สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมแบบอะแดพทีฟ

Adaptive control



โดย

นางสาวสุภาพร ปานิคม

นายสุริยเดช ภูทำนอง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 50188
วัน,เดือน,ปี 27 เม.ย. 2547

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมแบบอะแดพทีฟ

ผู้จัดทำ

1. นางสาวสุภาพร ปานิคม รหัสประจำตัว 43015335

2. นายสุริยเดช ภูทำนอง รหัสประจำตัว 43015337

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. พรสุข รติโรจน์อนันต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแบบอะแดพทีฟ

Adaptive control

นางสาวสุภาพร ปานิคม
นายสุริยเดช ภูทำนอง
ผศ. พรสุข รติโรจน์อนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาทฤษฎีการควบคุมแบบอะแดพทีฟ โดยการนำเอาทฤษฎีการควบคุมแบบอะแดพทีฟ มาเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการทำงานทั้งหมด เริ่มตั้งแต่การติดตามหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ ด้วยวิธีรีเคอร์ซีพลีทสแควร์ (RLS) จนถึงการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีการวางโพล และควบคุมเอาท์พุตให้เป็นไปตามค่าอ้างอิงได้

Abstract

This thesis present the Adaptive control theorem and write simulation program in three part; system parameter estimation using Recursive Least Square method, Adaptive controller design using Poles placement and improve the output response using reference model. The simulation program show the good simulation result in case of no noise and add noise to the system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์ 2

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ 3

2.1 การหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบ 3

2.1.1 ตัวควบคุมแบบดิจิตอล 3

2.1.2 การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีทำซ้ำ 4

2.1.2.1 โครงสร้างลีทสแควร์ 4

2.1.2.2 โครงสร้างของรีเคอร์ซีฟลีทสแควร์ 7

2.1.2.3 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 9

2.2 การออกแบบตัวควบคุมอะแดพทีฟโดยวิธีโพลเพลซเมนท์ 10

2.2.1 การออกแบบตัวควบคุมภายใต้เงื่อนไขอุดมคติ 10

2.2.2 อันดับของตัวควบคุม R-S-T 14

2.2.3 การลดผลรบกวนและการติดตาม 15

บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง 18

3.1 การติดตามหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ โดยวิธีรีเคอร์ซีฟลีทสแควร์ 18

3.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโพลเพลซเมนต์ 19

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 21

4.1 การติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์โดยใช้วิธี RLS 21

4.2 การหาระบบควบคุมระบบโดยใช้วิธี อะแดพทีฟโพลเพลซเมนท์ 34

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป 51

5.1 สรุปผลการปฏิบัติงาน 51

5.2 ปัญหาในการทำงานและการแก้ไข 52

5.3 ผลที่ได้รับจากโครงงานนี้ 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4 แนวทางในการพัฒนา 54

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวควบคุมดิจิตอล R-S-T 3

รูปที่ 2.2 การติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ด้วยวิธี RLS 7

รูปที่ 3.1 แสดงตัวควบคุมที่ใช้ร่วมกับระบบควบคุมแบบอะแดพทีฟ 10

รูปที่ 3.2 พฤติกรรมการลดผลรบกวนและการติดตาม 16

รูปที่ 4.1 แสดง สัญญาณอินพุตแบบ Square wave 22

รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ สมการผลต่าง
เมื่อระบบมีค่า Damping ratio (ζ) = 0.2 ; ω_n = 15 23

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์
เมื่อระบบมีค่า Damping ratio (ζ) = 0.2 ; ω_n = 15 24

รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ สมการผลต่าง
เมื่อระบบมีค่า Damping ratio (ζ) = 0.8 ; ω_n = 15 26

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์
เมื่อระบบมีค่า Damping ratio (ζ) = 0.8 ; ω_n = 15 27

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์
เมื่อค่า Adaptation gain (γ) = 10^2 28

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์
เมื่อค่า Adaptation gain (γ) = 10^5 29

รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของระบบ เมื่อพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง 30

รูปที่ 4.9 แสดงการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ใหม่ เมื่อระบบ
มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ 31

รูปที่ 4.10 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อระบบมีสัญญาณรบกวน 32

รูปที่ 4.11 แสดงผลการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ เมื่อระบบมีสัญญาณรบกวน 33

รูปที่ 4.12 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อค่า α มีค่า 0.1 35

รูปที่ 4.13 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อค่า α มีค่า 0.2 36

รูปที่ 4.14 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อค่า α มีค่า 0.3 37

รูปที่ 4.15 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อค่า α มีค่า 0.4 38

รูปที่ 4.16 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อค่า α มีค่า 0.5 39

รูปที่ 4.17 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อค่า α มีค่า 0.6 40

รูปที่ 4.18 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อค่า α มีค่า 0.7 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อค่า α มีค่า 0.8 42

รูปที่ 4.20 แสดงผลการตอบสนองของระบบ เมื่อค่า α มีค่า 0.9 43

รูปที่ 4.21 แสดงผลการตอบสนองของระบบ
เมื่อค่า ζ ของ Reference Model มีค่า 0.3 44

รูปที่ 4.22 แสดงผลการตอบสนองของระบบ
เมื่อค่า ζ ของ Reference Model มีค่า 0.4 45

รูปที่ 4.23 แสดงผลการตอบสนองของระบบ
เมื่อค่า ζ ของ Reference Model มีค่า 0.5 46

รูปที่ 4.24 แสดงผลการตอบสนองของระบบ
เมื่อค่า ζ ของ Reference Model มีค่า 0.6 47

รูปที่ 4.25 แสดงผลการตอบสนองของระบบ
เมื่อค่า ζ ของ Reference Model มีค่า 0.7 48

รูปที่ 4.26 แสดงผลการตอบสนองของระบบ
เมื่อค่า ζ ของ Reference Model มีค่า 0.8 49

รูปที่ 4.27 แสดงผลการตอบสนองของระบบ
เมื่อค่า ζ ของ Reference Model มีค่า 0.9 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาทฤษฎีการควบคุมแบบ อะแดพทีฟ กันอย่างแพร่หลาย ทั้งการวิจัยและการทดลอง แต่การนำทฤษฎีการควบคุมแบบอะแดพทีฟไปใช้กับระบบจริงยังไม่พบมากนัก โครงงานนี้เป็นการนำเอาทฤษฎีการควบคุมแบบอะแดพทีฟมาจำลองการทำงาน ในขั้นเริ่มต้นโครงงานจะเป็นการเขียนโปรแกรมภาษาซีจำลอง ระบบอันดับสอง(second order)ขึ้นมา แล้วเขียนโปรแกรมติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ (parameter identification) ของระบบนี้

หลักการสำคัญของการควบคุมแบบอะแดพทีฟ คือ การติดตามหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบ เพื่อที่จะนำค่าพารามิเตอร์ไปทำการออกแบบตัวควบคุม การติดตามหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ มีด้วยกันหลายวิธีในโครงงานนี้ใช้วิธี Recursive Least Square (RLS) เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณค่า(estimated parameter) แล้วจะนำไปทำการออกแบบตัวควบคุม(controller) สำหรับการออกแบบตัวควบคุม จะใช้วิธีการวางโพล (poles placement)

1.1 ความเป็นมา

เป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้งานระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆที่ใช้กันมีหลายแบบ เช่น ระบบควบคุมแบบ PID และ ระบบควบคุมแบบ Fuzzy logic ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น ต่างก็ได้มีการศึกษา วิจัย ทำการทดลองมามากแล้ว การควบคุมแบบอะแดพทีฟเป็นอีกแบบหนึ่งที่มีมานาน แต่การนำไปใช้งานจริงยังไม่ค่อยมีมากนัก ยังเป็นงานวิจัยอยู่มาก ข้อดีของการควบคุมแบบ อะแดพทีฟที่แตกต่างจากระบบควบคุมอื่นคือ เมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างขึ้น หรือเปลี่ยนแปลงในปริมาณมาก ระบบยังคงสามารถควบคุมได้ เพราะมีการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ตามเวลาจริง และนำค่าพารามิเตอร์ใหม่นี้ไปออกแบบระบบควบคุมใหม่ให้สอดคล้องกับพารามิเตอร์ใหม่ของระบบที่เปลี่ยนไป ซึ่งในระบบอื่นไม่มีการออกแบบระบบใหม่เมื่อพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง จึงควบคุมไม่ได้ดีเท่ากับระบบควบคุมที่เป็นแบบอะแดพทีฟ เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถของระบบควบคุมแบบอะแดพทีฟ ดังกล่าว จึงได้ทำโครงงานนี้เพื่อศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบ ที่ไม่ทราบค่าของระบบโดยใช้วิธี Recursive Least Square หรือ RLS เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ไปออกแบบตัวควบคุมในระบบควบคุมแบบอะแดพทีฟ โดยใช้วิธีการวางโพล เริ่มจาก การสร้างโปรแกรมการหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบที่ไม่ทราบค่าด้วยการใช้โปรแกรม Matlab และภาษาซี ในเบื้องต้นได้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Matlab สร้างโปรแกรมหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ และการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จนสำเร็จ จึงได้ใช้แนวคิดในการเขียนโปรแกรมนี้ไปเขียนโปรแกรมภาษาซี จนทำงานได้สำเร็จเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาหลักการควบคุมแบบอะแดพทีฟ
2. ศึกษาการหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ด้วยวิธี RLS
3. ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี อะแดพทีฟโพลเพลซเมนท์
4. ออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ควบคุมกระบวนการโดยใช้หลักการควบคุมแบบอะแดพทีฟ

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาหลักการควบคุมแบบอะแดพทีฟ
2. เขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีเพื่อ
   - หาเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบ
   - ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอะแดพทีพโพลเพลซเมนท์
3. ทดลองหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบเมื่อพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง
4. ทดลองออกแบบตัวควบคุมเมื่อพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง
5. เก็บผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่2
ทฤษฎีและหลักการ

2. การหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบ

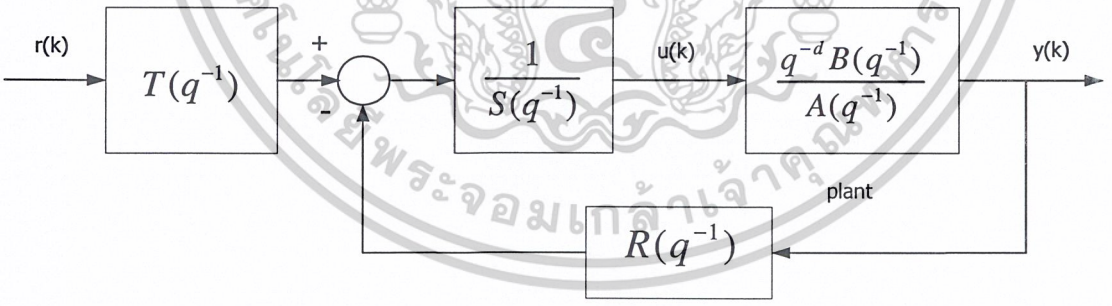
การติดตามหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ที่จะกล่าวต่อไป จะใช้วิธี Recursive Least Squares (RLS)

2.1.1 ตัวควบคุมแบบดิจิตอล

ตัวควบคุมดิจิตอล R-S-T มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.1 *r(k)* คือ อินพุตอ้างอิง *u(k)* คือ อินพุตควบคุม และ *y(k)* คือ เอาท์พุต ของระบบ (plant) ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการคือ

$$G_p\ (q^{-1}) = \frac{q^{-d}B(q^{-1})}{A(q^{-1})}$$

เมื่อ *d* คือ เวลาดีเลย์ (delay time)



รูปที่ 2.1 ตัวควบคุมดิจิตอลR-S-T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$S(q^{-1})$ และ $R(q^{-1})$ คือ ตัวชดเชย $T(q^{-1})$ คือตัวกรอง ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิดคือ

$$H_{CL}\ (q^{-1}) = \frac{q^{-d}B(q^{-1})T(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-1}B(q^{-1})R(q^{-1})} \tag{2.1}$$

$A(q^{-1})$ = ตัวส่วนของ plant (plant denomenator)

$$= 1 + a_1 q^{-1} + \ldots + a_n q^{-n} \tag{2.2}$$

$B(q^{-1})$ = ตัวเศษของ plant (plant numerator)

$$= b_0 + b_1 q^{-1} + \ldots + b_{um} q^{-m} \tag{2.3}$$

n และ m คืออันดับของ $A(q^{-1})$ และ $B(q^{-1})$

โพลิโนเมียลวงปิดคือ $D(q^{-1}) = A(q^{-1})\,S(q^{-1}) + q^{-d}\,B(q^{-1})\,R(q^{-1})$ (2.4)

$$= 1 + d_1 q^{-1} + \ldots + d_{nd} q^{-nd}$$

2.1.2 การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีทำซ้ำ (Recursive System Identification)

เมื่อระบบที่ต้องการควบคุมไม่ทราบค่าพารามิเตอร์หรือค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาการควบคุมระบบดังกล่าวควรใช้ตัวควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามที่พารามิเตอร์เปลี่ยน วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่นิยมคือวิธี รีเคอร์ซีฟลีสแควร์ (Recursive Least Square) เป็นวิธีหาค่าพารามิเตอร์แบบเรียลไทม์ (real-time) โดยใช้หลักการพื้นฐานจากลีทสแควร์ (Least Square)

2.1.2.1 โครงสร้างลีทสแควร์ (Least Square Algorithm)

หลักการของลีทสแควร์ มีพื้นฐานจากการทำซ้ำเชิงเส้น (linear regressive) โดยมีแบบจำลองอย่างง่าย ดังสมการ

$$y(k) = \varphi^{T}(k)\theta \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า $y(k)$ คือค่าเอาท์พุต, $\varphi(k)$ คือ เวคเตอร์, θ^T คือ เวคเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของพารามิเตอร์ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างเอาท์พุต $y(k)$ และอินพุตควบคุม $u(k)$ คือ

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{b_0 + b_1 q^{-1} + \ldots\ldots + b_m q^{-m}}{1 + a_1 q^{-1} + \ldots\ldots + a_n q^{-n}} \tag{2.6}$$

เอาท์พุตของกระบวนการ เขียนให้อยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนท์เชียล เท่ากับ

$$y(k) = -\sum_{i=1}^{n} a_i\, y(k-i) + \sum_{i=0}^{m} b_i\, u(k-i) \tag{2.7}$$

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - \ldots - a_n y(k-n) + b_0 u(k) + \ldots + b_m u(k-m) \tag{2.8}$$

จากสมการที่ (2.8) เวคเตอร์ $\varphi^T(k)$ และพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ^T คือ

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1) \;\; y(k-2) \;\; \ldots - y(k-n) \;\; u(k) \;\; u(k-1) \ldots u(k-m)] \tag{2.9}$$

$$\theta^T = [\, a_1 \;\; a_2 \ldots a_n \;\; b_0 \;\; b_1 \ldots b_m \,] \tag{2.10}$$

สมการที่ (2.5) สามารถเขียนใหม่ได้

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + e(k) \tag{2.11}$$

สำหรับแบบจำลองที่สมมุติขึ้นมาเขียนเป็นสมการได้

$$\hat{y}(k) = \varphi^T(k)\hat{\theta} \tag{2.12}$$

$\hat{y}(k)$ คือ เอาท์พุตที่เกิดจากการทำนาย , $\hat{\theta}$ คือเวคเตอร์ของพารามิเตอร์ที่เกิดจากการทำนายมีค่า

$$\hat{\theta} = [\, \hat{a}_1 \;\; \hat{a}_2 \;\; \ldots \;\; \hat{a}_n \;\; \hat{b}_0 \;\; \hat{b}_1 \ldots \hat{b}_m \,] \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลต่างระหว่าง $y(k)$ และ $\hat{y}(k)$ คือความผิดพลาดของเอาท์พุตจริงกับเอาท์พุตที่เกิดจากการทำนายสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$\varepsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta} \tag{2.14}$$

เวคเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า หาได้จากการทำให้ $\varepsilon(k)$ มีค่าน้อยที่สุดดังสมการ

$$V(\theta) = \sum_{k=1}^{N} \varepsilon^2(k) = \varepsilon^T(k)\varepsilon(k) \tag{2.15}$$

$$= [y(k) - \theta^T(k)\hat{\theta}]^T [y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}]$$

ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเท่ากับ

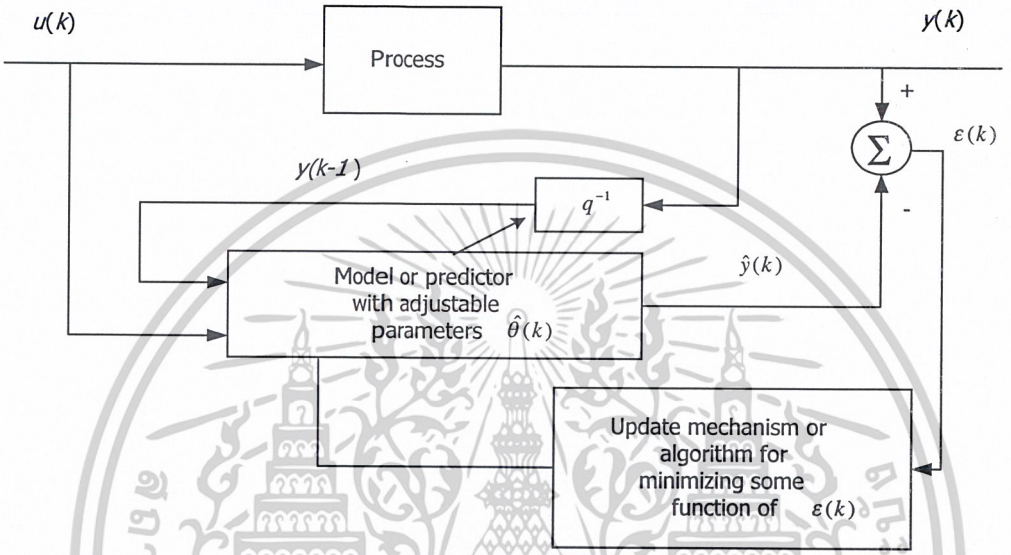
$$\hat{\theta} = [\sum_{k=1}^{N} \varphi(k)\varphi^T(k)]^{-1} \sum_{k=1}^{N} \varphi(k)y(k) \tag{2.16}$$

$$= [Z^T Z]^{-1} Z^T y \quad \text{โดยที่ค่า} \quad Z = \varphi^T(k)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 โครงสร้างของรีเคอร์ซีฟลีทสแควร์ (Recursive Least Square (RLS) Algorithm)

เนื่องจากระบบควบคุมแบบอะแดพทีฟเป็นระบบแบบออนไลน์ (on-line) ดังนั้นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ควรทำตลอดเวลา วิธีที่ใช้กันส่วนมากคือ RLS ซึ่งแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2.2 การติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ด้วยวิธี RLS

จากสมการที่ (2.16) กำหนดตัวแปรขึ้นอีกหนึ่งตัวคือ $P(k)$ โดยมีค่าเท่ากัน

$$P(k) = [\sum_{s=1}^{k} \varphi \ (s)\varphi^{T}(s) \ ]^{-1} \qquad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) สามารถเขียน $P(k)$ ในอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$P^{-1}(k) = p^{-1}(k-1) \ + \ \varphi(k)\varphi^{T}(k) \qquad (2.18)$$

ให้ $\hat{\theta}(k-1)$ เป็นค่าที่เกิดขึ้น ณ เวลาสุ่ม(k-1) เขียนเป็นสมการที่ (2.19)ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{\theta}^{-1}(k-1) = P(k-1)\sum_{s=1}^{k-1}\varphi(s)y(s) \tag{2.19}$$

ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เกิดจากการประมาณค่าที่เวลาสุ่ม k

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) \; + \; P(k)\varphi(k)\varepsilon(k) \tag{2.20}$$

เพื่อหลีกเลี่ยงการอินเวิร์ส ของค่า $P(k)$ จึงได้นำทฤษฎี lemma มาใช้ ทฤษฎี lemma มีวิธีการใช้ดังสมการที่ (2.21)

$$[\mathbf{A} + \mathbf{BCD}]^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\,[\mathbf{DA}^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{C}^{-1}]^{-1}\,\mathbf{DA}^{-1} \tag{2.21}$$

ผลที่เกิดจากการใช้วิธี RLS ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ ค่าอะแดพเตชั่นเกน (adaptation gain) ผลต่างระหว่างเอาท์พุตที่เกิดขึ้นจริงกับเอาท์พุตที่เกิดจากการทำนาย (prediction error)

ค่าพารามิเตอร์

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) \; + \; \frac{P(k-1)\varphi(k)}{1+\varphi^{T}(k)P(k-1)\varphi(k)}\varepsilon(k) \tag{2.22}$$

ค่าอะแดพเตชั่นเกน (adaptation gain)

$$P(k) = P(k-1) \; - \; \frac{P(k-1)\varphi(k)\varphi^{T}(k)P(k-1)}{1 \; + \; \varphi^{T}(k)P(k-1)\varphi(k)} \tag{2.23}$$

ค่าความผิดพลาด (error)

$$\varepsilon(k) = y(k) \; - \; \varphi^{T}(k)\hat{\theta}(k-1) \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในปัญหา LS ค่าพารามิเตอร์ $\hat{\theta}$ ในสมการที่ (2.5) เป็นค่าคงที่ แต่ในระบบอะแดพทีฟค่าพารามิเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้ต้องเพิ่มตัวแปรอีกคือค่า λ (forgetting factor) ซึ่งมีค่า $0 < \lambda < 1$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (2.22),(2.23) และ (2.24) ได้ใหม่ ดังนี้

ค่าพารามิเตอร์

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda+\varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)}\varepsilon(k) \tag{2.25}$$

ค่าอะแดพเตชั่นเกน (adaptation gain)

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}[P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)P(k-1)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)}] \tag{2.26}$$

ค่าความผิดพลาด (priory error)

$$\varepsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \tag{2.27}$$

สมการที่ (2.25),(2.26) และสมการ (2.27) เป็นสมการที่ใช้ในกระบวนการติดตามหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม ในโครงงานนี้

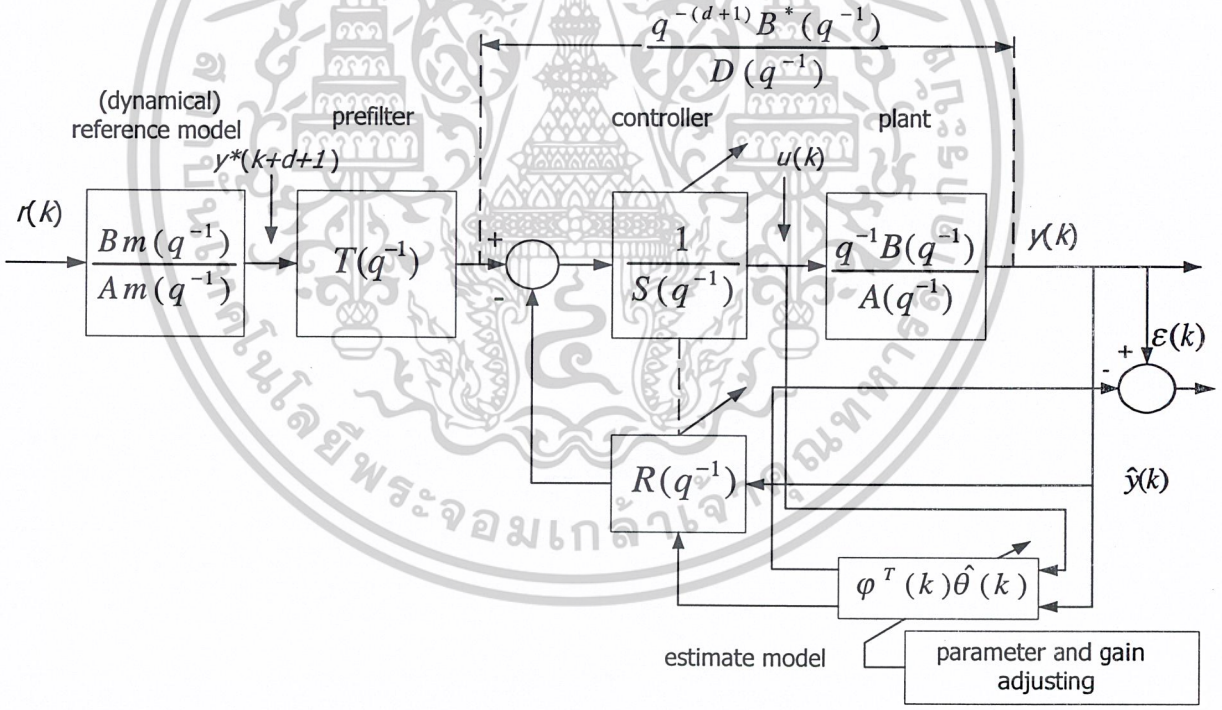
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การออกแบบตัวควบคุมอะแดพทีฟโดยวิธีโพลเพลซเมนท์ (Adaptive Poles Placement Control)

การควบคุมระบบอะแดพทีฟ ตัวควบคุมที่ใช้ในระบบดังกล่าวถูกออกแบบด้วยวิธีการวางโพล (Poles Placement) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการออกแบบตัวควบคุม การออกแบบควบคุมด้วยการวางโพล มีทฤษฎีและหลักการดังนี้

2.2.1 การออกแบบตัวควบคุมภายใต้เงื่อนไขอุดมคติ (Design under Ideal Condition)

เมื่อนำบล๊อกไดอะแกรมของ RLS ดังรูปที่ 2.1 มาใช้ร่วมกับตัวควบคุมที่ถูกออกแบบโดยการวางโพล ทำให้เกิดบล็อกไดอะแกรมใหม่ขึ้นมาดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงตัวควบคุมที่ใช้ร่วมกับระบบควบคุมแบบอะแดพทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิงรูปที่ 3.1 ในกรณีที่ระบบไม่มีตัวรบกวนสามารถเขียนสมการของระบบ (plant) ได้

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k) \tag{2.28}$$

โดยที่ $A(q^{-1}) = 1+ \ a_1q^{-1} + ... + a_2q^{-n}$

$$B(q^{-1}) = b_0 \ + \ b_1q^{-1} + ... + b_mq^{-m}$$

นำแบบจำลองไดนามิก มาเขียนเป็นสมการได้

$$Am(q^{-1})y_m(k+d) = q^{-d}Bm(q^{-1})x(k) \tag{2.29}$$

$y_m(k+d)$ คือสัญญาณอ้างอิง เมื่อ

$$Am(q^{-1}) = 1+ a_{m1}q^{-1} + ... \ \ a_{m\,n}q^{-n}$$

$$Bm(q^{-1}) = b_{m0}+ \ b_{m1}q^{-1} + ... + \ b_{m\,n}q^{-m}$$

โพลวงปิด กำหนดจากโพลิโนเมียล

$$D(q^{-1}) = 1+ \ d_1q^{-1} + ... + \ d_{nd}q^{-nd}$$

เอาท์พุตของระบบมีค่า

$$D(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})T(q^{-1})y_m(k+d) \tag{2.30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า $u(k)$ ที่เหมาะสมสำหรับระบบ (plant) หาได้จาก

$$u(k) = \frac{1}{S(q^{-1})} \quad [T(q^{-1})\, y_m(k+d) \;-\; R(q^{-1})y(k)] \tag{2.31}$$

โดยที่ $S(q^{-1}) = 1 \;+\; s_1 q^{-1} + ... + \; s_{ns} q^{-ns}$

$$R(q^{-1}) = r_0 \;+\; r_1 q^{-1} + ... + \; r_{nr} q^{-nr}$$

นำสมการที่ (2.31) แทนเข้าไปในสมการที่ (2.28) และเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.30) ทำให้ได้สมการ ไดโอแฟนทีน (Diophantine)

$$D(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) \;+\; q^{-d} B(q^{-1})R(q^{-1}) \tag{2.32}$$

$$= 1 + \; d_1 q^{-1} + ... + \; d_{nd} q^{-nd}$$

$S(q^{-1})$ และ $R(q^{-1})$ คือ ตัวชดเชยของระบบ $T(q^{-1})$ คือตัวกรอง สมการที่ (2.32) มีชื่อว่า สมการ Diophantine หรือ Bezout identity สัมประสิทธิ์ของ $D(q^{-1})$ เกิดจากการรวมกันระหว่างสัมประสิทธิ์ $B(q^{-1})$ และ $A(q^{-1})$ และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า $S(q^{-1})$ และ $R(q^{-1})$

$$S(q^{-1}) = 1 + \; s_1 q^{-1} + ... + \; s_{ns} q^{-ns} \tag{2.33}$$

$$R(q^{-1}) = r_0 \;+\; r_1 q^{-1} + ... + \; r_{nr} q^{-nr} \tag{2.34}$$

เมื่อ nd, ns และ nr เป็นอันดับของ $D(q^{-1})$, $S(q^{-1})$ และ $R(q^{-1})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (2.32) , (2.33) และ(2.34) มาเขียนเป็นเมตริกมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & b_0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_1 & 1 & \cdots & \cdots & b_1 & b_0 & \cdots & \cdots \\ a_2 & a_1 & \cdots & \cdots & b_2 & b_1 & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & 1 & \cdots & \cdots & \cdots & b_0 \\ a_n & \cdots & \cdots & a_1 & b_m & \cdots & \cdots & b_1 \\ 0 & a_n & \cdots & \cdots & 0 & b_m & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & a_n & \cdots & \cdots & 0 & b_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ s_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ s_{ns} \\ r_0 \\ r_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_{nr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ d_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_{nd} \end{bmatrix} \qquad (2.35)$$

$$\mathbf{MX = D} \qquad (2.36)$$

เมตริก **M** คือ ซิลเวสเตอร์เมตริก **D** คือ เวคเตอร์ของสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (3.5) **X** คือ เวคเตอร์ของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของตัวควบคุม $D(q^{-1})$ คือเวคเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียล ผู้ออกแบบสามารถกำหนดได้เอง การหาค่าของตัวแปรไม่ทราบค่าของตัวควบคุมจากสมการที่ (2.36) ได้

$$\mathbf{X = M^{-1}D} \qquad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 อันดับของตัวควบคุม R-S-T

ขนาดของซิลเวสเตอร์เมตริกขึ้นอยู่กับอันดับตัวควบคุม ถ้าเลือกอันดับของตัวควบคุมให้เหมาะสม ซิลเวสเตอร์เมตริกจะเป็นเมตริกจัตุรัส ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพียงชุดเดียว(unique solution) กล่าวคือ จำนวนของสมการและจำนวนของตัวแปรที่ไม่ทราบในสมการที่ (2.36) ต้องมีจำนวนเท่ากัน จำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าคือจำนวนของสัมประสิทธิ์ $S(q^{-1})$ และ $R(q^{-1})$ ส่วนจำนวนสมการคือจำนวนสัมประสิทธิ์ของ $D(q^{-1})$ หรืออันดับ $A(q^{-1})$ รวมกับอันดับ $S(q^{-1})$ ดังนั้น

จำนวนของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า $= ns + nr + 1$ (2.38)

จำนวนของสมการ $= n + ns$ (2.38a)

$= nd$ (2.38b)

เนื่องจากจำนวนของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบเท่ากับจำนวนของสมการทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$ns+nr+1 = n+ ns \quad (2.39)$$

$$nr = n-1 \quad (2.40)$$

$$ns \geq nr \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.40) เพื่อที่ให้ได้ค่าพารามิเตอร์เพียงชุดเดียว อันดับของ $R(q^{-1})$ ต้องน้อยกว่าอันดับของ $A(q^{-1})$ เพื่อความเหมาะสมในการออกแบบตัวควบคุม อันดับ ns ในสมการที่ (2.39) ซึ่งถูกหักล้างนั้นชี้ให้เห็นว่า $S(q^{-1})$ สามารถเลือกอย่างไรก็ได้ จากสมการที่ (2.32) อันดับ ns ขึ้นอยู่กับค่า d ตามนี้

$$ns \leq m+d-1 \quad (2.42a)$$

ค่า $nd-n = ns$

$$nd \leq n+m+d-1 \quad (2.42b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การลดผลรบกวนและการติดตาม (Regulation and Tracking)

โพลวงปิดที่เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียล $D(q^{-1})$ เป็นตัวอธิบายถึงพฤติกรรมในการลดผลรบกวนของระบบควบคุม $D(q^{-1})$ ถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมตามที่ต้องการคือสามารถลดผลรบกวนได้อย่างรวดเร็ว เขียนในรูปแบบไบโนเมียลได้

$$D(q^{-1}) = (1-\alpha q^{-1})^{nd} \tag{2.43}$$

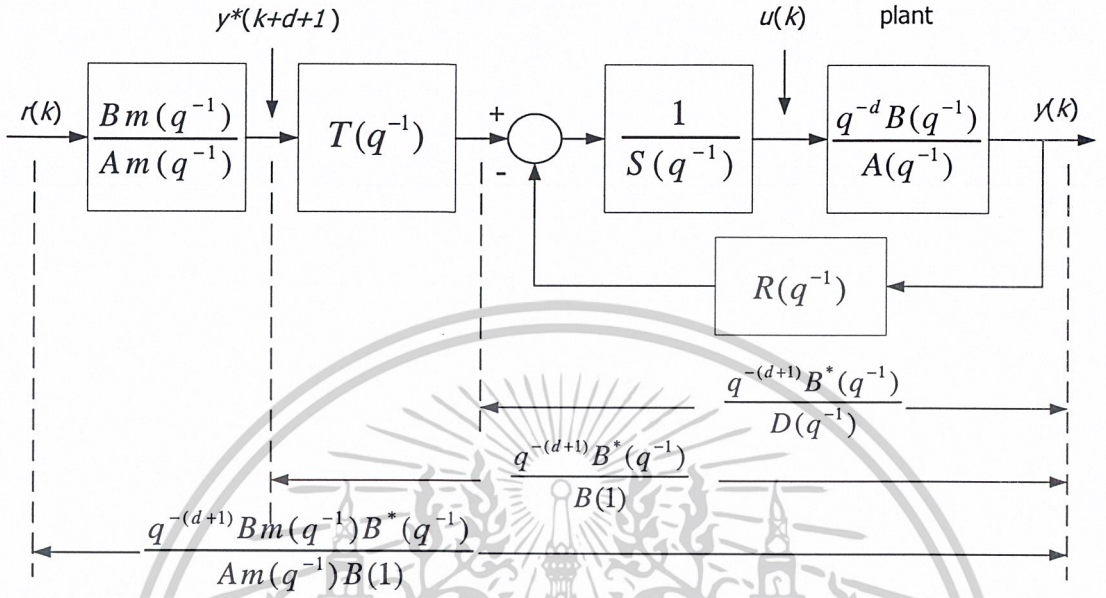
α คือ โพลที่เสถียรของระบบวงปิดดีสครีตมีค่าอยู่ระหว่าง

$$0< \alpha <1 \tag{2.44}$$

ตัวควบคุม $S(q^{-1})$ และ $R(q^{-1})$ ถูกออกแบบภายใต้พฤติกรรมการลดผลบกวนที่ต้องการ เมื่อ อินพุตอ้างอิงเกิดการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุตของระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเส้นทางของ $y^*(k)$ เส้นทาง $y^*(k)$ จะถูกเก็บหรือถูกสร้างทุกครั้งที่อินพุตอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้รูปแบบจำลองไดนามิกวิธีนี้เรียกว่า " การติดตาม (Tracking) " ดังแสดงในรูปที่ 3.1 รูปแบบจำลองไดนามิก $B(q^{-1}) / A(q^{-1})$ ถูกกำหนดจากพฤติกรรมที่ต้องการ (rise time ,overshoot, setting time) โดยใช้ฟังก์ชันขั้นบันไดเป็นอินพุต เส้นทาง $y^*(k)$ มีค่า

$$y^*(k) = \frac{q^{-(d+1)}Bm(q^{-1})}{Am(q^{-1})}\, r(k) \tag{2.45}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 พฤติกรรมการลดผลรบกวนและการติดตาม

$B_m(q^{-1}) = b_{m0} + b_{m1}q^{-1} + \ldots$

$A_m(q^{-1}) = 1 + a_{m1}q^{-1} + a_{m2}q^{-2} + \ldots$

$q^{-d}B(q^{-1})$ สามารถเขียนใหม่ได้เป็น $q^{-(d+1)}B^*(q^{-1})$

เมื่อ $B(q^{-1}) = q^{-1}B^*(q^{-1})$

ค่า แรกของ $y^*(k+d+1)$ ที่เกิดจาก $r(k)$ มีค่า

$$y^*(k+d+1) = \frac{Bm(q^{-1})}{Am(q^{-1})}\ r(k) \qquad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การตามรอย (Tracking) นั้นตัวกรอง $T(q^{-1})$ ควรเลือกให้เหมาะสม

$$T(q^{-1}) = GD(q^{-1}) \tag{2.47}$$

โดยที่ $G = 1/B(1)$ ถ้า $B(1) \neq 0$

$G = 1$ ถ้า $B(1) = 0$ (2.48)

จากรูปที่ 3.2 ได้สมการตามกฎการควบคุมคือ

$$S(q^{-1})u(k) + R(q^{-1})y(k) = T(q^{-1})y^*(k+d+1) \tag{2.49}$$

และ

$$u(k) = \frac{T(q^{-1})y^*(k+d+1) - R(q^{-1})y(k)}{S(q^{-1})} \tag{2.50}$$

โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างอินพุตอ้างอิงกับเอาท์พุตคือ

$$H_{CL}(q^{-1}) = \frac{q^{-(d+1)}Bm(q^{-1})}{Am(q^{-1})} \times \frac{B^*(q^{-1})}{B(1)} \tag{2.51}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50188

บทที่ 3
การคำนวณและการสร้าง

การควบคุมระบบจริงด้วยวิธี อะแดพทีฟโพลเพลซเมนท์ มีลำดับขั้นตอนการคำนวณดังนี้

3.1 การติดตามหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ โดยวิธีรีเคอร์ซีฟลีทสแควร์ (Recursive Least square) โดยมีขั้นตอนการคำนวณตามสมการดังนี้

3.1.1 หาค่าความผิดพลาดที่เกิดจากเอาท์พุตจริง และเอาท์พุตที่เกิดจากการทำนาย โดยใช้สมการที่ (2.27)

$$\varepsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)$$

3.1.2 หาค่าอะแดพเตชั่นเกน โดยใช้สมการที่ (2.26)

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}\left[P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)P(k-1)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)}\right]$$

เมื่อค่า λ คือ ค่าฟอร์เกทติ้งแฟคเตอร์ มีค่าอยู่ระหว่าง $0<\lambda<1$

$P(k-1)$ ในตอนเริ่มต้นกำหนดให้มีค่า $1{,}000I$ เมื่อ I คือเมตริกเอกลักษณ์ (Identity Matrix)

3.1.3 หาค่าพารามิเตอร์ จากสมการที่ (2.25)

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda+\varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)}\varepsilon(k)$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ ที่มีค่าใกล้เคียงค่า พารามิเตอร์จริงที่สุดแล้ว นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปทำการออกแบบตัวควบคุม ด้วยวิธีโพลเพลซเมนต์ ดังขั้นตอนดังต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโพลเพลซเมนต์

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณจากวิธีการ RLS แล้วจะนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณหาค่าตัวควบคุม $R(q^{-1})$, $S(q^{-1})$ และตัวติดตาม $T(q^{-1})$ ได้จากสมการ (2.36)

MX = D

แทนค่าพารามิเตอร์ลงใน ซิลเวสเตอร์เมตริก

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & . & . & 0 & b_0 & 0 & . & . & . & . & 0 \\ a_1 & 1 & . & . & . & b_1 & b_0 & . & . & . & . & . \\ a_2 & a_1 & . & . & . & b_2 & b_1 & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & 0 & . & . & . & . & . & . & 0 \\ . & . & . & . & 1 & . & . & . & . & . & . & b_0 \\ a_n & . & . & . & a_1 & b_m & . & . & . & . & . & b_1 \\ 0 & a_n & . & . & . & 0 & b_m & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & . & . & 0 & a_n & . & . & . & . & . & 0 & b_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ s_1 \\ . \\ . \\ . \\ s_{ns} \\ r_0 \\ r_1 \\ . \\ . \\ . \\ r_{nr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ d_1 \\ . \\ . \\ . \\ d_{nd} \end{bmatrix}$$

เมื่อเมตริก D คือค่าโพลิโนเมียลของโพลวงปิดซึ่งมีค่า

$$D(q^{-1}) = (1 - \alpha q^{-1})^{nd}$$

ค่า α เป็นค่าที่กำหนดขึ้นเอง โดยค่า α มีค่าอยู่ระหว่าง $0 < \alpha < 1$ ส่วนค่า nd กำลังของโพลิโนเมียล ของโพลวงปิด ที่ใช้ในโครงงานนี้ มีค่าเท่ากับ 2

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1 q^{-1} + d_2 q^{-2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการย้ายสมการหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของเมตริกตัวควบคุม $R(q^{-1}), S(q^{-1})$ โดยสมการที่ (2.37)

$$\mathbf{X} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}$$

ส่วนการหา ตัวติดตาม $T(q^{-1})$ หาได้จาก

$$T(q^{-1}) = GD(q^{-1})$$

เมื่อ $G = 1/B(1)$ ถ้า $B(1) \neq 0$

$G = 1$ ถ้า $B(1) = 0$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

โครงงานฉบับนี้ได้นำหลักการ RLS มาทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาซี เพื่อทำการติดตามหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบอันดับ 2 ดังสมการ ที่ (4.1) เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ แล้วนำค่าพารามิเตอร์ ดังกล่าวมาทำการออกแบบตัวควบคุม (controller)

$$G(S) = \frac{K\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n} \qquad (4.1)$$

4.1 การติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์โดยใช้วิธี RLS

4.1.1 ทำการติดตามหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบอันดับ2 สองระบบเมื่อค่า Damping ratio มีค่าต่างกัน ทำการทดลองแล้วเปรียบเทียบผลจากการทดลอง

ระบบที่ 1 Damping ratio (ζ) $= 0.2$; $\omega_n = 15$

ระบบที่ 2 Damping ratio (ζ) $= 0.8$; $\omega_n = 15$

กำหนดให้ทั้ง2 ระบบมีค่า K = 1, Sampling time ,Ts = 0.02 sec, ค่า Forgetting factor (λ) = 0.97,ค่า Adaptation gain (γ) $= 10^3$, ค่า เริ่มต้นเวคเตอร์ พารามิเตอร์มีค่า

$$\hat{\theta}^T = [\ 0\ 0\ 0\ 0\ ]$$

ขั้นตอนการทดลอง ระบบที่ 1

1.1 ทดลองทำการติดตามหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบอันดับ2 ที่มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

Damping ratio (ζ) $= 0.2$, $\omega_n = 15$

1.2 ใช้โปรแกรม Matlab ในการเปลี่ยนระบบต่อเนื่อง เป็นระบบดีสครีต ได้ระบบดังนี้

$$G(q^{-1}) = \frac{q^{-1}(0.0429 + 0.0412q^{-1})}{(1 - 1.8072q^{-1} + 0.8869q^{-2})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ d = 1

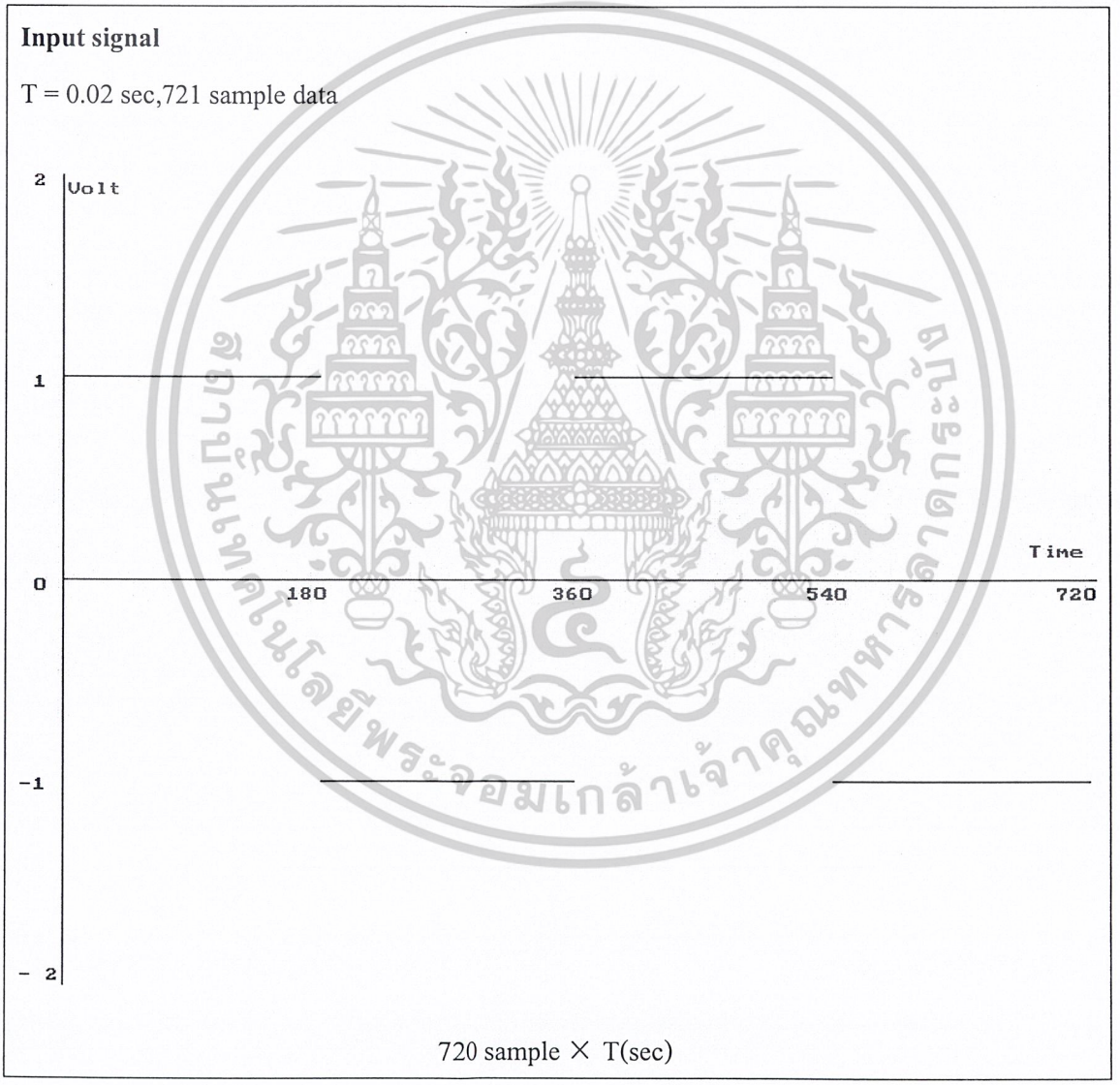
bo = 0.0429

b1 = 0.0412

a1 = -1.8072

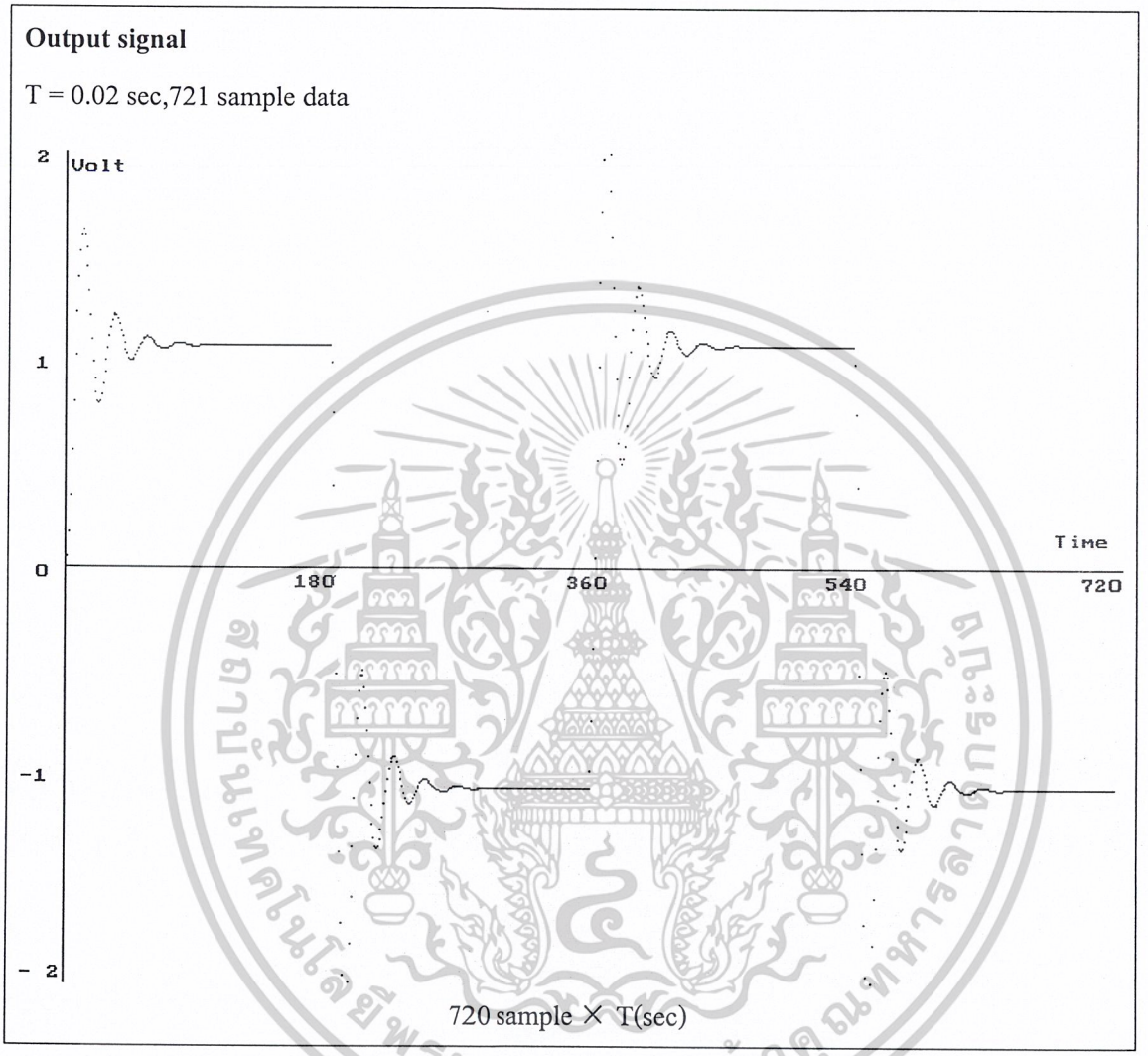
a2 = 0.8869

1.3 ป้อนอินพุตเป็น square wave มีค่า period = 360 sampling และมี Amplitude = 1



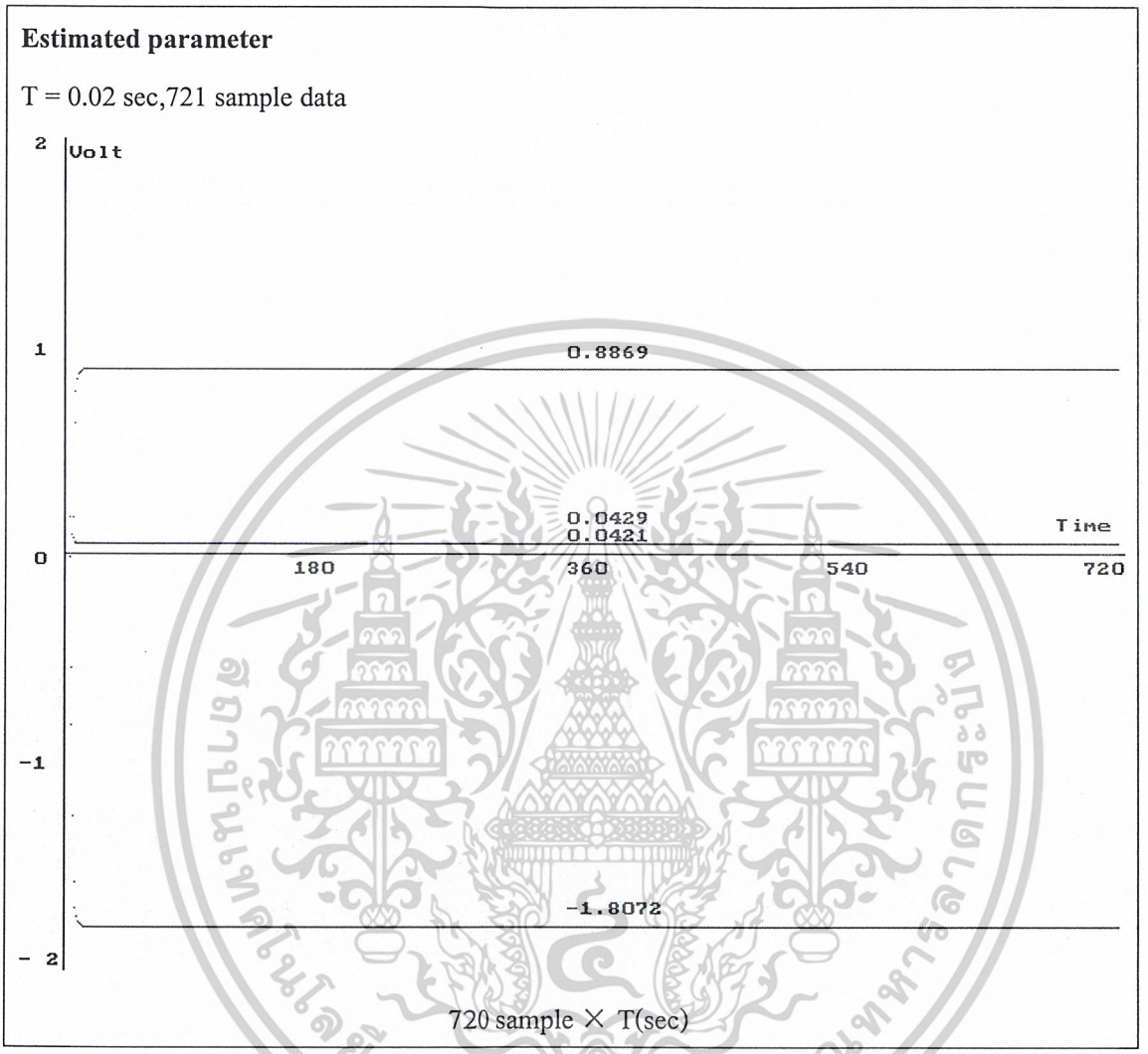
รูปที่ 4.1 แสดง สัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ สมการผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการติดตามหาเอกลักษณ์ (identification)ได้ค่าดังนี้

bo = 0.0429

b1 = 0.0413

a1 = -1.8025

a2 = 0.8867

error = 1.2509×10^{-7}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง ระบบที่ 2

2.1 ทำการติดตามหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบอันดับ2 ที่มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

Damping ratio (ζ) = 0.8, ω_n = 15

2.2 ทำการทดลองตามขั้นตอน 1.2 ถึง 1.5

$$G(q^{-1}) = \frac{q^{-1}(0.0383 + 0.0326q^{-1})}{(1 - 1.5478q^{-1} + 0.6188q^{-2})}$$

เมื่อ d = 1

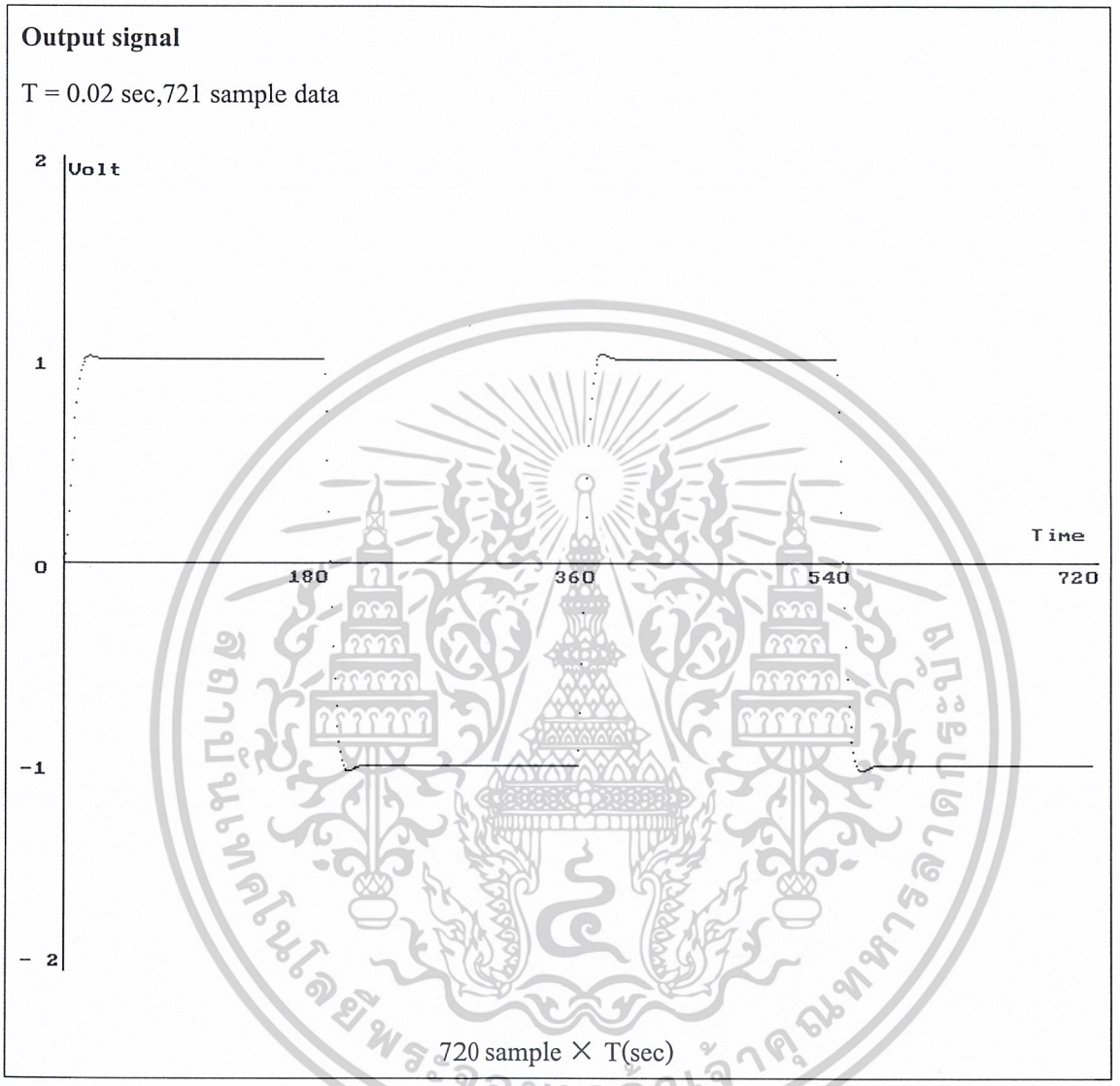
b0 = 0.0383

b1 = 0.0326

a1 = -1.5478

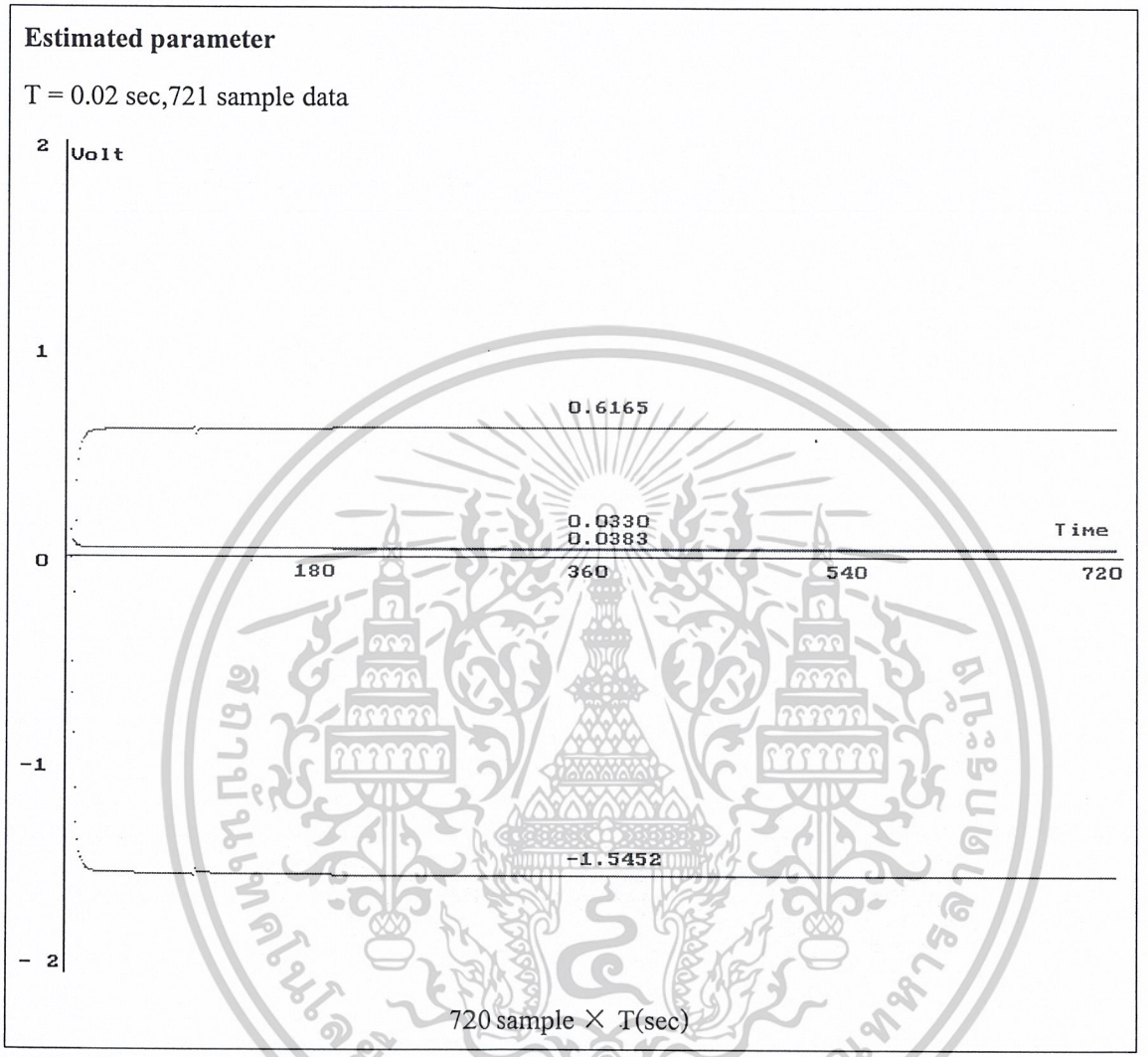
a2 = 0.6188

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณเอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการติดตามหาเอกลักษณ์ (identification) ได้ค่าดังนี้

bo = 0.0383

b1 = 0.0330

a1 = -1.5452

a2 = 0.6165

error = 2.5204×10^{-5}

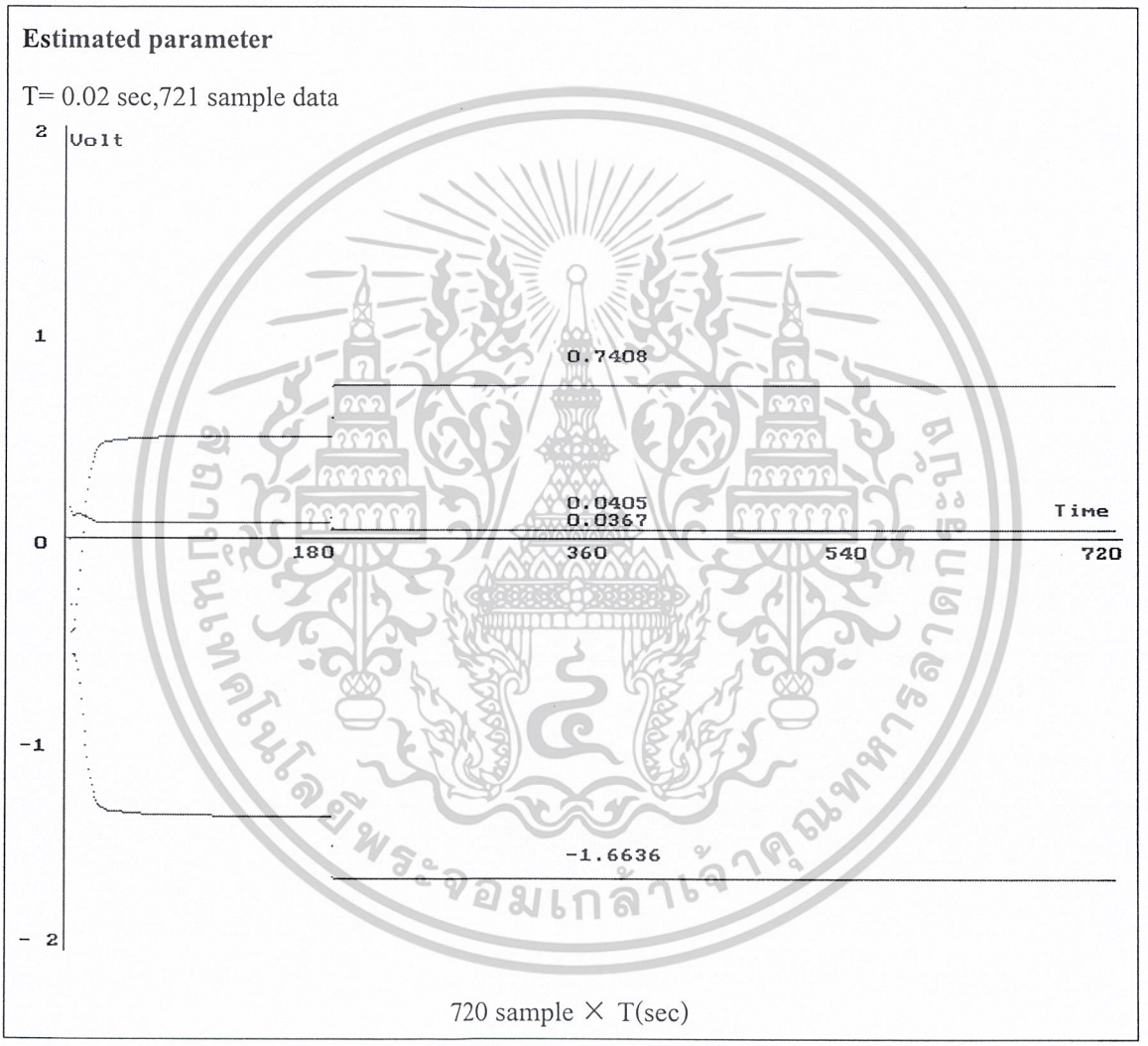
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ทำการติดตามหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบอันดับ2 เมื่อค่า Adaptation gain(γ) มีค่าต่างกัน ทำการทดลองแล้วเปรียบเทียบผลจากการทดลอง

ระบบมีค่า Damping ratio (ζ) = 0.5 ; ω_n = 15,

K = 1, Sampling time, Ts = 0.02 sec, ค่า Forgetting factor (λ) = 0.97,

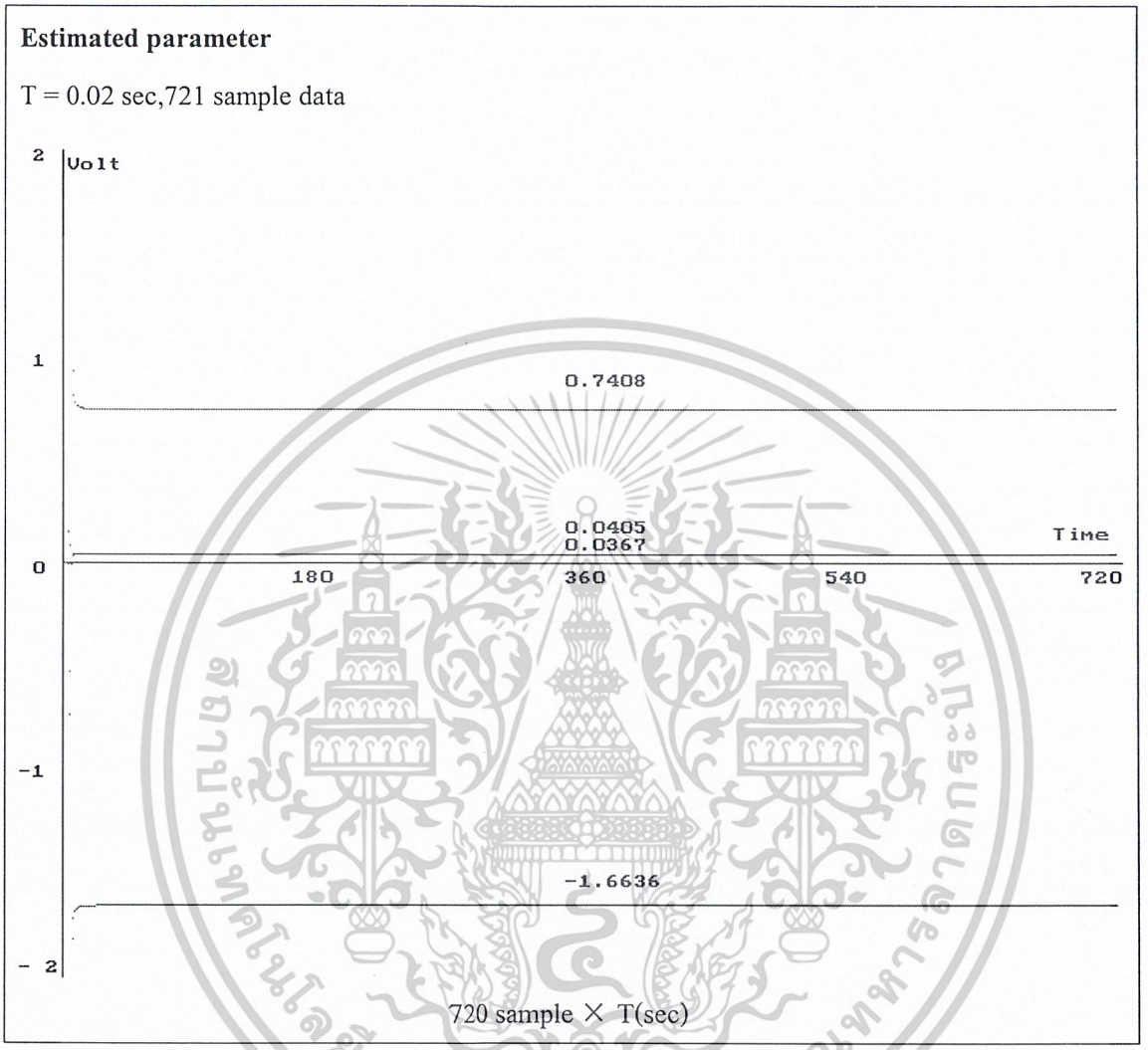
ผลการทดลองการติดตามหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ เมื่อค่า Adaptation gain (γ) = 10^2



รูปที่ 4.6 เมื่อค่า Adaptation gain (γ) = 10^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการติดตามหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ เมื่อค่า Adaptation gain (γ) = 10^5



รูปที่ 4.7 เมื่อค่า Adaptation gain (γ) = 10^5

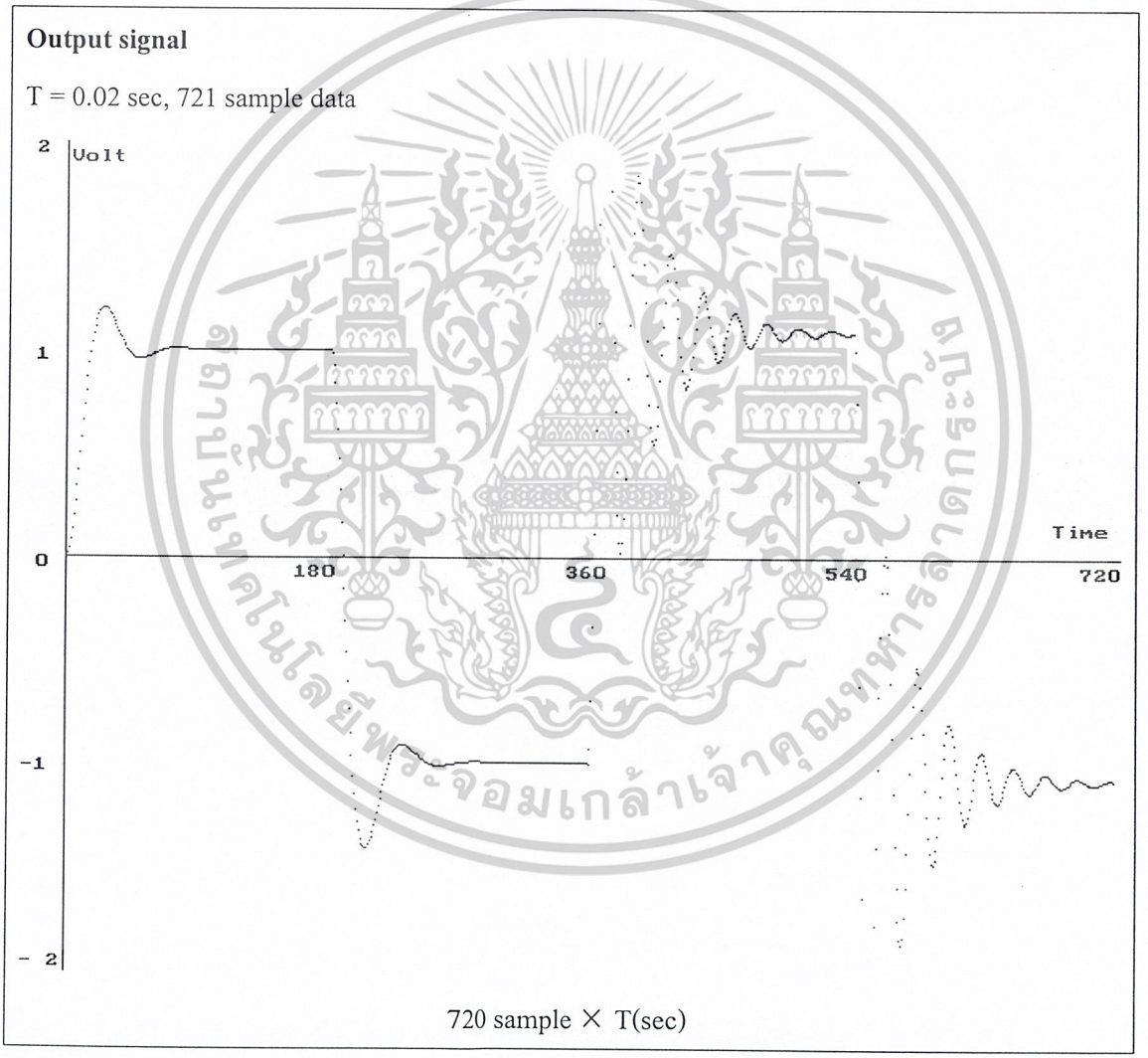
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ทำการติดตามหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบอันดับ2 เมื่อค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงจากระบบที่1 ไปเป็นระบบที่ 2

ระบบที่ 1 เป็นระบบแบบ fast response มีค่า Damping ratio (ζ) = 0.45; ω_n = 7

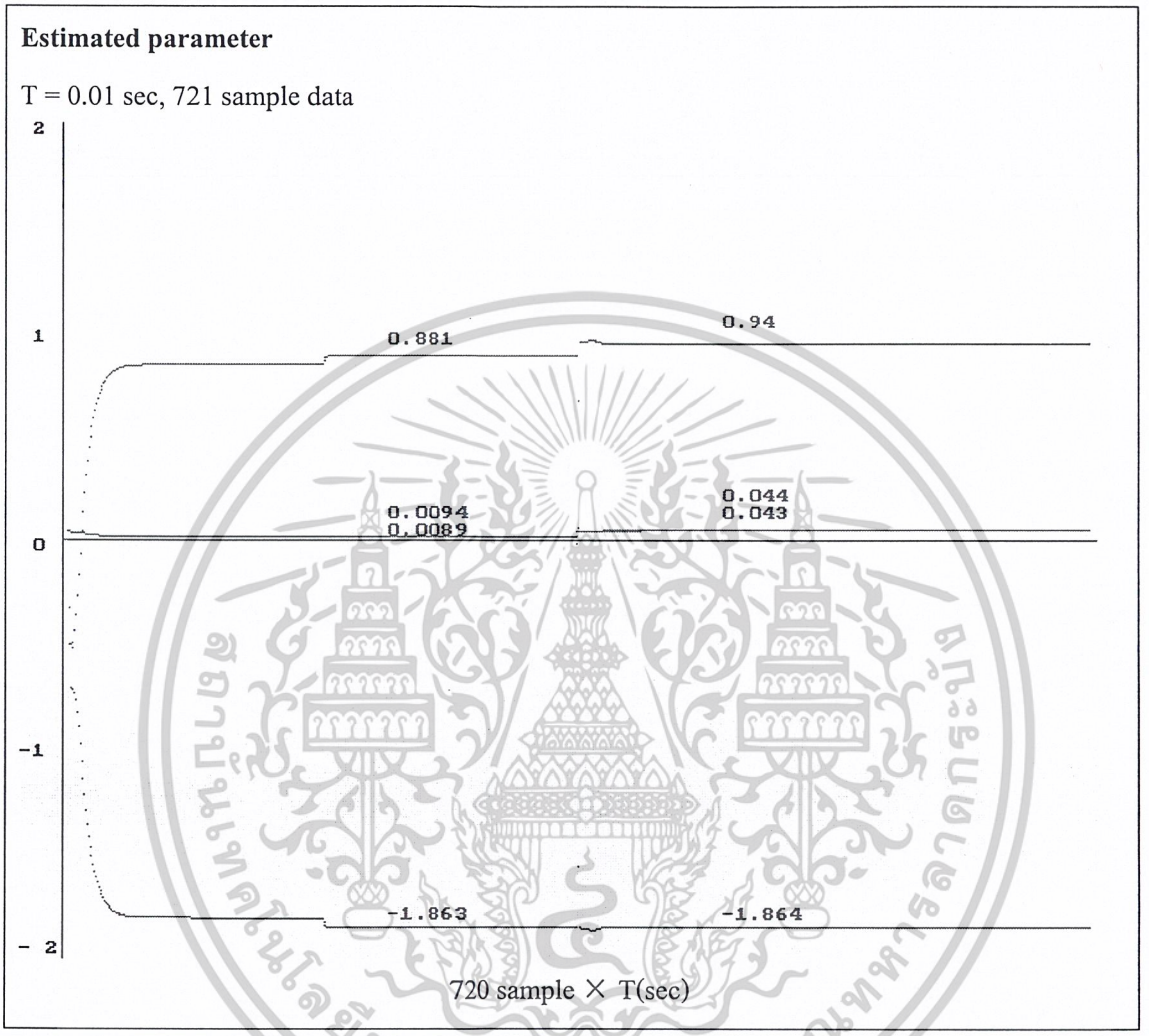
ระบบที่ 2 เป็นระบบแบบ slow response มีค่า Damping ratio (ζ) = 0.15 ; ω_n = 45

K = 1, Sampling time ,Ts = 0.02 sec, ค่า Forgetting factor (λ) = 0.97, ค่า Adaptation gain (γ) = 10^3



รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของระบบ เมื่อพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



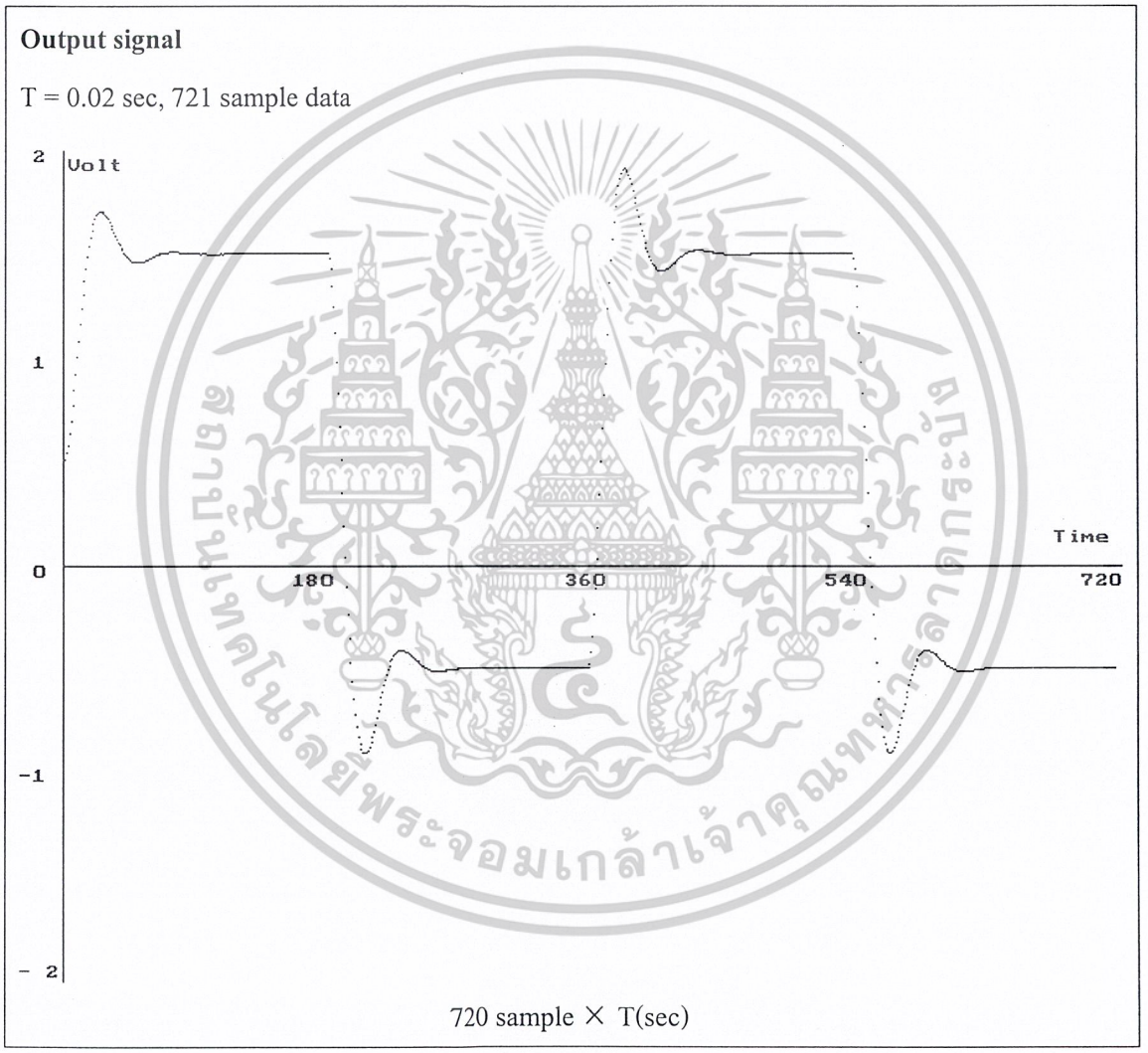
รูปที่ 4.9 แสดงการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ใหม่ เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ทำการติดตามหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบอันดับ2 เมื่อระบบมีสัญญาณรบกวน (Noise) เข้ามาในระบบ

ระบบมีค่า Damping ratio (ζ) = 0.5; ω_n = 15,

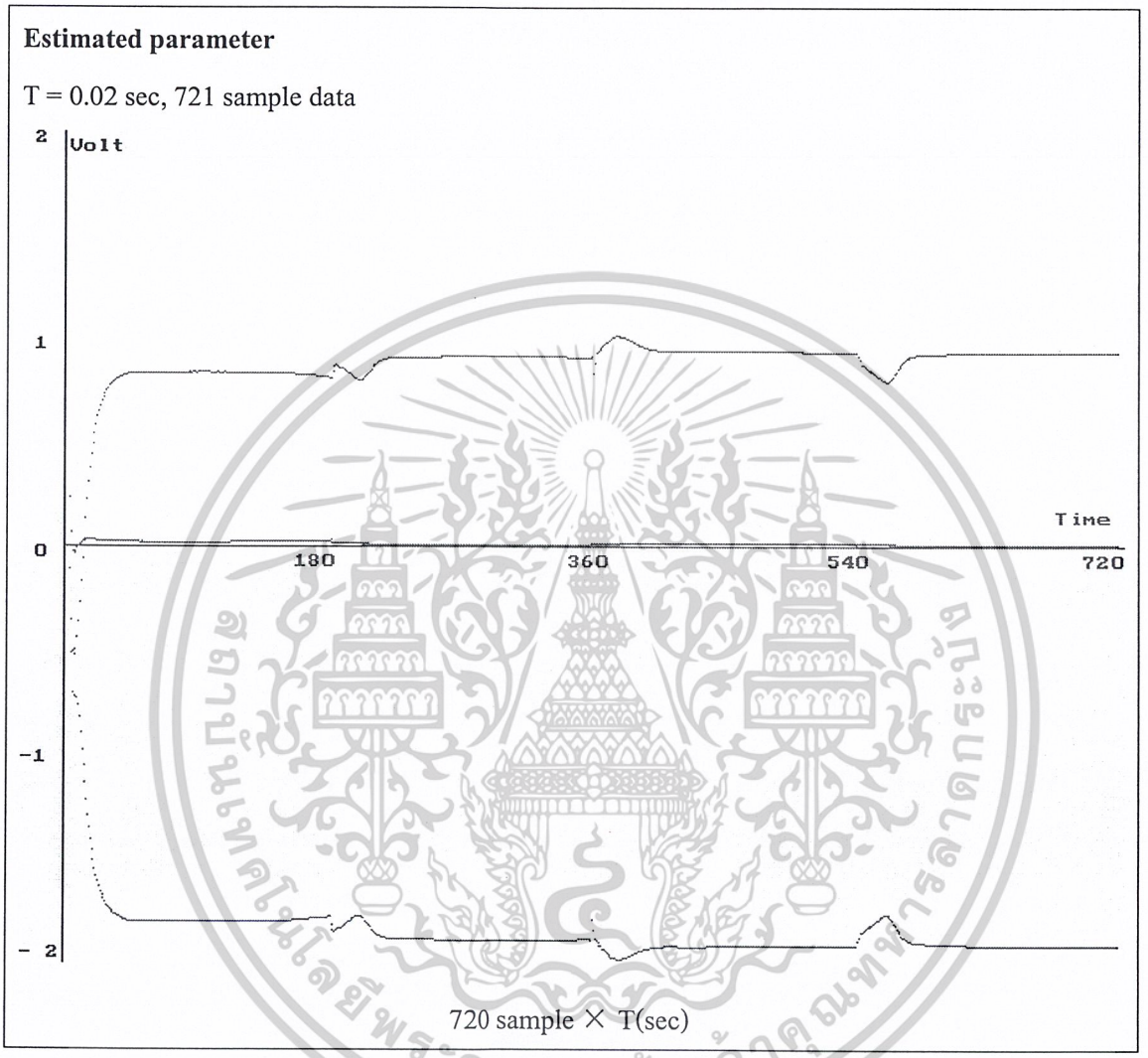
K=1, Sampling time ,Ts = 0.02 sec, ค่า Forgetting factor (λ) = 0.97, Adaptation gain (γ) =10^5 เพิ่ม Disturbance = 0.5, Variance noise = 0.001



รูปที่ 4.10 แสดงผลการตอบสนองของสัญญาณเอาท์พุต เมื่อระบบมีสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการติดตามเอกลักษณ์พารามิเตอร์



รูปที่ 4.11 แสดงผลการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ เมื่อระบบมีสัญญาณรบกวน

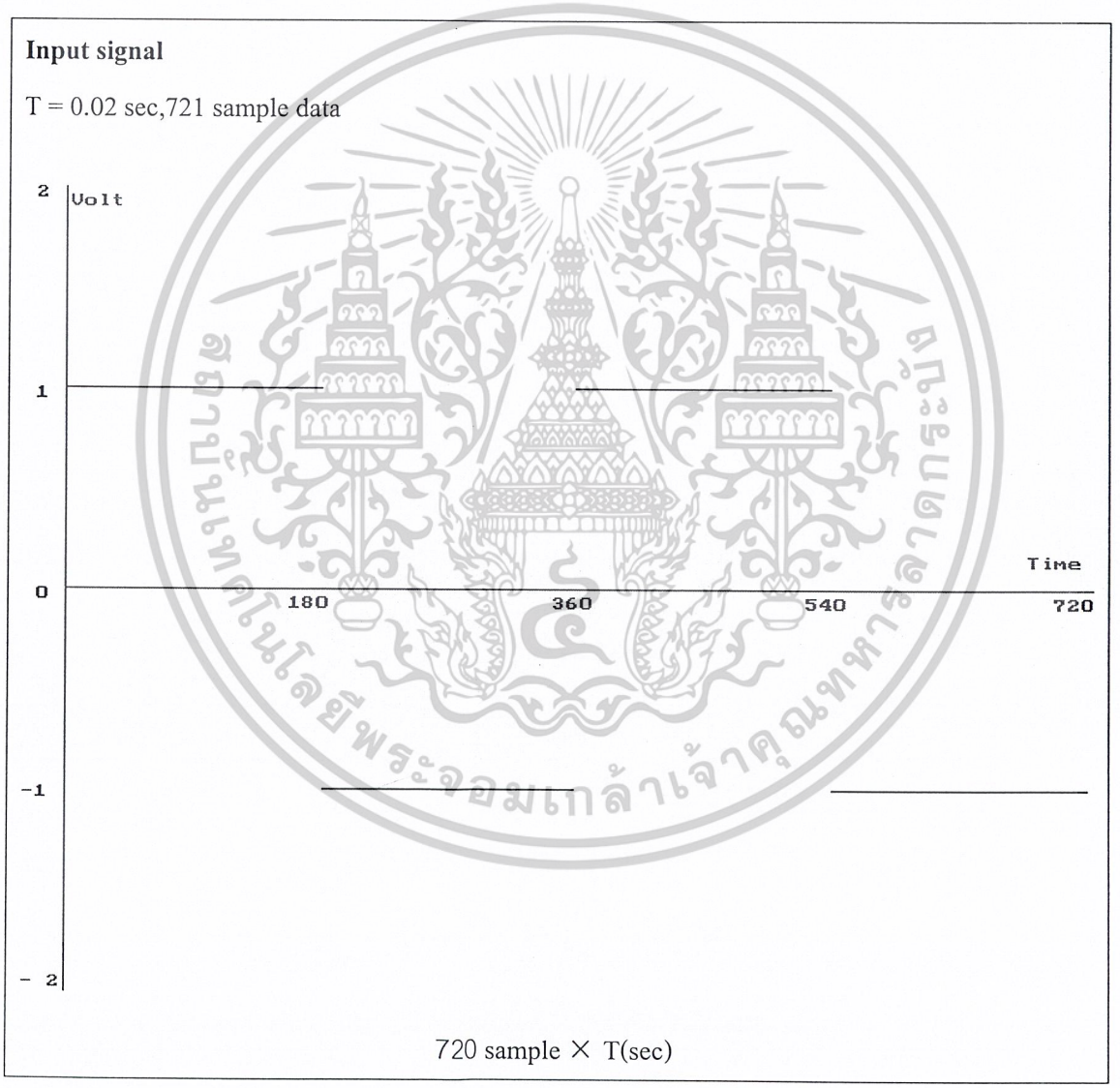
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาระบบควบคุมระบบโดยใช้วิธี อะแดพทีฟโพลเพลซเมนท์

4.2.1 ทำการทดลองหาเอาท์พุตของระบบควบคุมแบบอะแดพทีฟ เมื่อไม่มีแบบจำลองอ้างอิง (Reference Model)

โดยกำหนดโพล α จากสมการ $D(q^{-1}) = (1-\alpha q^{-1})^d$ ให้เพิ่มค่า α มีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9 แล้วดูผลตอบสนองของเอาท์พุต เพื่อหาค่าโพลที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้

ระบบมีค่า Damping ratio $(\zeta) = 0.4$; $\omega_n = 15$, K = 1, Sampling time $(Ts) = 0.036$ sec, ค่า Forgetting factor $(\lambda) = 0.99$, Adaptation gain $(\gamma) = 10^3$



รูปที่ 4.1 แสดง สัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

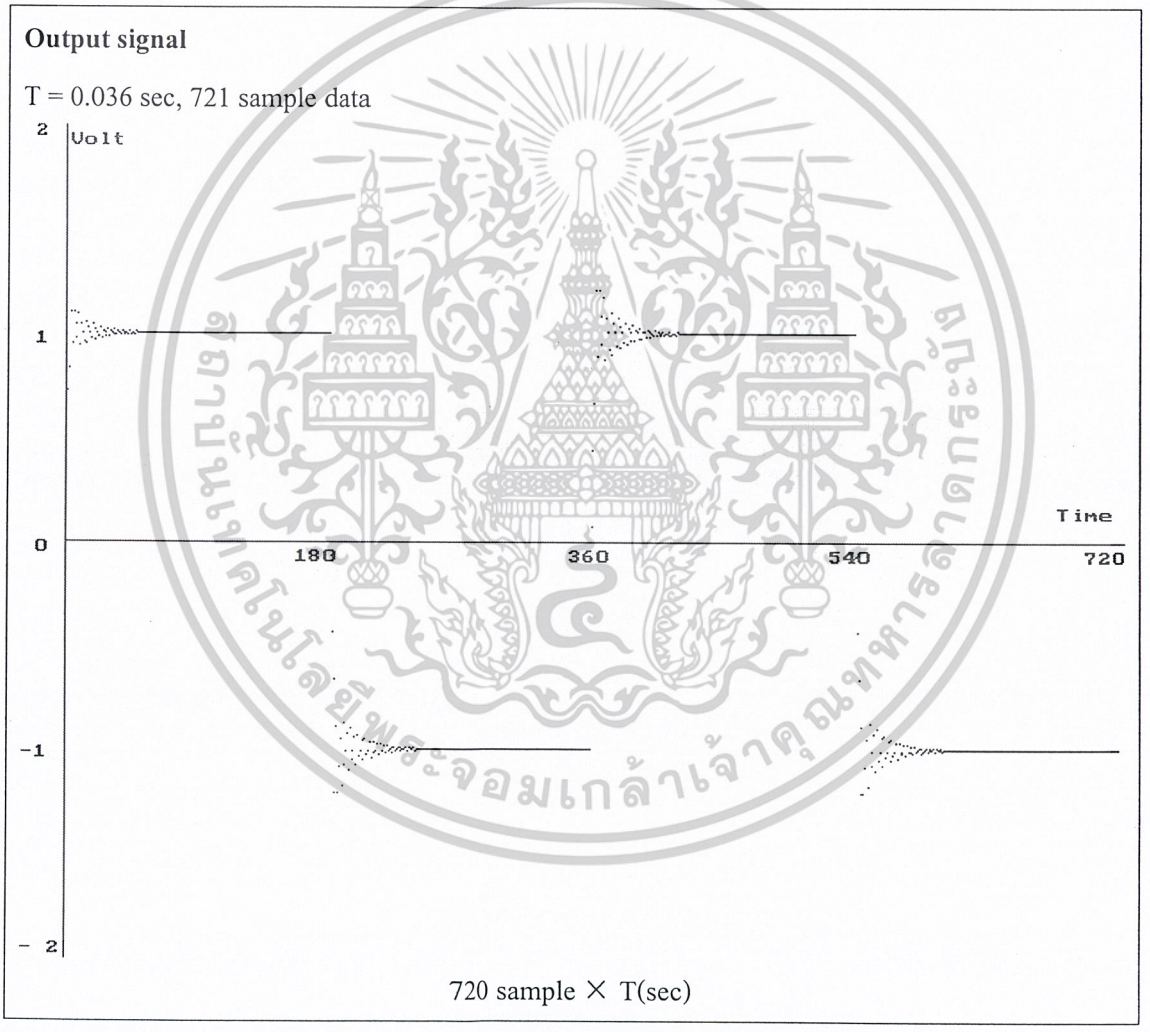
เมื่อค่า α มีค่า 0.1

จากการคำนวณได้พารามิเตอร์ตัวควบคุม และตัวติดตาม

$$R(q^{-1}) = 4.1483 - 3.4399q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 + 1.2168q^{-1} + 0.5702q^{-2}$$

$$T(q^{-1}) = \frac{[1 - 0.2q^{-1} - 0.01q^{-2}]}{0.2317}$$



รูปที่4.12 เมื่อค่า α มีค่า 0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

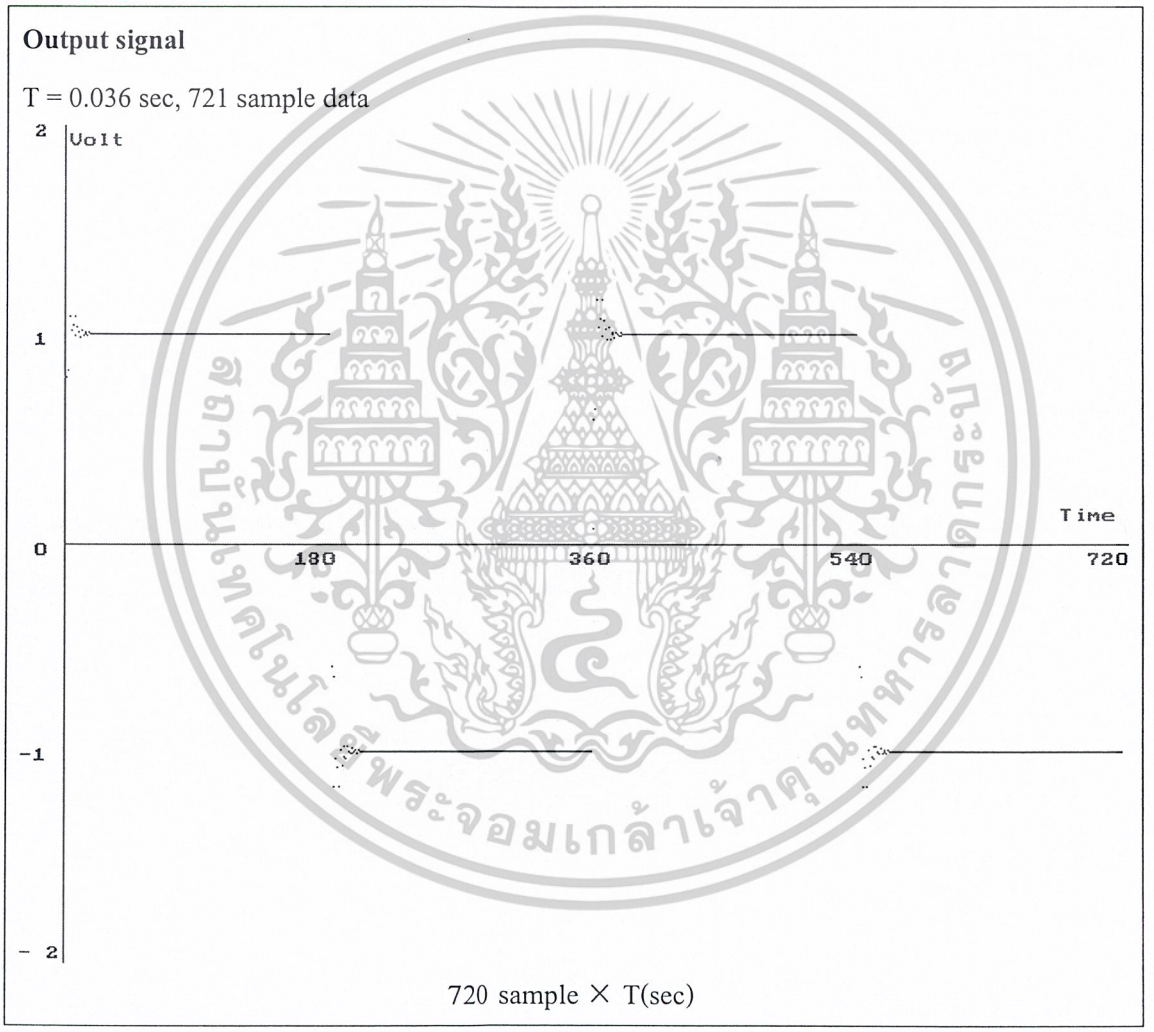
เมื่อค่า α มีค่า 0.2

จากการคำนวณได้พารามิเตอร์ตัวควบคุม และตัวติดตาม

$$R(q^{-1}) = 3.0354 - 2.7454q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 + 1.0168q^{-1} + 0.4551q^{-2}$$

$$T(q^{-1}) = \frac{[1 - 0.4q^{-1} - 0.04q^{-2}]}{0.2317}$$



รูปที่ 4.13 เมื่อค่า α มีค่า 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

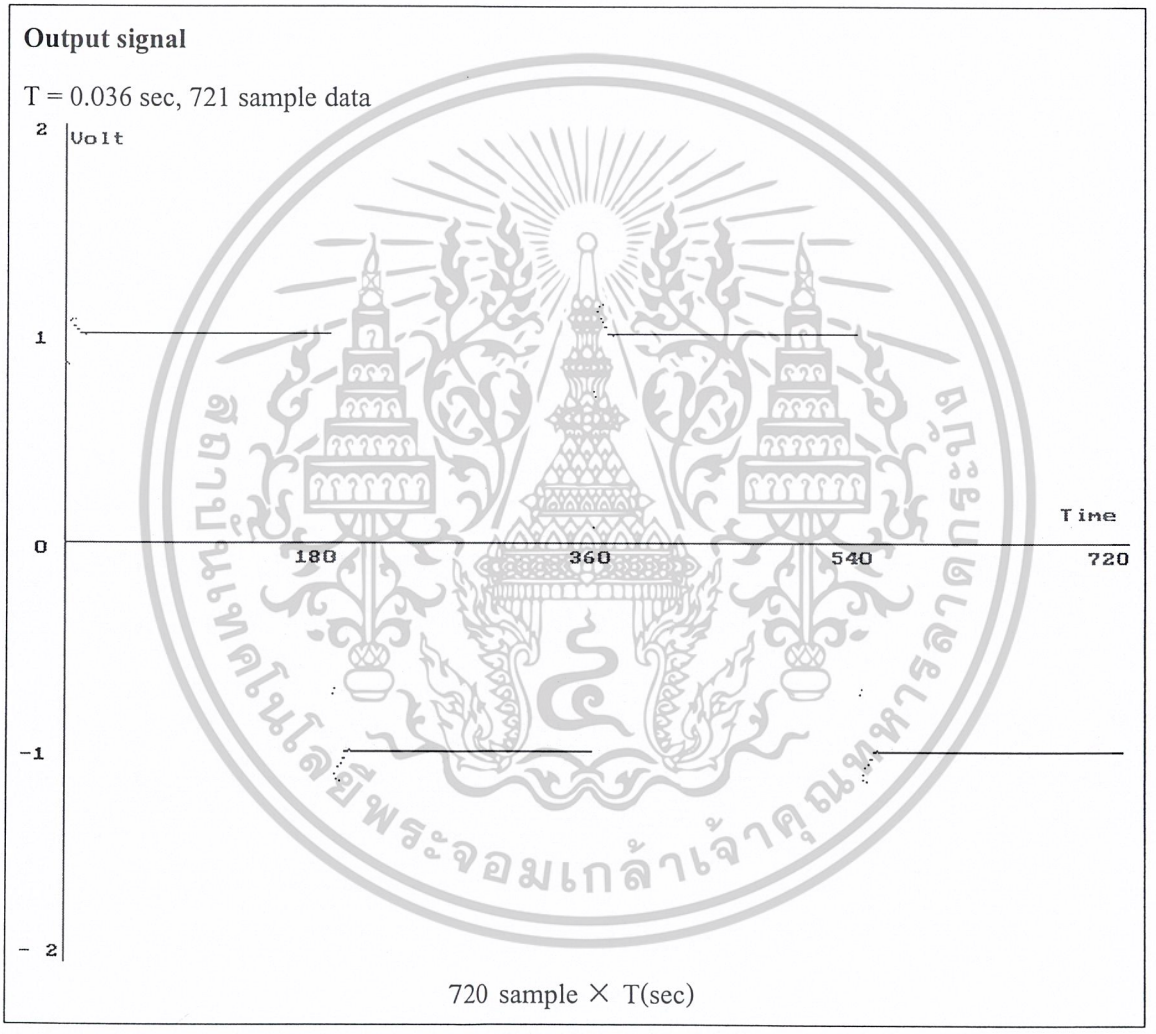
เมื่อค่า α มีค่า 0.3

จากการคำนวณได้พารามิเตอร์ตัวควบคุม และตัวติดตาม

$$R(q^{-1}) = 2.0375 - 2.0854q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 + 0.8168q^{-1} + 0.3457q^{-2}$$

$$T(q^{-1}) = \frac{[1 - 0.6q^{-1} - 0.09q^{-2}]}{0.2317}$$



รูปที่ 4.14 เมื่อค่า α มีค่า 0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

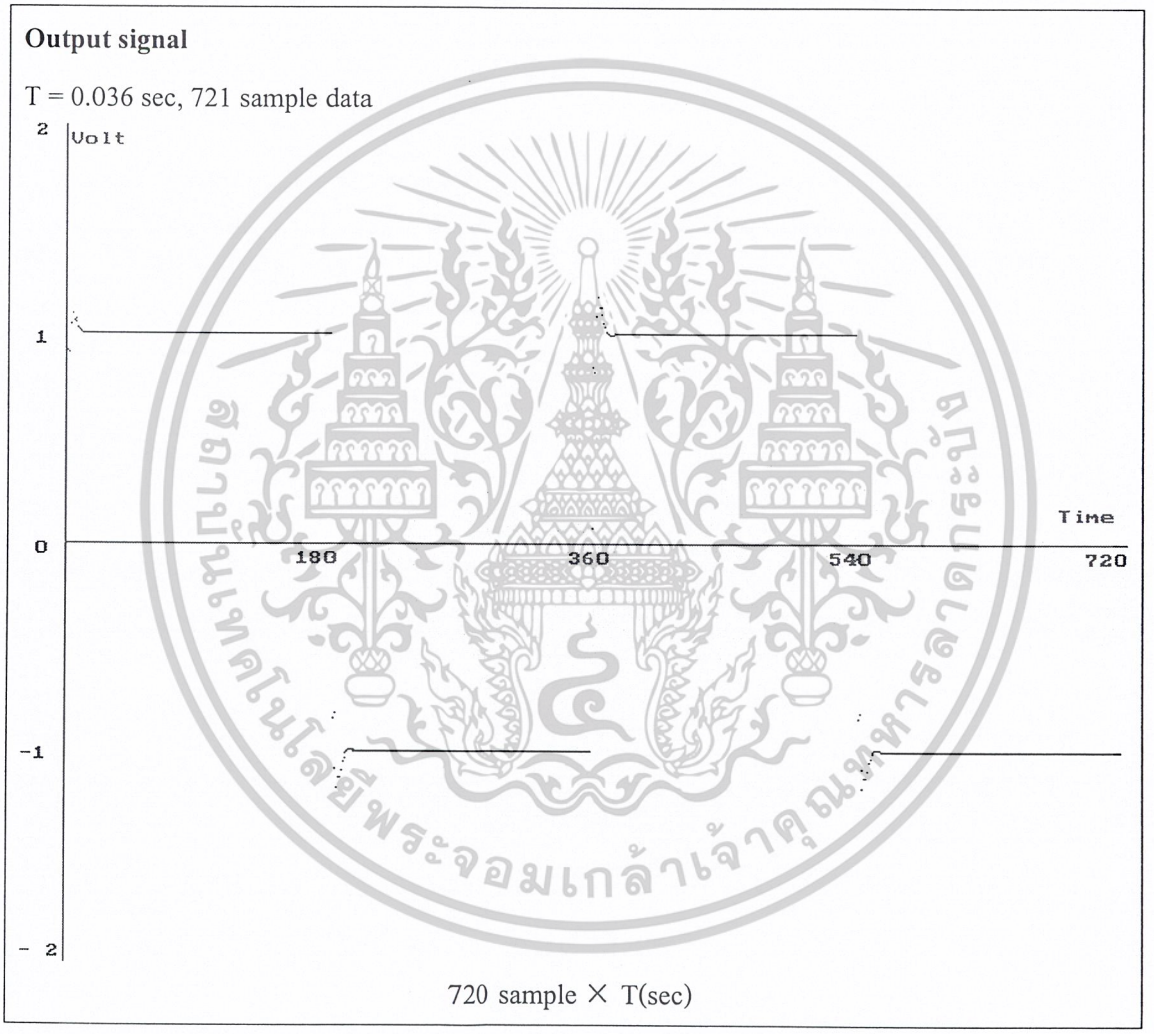
เมื่อค่า α มีค่า 0.4

จากการคำนวณได้พารามิเตอร์ตัวควบคุม และตัวติดตาม

$$R(q^{-1}) = 1.1546 - 1.4598q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 + 0.6168q^{-1} + 0.2420q^{-2}$$

$$T(q^{-1}) = \frac{[1 - 0.8q^{-1} - 0.16q^{-2}]}{0.2317}$$



รูปที่ 4.15 เมื่อค่า α มีค่า 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

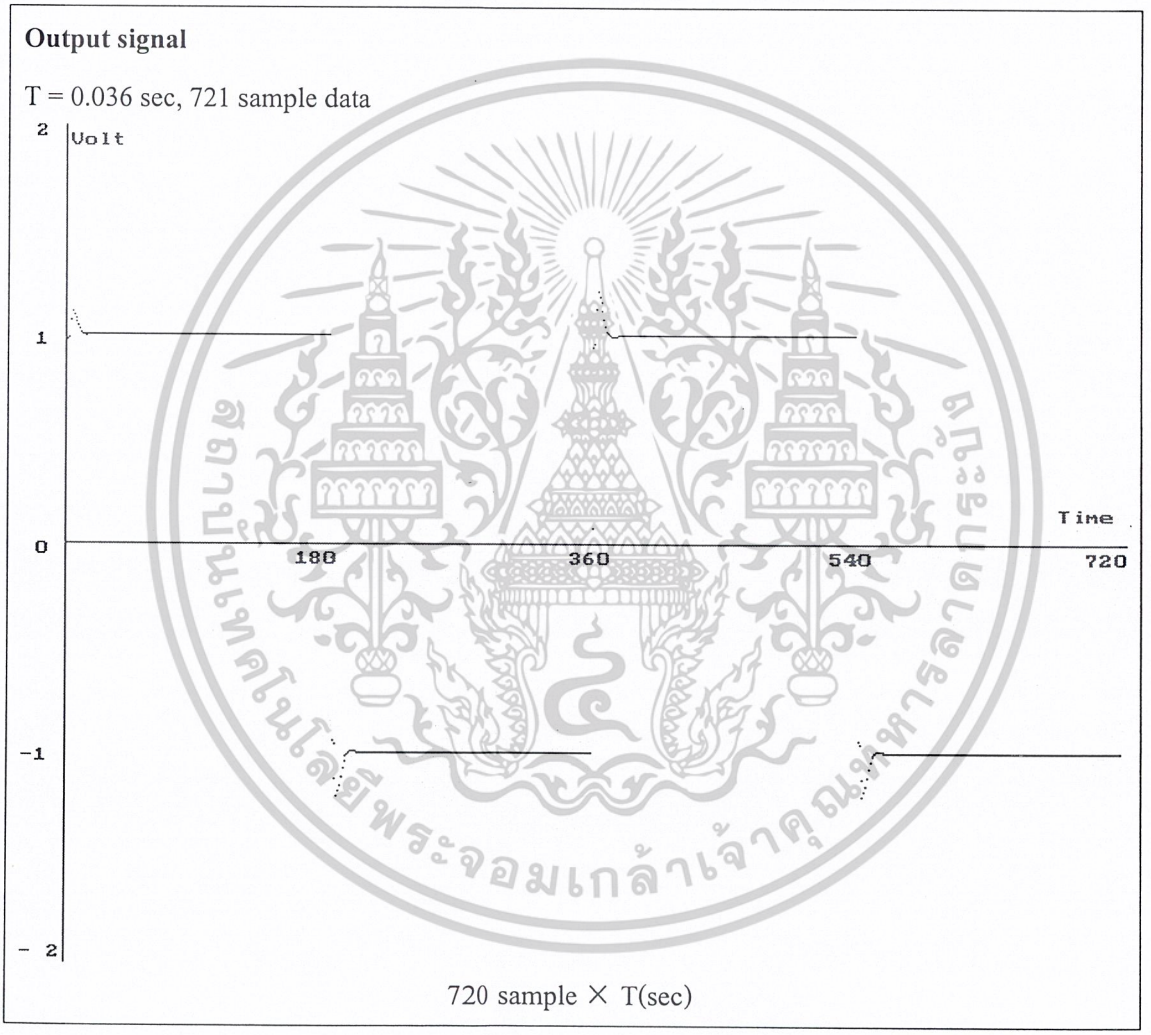
เมื่อค่า α มีค่า 0.5

จากการคำนวณได้พารามิเตอร์ตัวควบคุม และตัวติดตาม

$$R(q^{-1}) = 0.3867 - 0.8687q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 + 0.4168q^{-1} + 0.1440q^{-2}$$

$$T(q^{-1}) = \frac{[1 - q^{-1} - 0.25q^{-2}]}{0.2317}$$



รูปที่ 4.16 เมื่อค่า α มีค่า 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

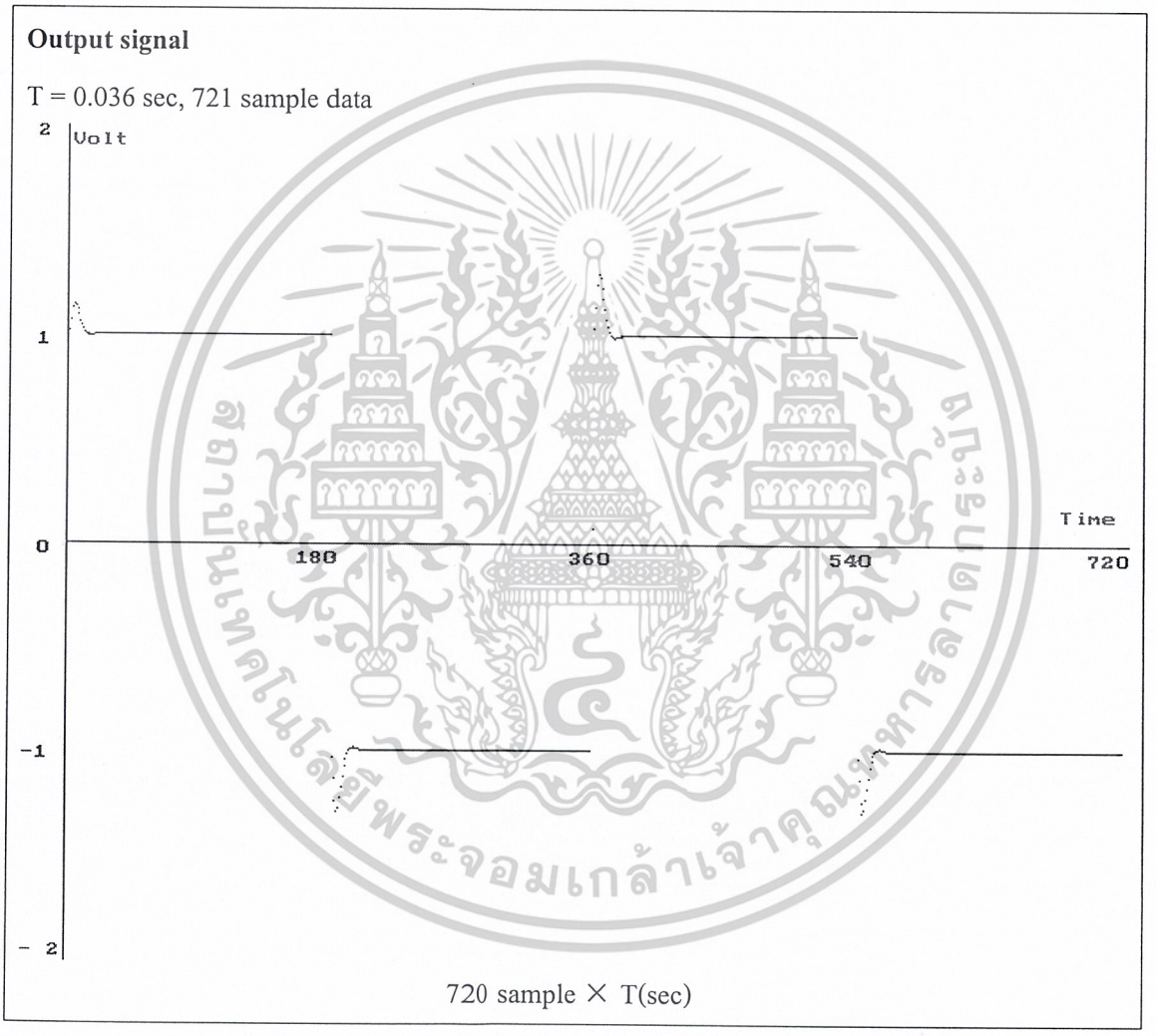
เมื่อค่า α มีค่า 0.6

จากการคำนวณได้พารามิเตอร์ตัวควบคุม และตัวติดตาม

$$R(q^{-1}) = -0.2661 - 0.3120q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 + 0.2168q^{-1} + 0.0517q^{-2}$$

$$T(q^{-1}) = \frac{[1 - 1.2q^{-1} - 0.36q^{-2}]}{0.2317}$$



รูปที่ 4.17 เมื่อค่า α มีค่า 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

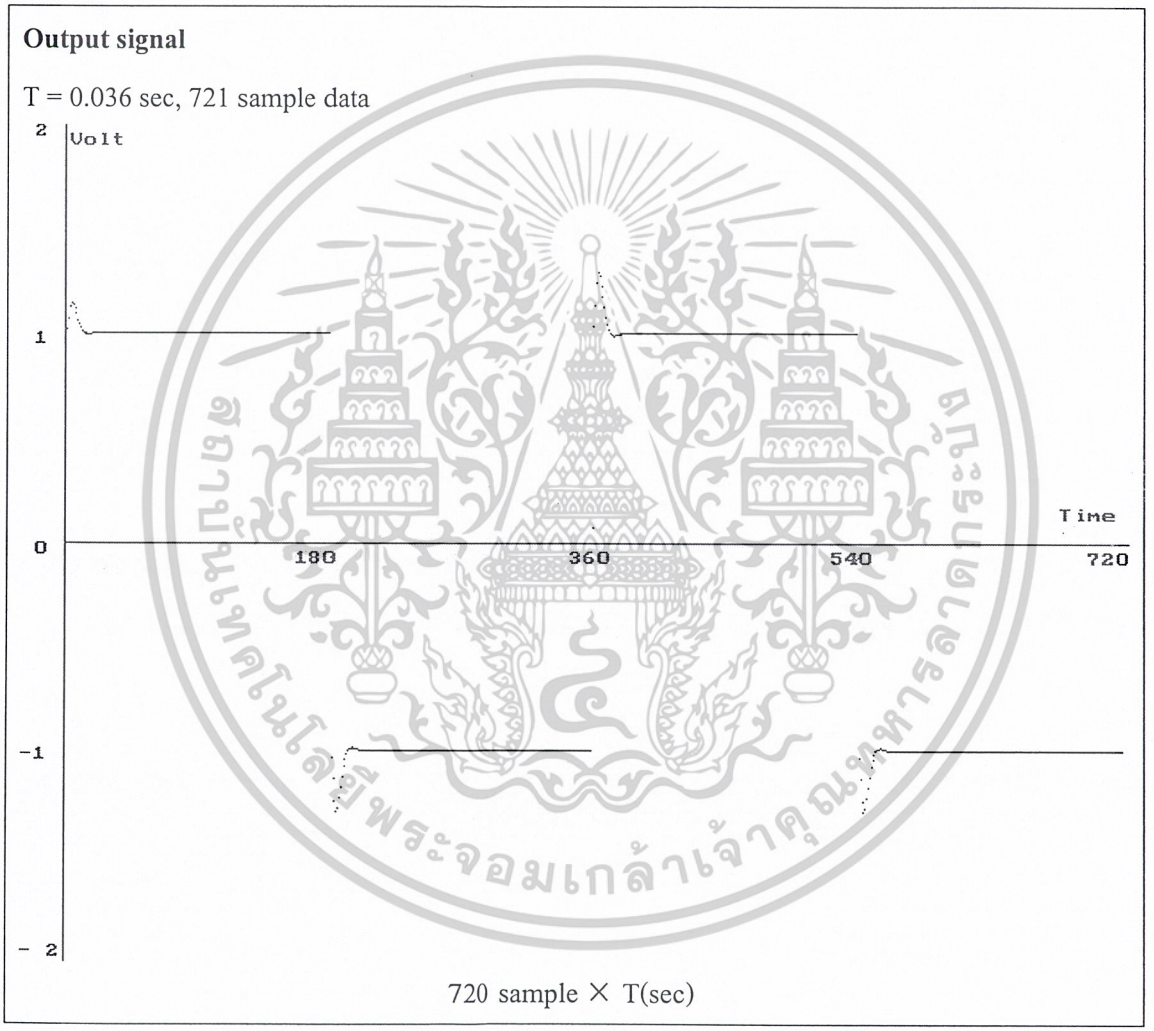
เมื่อค่า α มีค่า 0.7

จากการคำนวณได้พารามิเตอร์ตัวควบคุม และตัวติดตาม

$$R(q^{-1}) = -0.2661 - 0.3120q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 + 0.0168q^{-1} - 0.0348q^{-2}$$

$$T(q^{-1}) = \frac{[1 - 1.4q^{-1} - 0.49q^{-2}]}{0.2317}$$



รูปที่ 4.18 เมื่อค่า α มีค่า 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

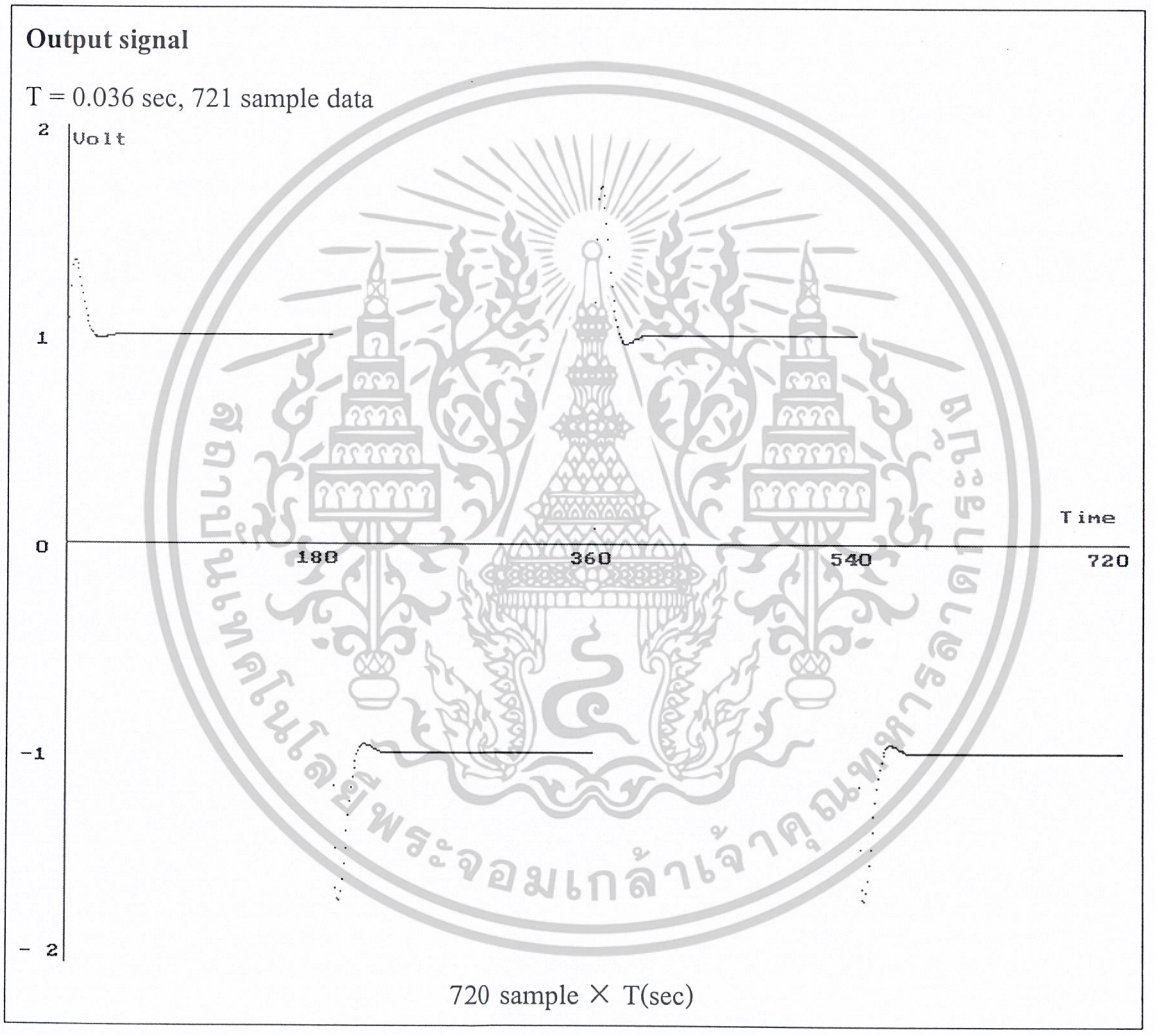
เมื่อค่า α มีค่า 0.8

จากการคำนวณได้พารามิเตอร์ตัวควบคุม และตัวติดตาม

$$R(q^{-1}) = -1.2265 - 0.6980q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 - 0.1832q^{-1} - 0.1157q^{-2}$$

$$T(q^{-1}) = \frac{[1 - 1.6q^{-1} - 0.64q^{-2}]}{0.2317}$$



รูปที่ 4.19 เมื่อค่า α มีค่า 0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

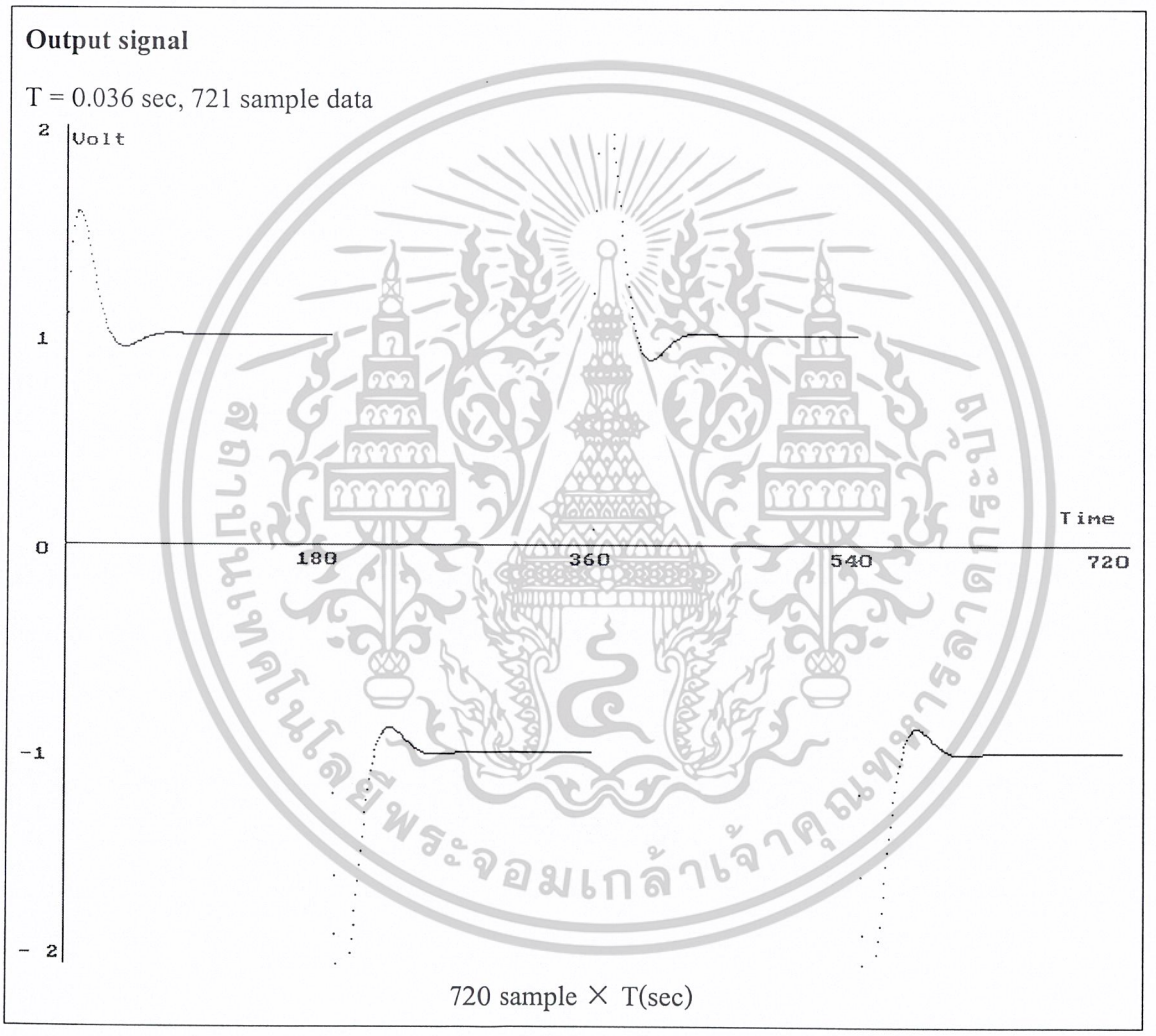
เมื่อค่า α มีค่า 0.9

จากการคำนวณได้พารามิเตอร์ตัวควบคุม และตัวติดตาม

$$R(q^{-1}) = -1.5342 + 0.1157q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 - 0.3832q^{-1} - 0.1908q^{-2}$$

$$T(q^{-1}) = \frac{[1 - 1.8q^{-1} - 0.81q^{-2}]}{0.2317}$$



รูปที่ 4.20 เมื่อค่า α มีค่า 0.9

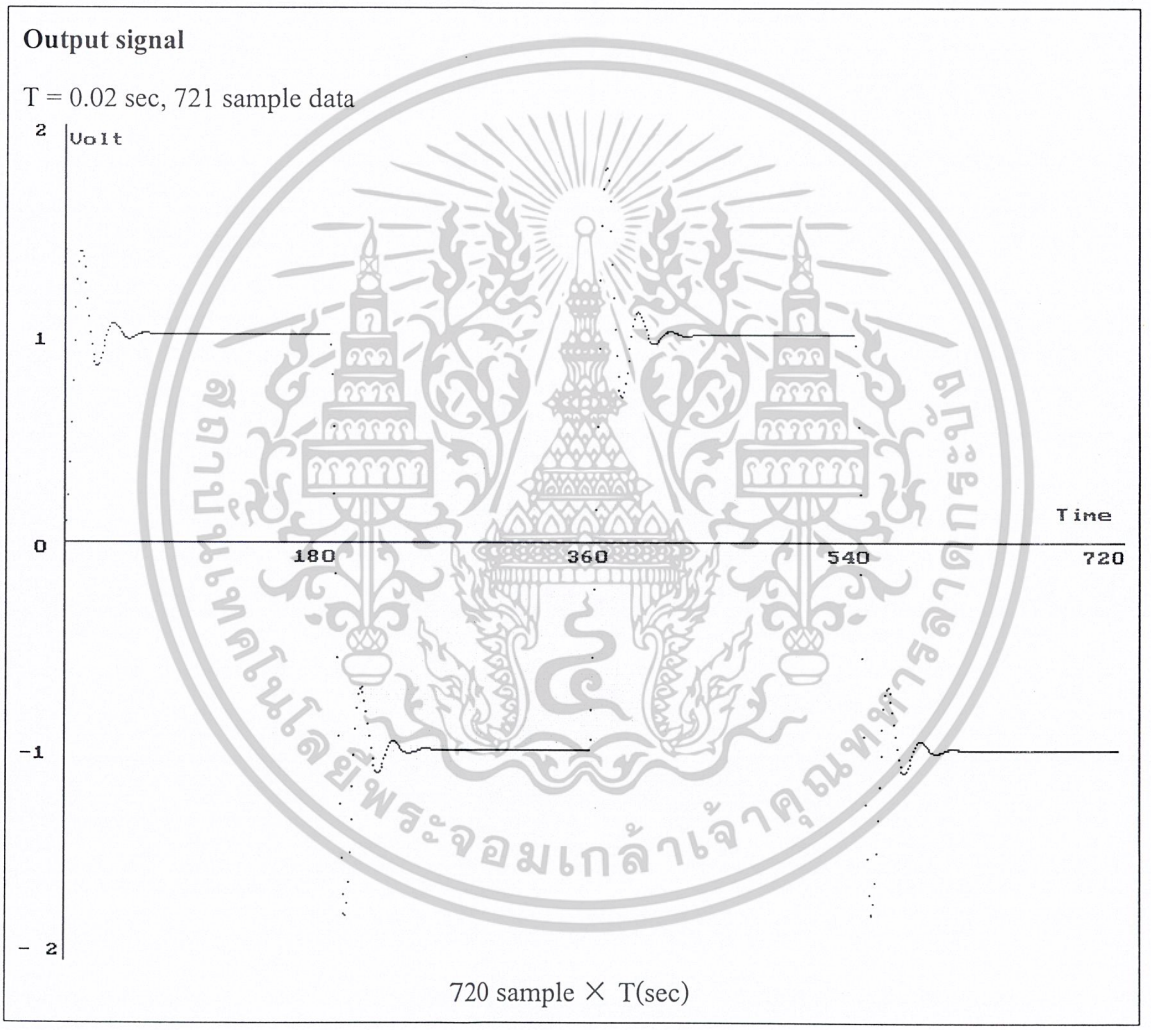
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ทำการทดลองหาเอาท์พุตของระบบควบคุมแบบอะแดพทีฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ แบบจำลองอ้างอิง (Reference Model)

ระบบ (plant) มีค่า Damping ratio(ζ) = 0.4; ω_n = 15,

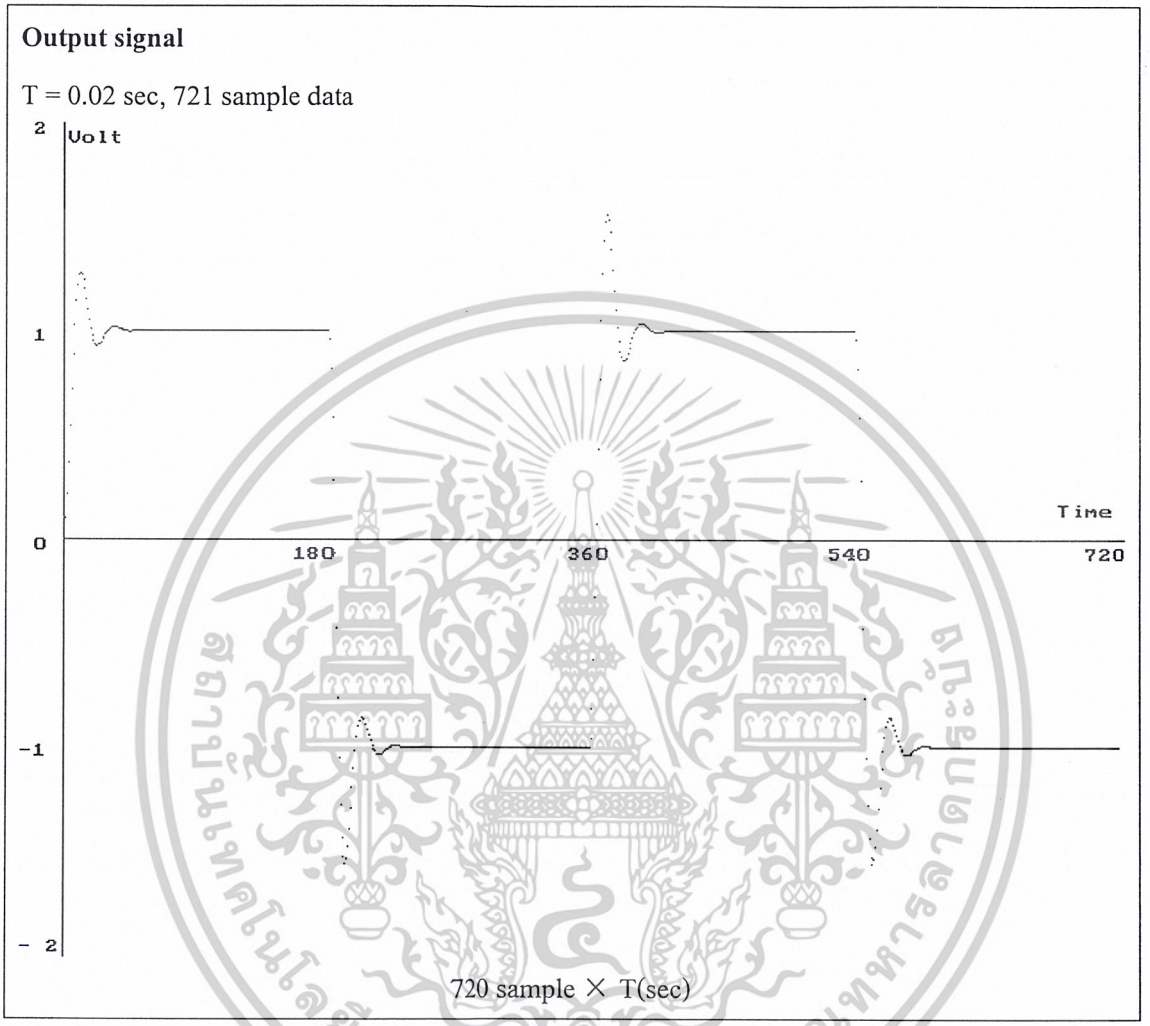
k=1, Sampling time ,Ts = 0.02 sec, ค่า Forgetting factor (λ) = 0.97, Adaptation gain (γ) = 10^3 , ค่า α = 0.3

โดยแบบจำลองอ้างอิง กำหนดค่า ω_n = 15, Damping ratio (ζ) มีค่าตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.9



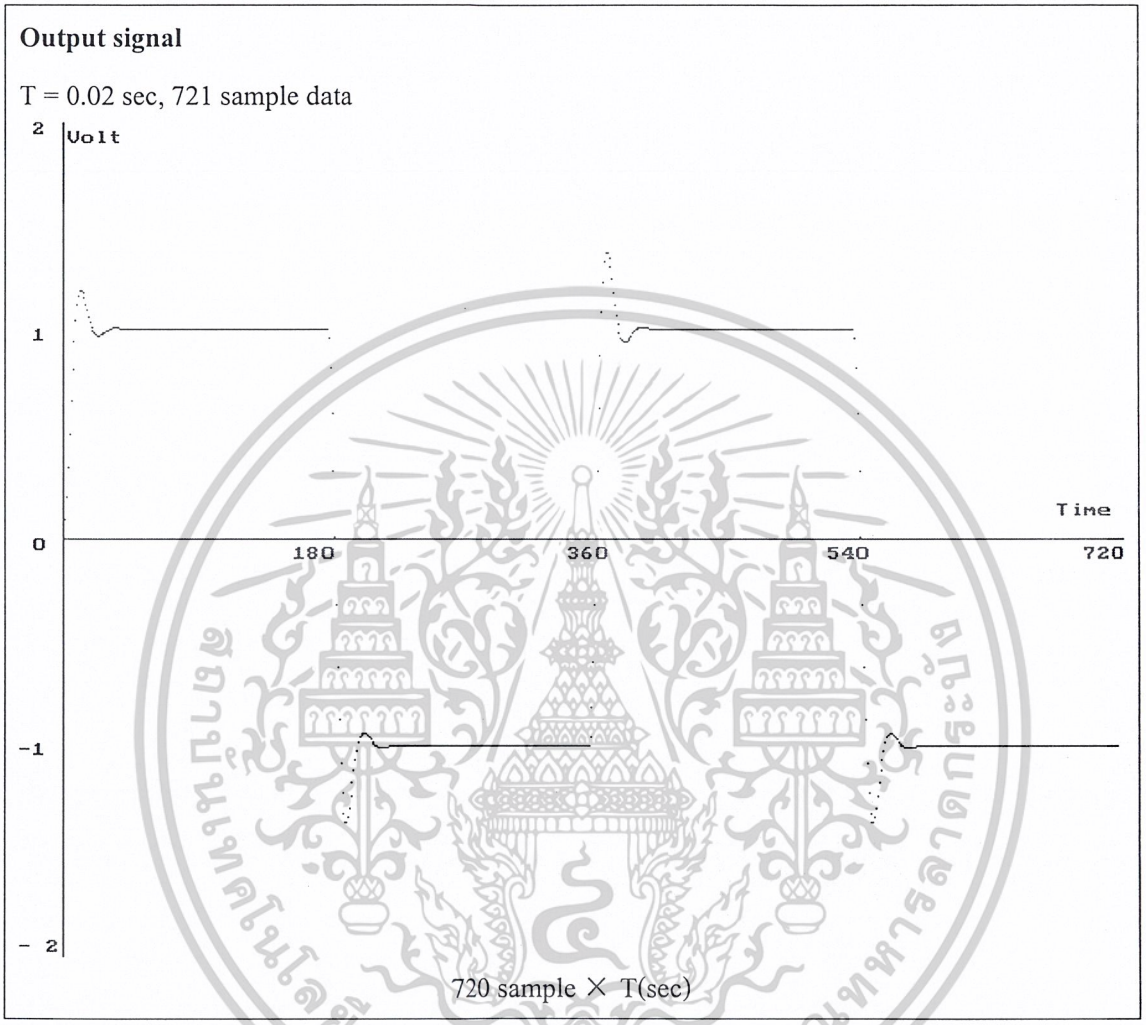
รูปที่ 4.21 เมื่อ Damping ratio (ζ) มีค่า 0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



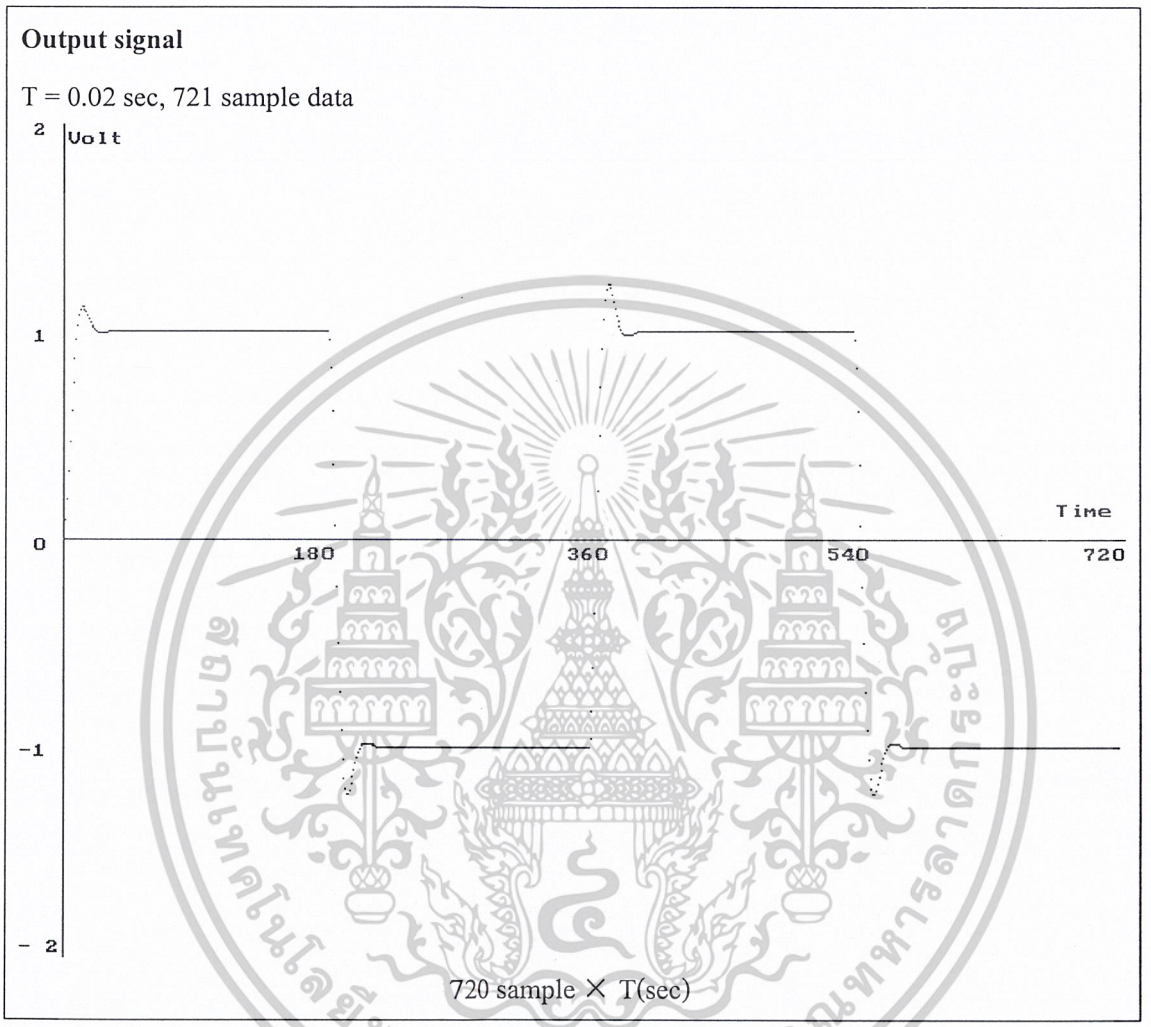
รูปที่ 4.22 เมื่อ Damping ratio (ζ) มีค่า 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



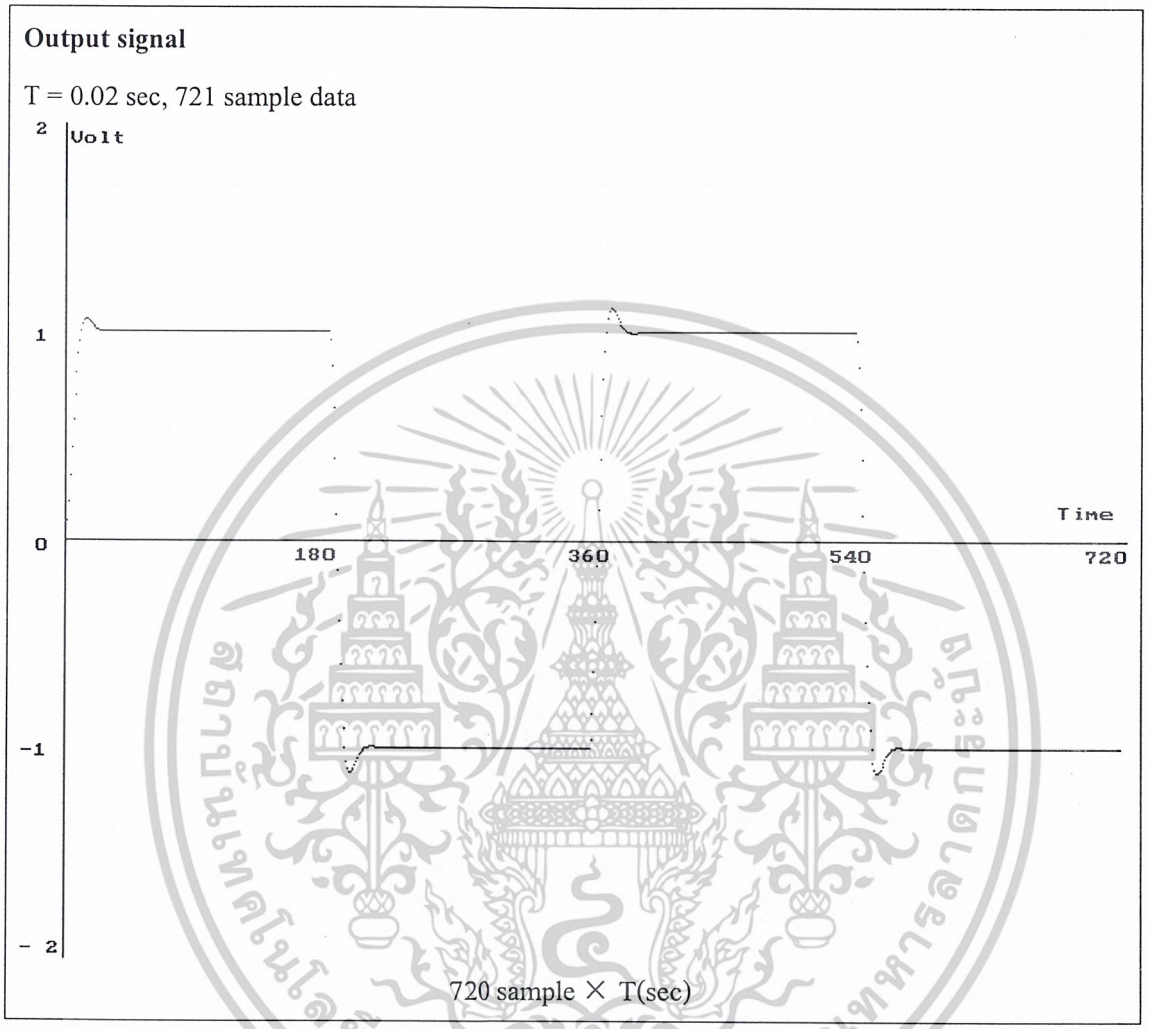
รูปที่ 4.23 เมื่อ Damping ratio (ζ) มีค่า 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



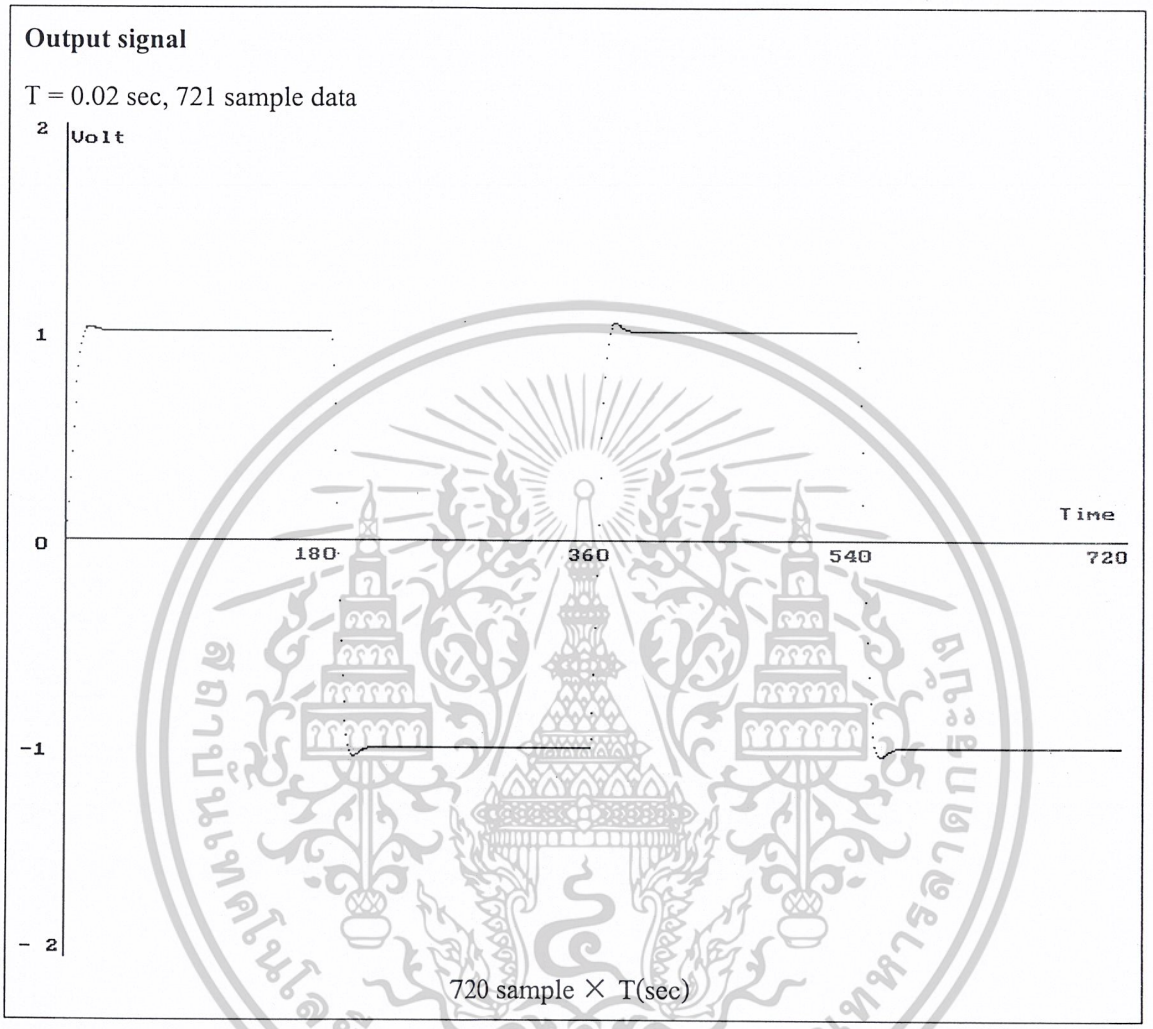
รูปที่ 4.24 เมื่อ Damping ratio (ζ) มีค่า 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



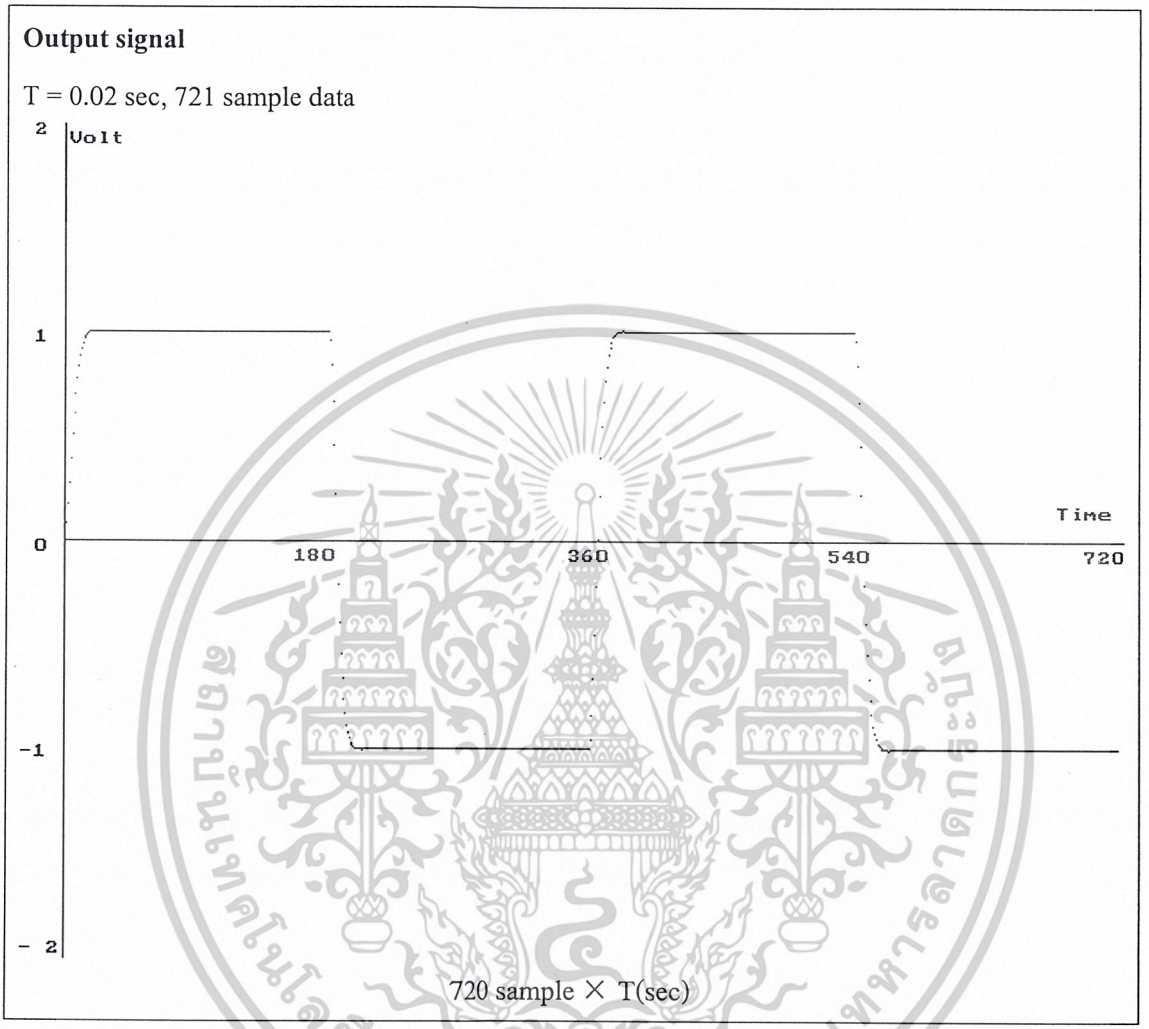
รูปที่ 4.25 เมื่อ Damping ratio (ζ) มีค่า 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 เมื่อ Damping ratio (ζ) มีค่า 0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 เมื่อ Damping ratio (ζ) มีค่า 0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทวิจารณ์และสรุป

5.1 สรุปผลการปฏิบัติงาน

5.1.1 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.1

จากการทดลองระบบที่1 เมื่อค่า ζ = 0.2 พบว่าผลตอบสนองของเอาท์พุตมี สัญญาณพุ่งเกิน (over shoot) สูงมาก แต่ในกระบวนการติดตามเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์จะเห็นว่า ในกระบวนการติดตามค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ระบบที่ 1 จะสามารถติดตามหาค่าพารามิเตอร์ได้ดี ในการทดลองระบบที่2 ที่มีค่า ζ = 0.8 ผลตอบสนองของสัญญาณเอาท์พุต จะเกิดสัญญาณพุ่งเกินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ในขั้นตอนการติดตามเอกลักษณ์ ของพารามิเตอร์ ต้องใช้การคำนวณ ของสัญญาณอินพุตประมาณ 180 ครั้งของการคำนวณ การประมาณค่า (estimate) จึงจะเข้าสู่ค่าจริง เราจึงสามารถสรุปผลการทดลองนี้ได้ว่า ในกระบวนการติดตามเอกลักษณ์ ของพารามิเตอร์ จะสามารถเข้าสู่ค่าจริงได้ดี ถ้าระบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าของสัญญาณเอาท์พุต เร็ว หรือ มีค่าอัตราการหน่วง (damping ratio) น้อยๆ ในทางกลับกันใน กระบวนการติดตามเอกลักษณ์ ของพารามิเตอร์ จะสามารถเข้าสู่ค่าจริงได้ช้า ถ้าระบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าของสัญญาณเอาท์พุตช้า หรือมีค่าอัตราการหน่วง มากๆ

5.1.2 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.2

จากผลการทดลองจะพบว่า ในการติดตามหาค่าเอกลักษณ์ พารามิเตอร์ระบบเดียวกันจะให้ผลของการติดตามพารามิเตอร์ ค่าเดียวกัน แต่จะให้ช่วงเวลาการเข้าสู่ค่าจริงไม่เท่ากัน จากผลการทดลองจะพบว่า ในการทดลอง ที่ใช้ค่า อะแดพเตชันเกน (γ) = 10^{2} จะให้ผลการเข้าสู่ค่าจริงช้ากว่า การทดลองที่ใช้ค่า อะแดพเตชันเกน (γ) = 10^{5} จึงสามารถสรุปได้ว่า ในกระบวนการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ ถ้าค่า อะแดพเตชันเกน มีค่ามากๆ แล้ว จะทำให้กระบวนการติดตามเอกลักษณ์ ของพารามิเตอร์ สามารถเข้าสู่ค่าจริงได้เร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.3

จากการทดลองพบว่า ในกระบวนการติดตามหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ แม้ค่าพารามิเตอร์ของระบบ (plant) จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก แต่การติดตามหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ยังสามารถติดตามหาค่าเอกลักษณ์ค่าใหม่ได้

5.1.4 สรุปผลการทดลองที่ 4.1.4

จากการทดลองพบว่า เมื่อมีสัญญาณ รบกวนเข้ามาในกระบวนการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ จะเกิดผลโดยตรงต่อการเข้าสู่ค่าจริงของการติดตามหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ จะทำให้การเข้าสู่ค่าจริงช้ากว่าในกรณีที่ไม่มี สัญญาณรบกวน และส่งผลให้ค่าผิดพลาด (error) ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณ (estimate) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม กระบวนการติดตามเอกลักษณ์พารามิเตอร์ยังสามารถติดตามเข้าสู่ค่าจริงได้ โดยมีค่าผิดพลาดน้อยมาก

5.1.5 สรุปผลการทดลองที่ 4.2.1

จากการทดลอง เป็นการทดลอง เพิ่มค่า α หรือค่าโพลในระบบ ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9 เพื่อเป็นการหาค่าโพลที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้ ($\zeta = 0.4$; $\omega_n = 15$) จากการทดลองจะพบว่าค่าโพลที่เหมาะสมที่ทำให้สัญญาณเอาท์พุตของระบบ เข้าสู่ค่าอ้างอิง ดีที่สุดคือค่า $\alpha = 0.3$

5.1.6 สรุปผลการทดลองที่ 4.2.2

จากการทดลอง การเพิ่มค่า ζ ในตัวจำลองอ้างอิง โดยการเพิ่ม ζ มีค่าตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.9 เพื่อศึกษาการชดเชยรูปของสัญญาณเอาท์พุต จากผลการทดลองพบว่า เมื่อค่า ζ มีค่าสูงขึ้นทำให้สัญญาณเอาท์พุต มีค่าพุ่งเกิน ลดลง

5.2 ปัญหาในการทำงานและการแก้ไข

ในการศึกษาค้นคว้าและทดลอง โครงงาน Adaptive control ในครั้งนี้พบปัญหา และมีแนวทางแก้ไขดังนี้

5.2.1 ปัญหาในขั้นตอนการเริ่มต้นศึกษาทฤษฎี Adaptive control

พบปัญหาคือหนังสือแต่ละเล่มมีสมการที่แตกต่างกันไปตามแต่ผู้เขียน จึงเป็นการยากที่จะทำการศึกษาให้เข้าใจอย่างรวดเร็ว แต่ก็ไม่สามารถที่จะยึดหนังสือเล่มใดเล่มหนึ่งได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่าเนื้อหาจะไม่ครอบคลุมสิ่งที่ต้องการทราบ การแก้ไขปัญหาในข้อนี้คือ ต้องทำการศึกษาจากตำราหลายๆเล่มแล้วนำมาเปรียบเทียบกันหาสิ่งที่ดีที่สุดของหนังสือแต่ละเล่มแล้วรวบรวมข้อมูลที่ดีที่สุดของหนังสือแต่ละเล่มเอาไว้ ถ้ามีข้อสงสัยที่ไม่อาจจะหาคำตอบได้ก็สอบถามจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน

5.2.2 ปัญหาในขั้นตอนเริ่มต้นของการเขียนโปรแกรม

ปัญหาในการเริ่มต้นเขียนโปรแกรมคือการใส่ข้อมูล (data) ลงใน data vector ถ้าใส่ข้อมูลผิดไปไม่เป็นไปตามสมการ RLS แล้ว จะไม่สามารถทำขั้นตอนการหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ได้ถูกต้องเลย การแก้ไขปัญหาข้อนี้คือในขั้นเริ่มต้น ต้องเขียนแสดงการหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ โดยใส่ค่า data vector ลงไปทีละค่า (ทำเป็น off-line ก่อน) โดยการคูณทีละขั้นตอนตามสมการ RLS ทำให้เป็นขั้นตอนอย่างน้อย 2 ถึง 3 รอบการคำนวณ สามารถตรวจคำตอบกับผลการคำนวณในโปรแกรม Matlab ได้ ขั้นตอนที่ถูกต้องนี้ เราสามารถนำไปเขียนโปรแกรม เพื่อจำลองขั้นตอนการใส่ ข้อมูล ลงใน data vector ได้

5.2.3 ปัญหาในขั้นตอนการเขียนโปรแกรม

ปัญหาในขั้นตอนการเขียนโปรแกรมคือไม่สามารถทำขั้นตอนการหาค่าเอกลักษณ์พารามิเตอร์ได้ถูกต้อง การเรียงลำดับสมการโดยใช้สมการ RLS สมการที่ (2.25), (2.26) และสมการที่ (2.27) ในการคำนวณจำเป็นจะต้องมีลำดับที่ถูกต้อง แต่ในหนังสือ ไม่ได้มีการกล่าวไว้ ทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณไม่สามารถเข้าสู่ค่าจริงได้ เกิดค่าความผิดพลาด (error) มาก การแก้ไขปัญหาคือขั้นตอนการคำนวณ ในขั้นตอนแรกเราจะต้องทำการหาค่าความผิดพลาดก่อน (error) โดยใช้สมการที่ (2.27) เมื่อได้ค่าความผิดพลาด (error) นำมาแทนค่าในสมการการหา ค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (2.25) เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ นำมาแทนค่าหาค่าอะแดพเตชั่นเกน (adaptation gain) ในสมการที่ (2.26) ขั้นตอนการคำนวณที่ถูกต้องนี้ได้จากการสังเกต และทดลอง ทำให้ทราบลำดับของสมการที่ถูกต้อง

5.3 ผลที่ได้รับจากโครงงานนี้

5.3.1 เข้าใจหลักการควบคุมแบบอะแดพทีฟ

5.3.2 สามารถหาเอกลักษณ์พารามิเตอร์ด้วยวิธี RLS

5.3.3 สามารถออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอะแดพทีฟโพลเพลซเมนท์

5.3.4 สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมระบบ โดยใช้หลักการอะแดพทีฟโพลเพลซเมนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 แนวทางการพัฒนา

5.4.1 โครงงานนี้เป็นการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบ อะแดพทีฟโพลเพลซเมนต์ การพัฒนาต่อไป คือนำโปรแกรมที่เขียนขึ้นมา ไปทำการประยุกต์ใช้กับระบบที่เป็นระบบจริง

5.4.2 ในขั้นตอนการวางโพลที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นแบบทดลองใส่ค่าโพลแล้วดูผลตอบสนองของสัญญาณเอาท์พุต แล้วเลือกค่าโพลที่ทำให้ผลการตอบสนองของสัญญาณเอาท์พุตดีที่สุด ในขั้นตอนการพัฒนา ควรมีการพัฒนาโพลให้เลือกค่าโพลที่ดีที่สุด แบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเนื่องมาจากบุคคลสำคัญ หลายท่าน ได้แก่ อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์พรสุข รติโรจน์อนันต์ เป็นผู้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงงาน รวมถึงแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิต อาจารย์ถาวร ที่ให้คำแนะนำและปรึกษา และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ทุกท่านที่ได้ มอบความรู้ ด้านวิชาการต่างๆ ให้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนโดย เฉพาะ คุณภัทร และ คุณปิติพงษ์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในด้านการเขียนโปรแกรม ทั้งโปรแกรม matlab และ ภาษา C ที่ลืมไม่ได้คือ ขอขอบคุณ พ่อ แม่ ที่ให้การสนับสนุนด้วยดีมาตลอด ขอบคุณ พี่ น้อง ที่เป็นกำลังใจที่ดี เสมอมา ขออวยพรให้บุคคลที่กล่าวถึงมีจิตใจแจ่มใส มีสุขภาพร่างกายแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟลวชาร์ท แสดงลำดับการทำงานของ โปรแกรมการควบคุมแบบอะแดพทีฟโพลเพลซเมนท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. Landau I.D. **System Identification and Control Design**. Prentice Hall, 1990.
2. Wellstead P. E. and Zarrop M.B. **Self – Tuning Systerms**. John Wiley and Sons, 1991.
3. Torsten Soderstrom and Petre stoica .**System Identification** . Prentice Hall, 1988.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้