎี ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์วัดและแสดงผลที่ไม่สามารถแสดงผลได้ละเอียดพอ

2. ปัญหาในการเลือกค่าไทม์สเกลลิ่งแฟคเตอร์และตัวคูณของระบบ เนื่องจากต้องมีการทำการทดลองเปรียบเทียบค่าจากตัวอย่างที่นำมาใช้เป็นจำนวนมาก และผลที่ได้ออกมามีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงใดช่วงหนึ่ง ดังนั้นค่าที่นำมาใช้อาจจะไม่ถูกต้อง 100% จึงมีผลต่อการใช้งานของชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์

แนวทางการแก้ไข

สามารถวางแนวทางในการแก้ไขโดยคร่าว ๆ คือ

1. การแก้ปัญหาจากความผิดพลาดจากการวัดนั้นจะต้องเลือกใช้อุปกรณ์วัดและแสดงผลที่สามารถวัดค่าได้ละเอียด เช่น ออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอลที่สามารถวัดค่าได้ละเอียด และยังสามารถเก็บผลจากการวัดได้ด้วย

2. การแก้ไขในด้านอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ที่นำมาใช้ได้ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่มีค่าความผิดพลาดน้อย

วิจารณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทำโครงงานได้พบปัญหาที่ต้องหาวิธีการแก้ไขให้ได้ เพื่อให้งานที่รับผิดชอบสำเร็จ ซึ่งในบางครั้งปัญหาที่พบเป็นปัญหาที่ไม่คาดคิดว่าจะเกิดขึ้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุและทำการแก้ไข ซึ่งทำให้เข้าใจถึงการทำงานของชุดทดลองอนาลอกคอมพิวเตอร์ โดยคาดว่าจะสามารถนำโครงงานนี้ไปพัฒนาและปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นไปและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

มงคล ทองสงคราม, **อิเล็กทรอนิคส์ 2**, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พริ้นติ้ง, กรุงเทพฯ,2536

สุเธียร เกียรติสุนทร, **พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรม**,ส่วนตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโลยี(ไทย - ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ,2540

D. E. HYNDMAN, **Analog and Hybrid Computer**, Biddles Ltd.,Guildford, 1977

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

Katsuhiko Ogata, **Modern Control Engineering 2nd ed.**, Premtice-Hall International Editions, New Jersey,1990

M.L. James , G.M. Smith, J.C. Wolford, **Analog-Computer Simulation Engineering System**, 2nd ed ,The Hadden Craftsmen.Inc, Pennsylvania, 1967

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

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

.....

(นายกิตติพงศ์ อินวอ)

.....

(นางสาวนิรินธร เสรีพิทักษ์)

.....

(นาวสาวอังศุมาลี เถลิงศรี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้