

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวเองสำหรับระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์

DEVELOPMENT OF SELF-TUNING PID CONTROLLER FOR DISTRIBUTED
CONTROL SYSTEM



นายไพฑูรย์ เดชะหงษ์สุวรรณ
MR. PAITOON DECHAHONGSUWAN

เลขหมู่
เลขทะเบียน 17537
วัน, เดือน, ปี 10 ก.ค. 2535

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2534

ISBN 974-8157-62-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF SELF-TUNING PID CONTROLLER FOR DISTRIBUTED
CONTROL SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ELECTRICAL ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1991

ISBN 974-8157-62-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวเองสำหรับระบบ-
ควบคุมแบบกระจายศูนย์

DEVELOPMENT OF SELF-TUNING PID CONTROLLER
FOR DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM

นักศึกษา

นายไพฑูรย์ เดชะหงษ์สุวรรณ

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2534

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการวิจัยเพื่อพัฒนาตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวเอง สำหรับระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ เพื่อแก้ปัญหาพารามิเตอร์ของกระบวนการมีความไม่แน่นอน สมรรถนะการควบคุมของระบบจะเลวลงเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการหรือการรบกวนจากภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง การวิจัยทำเพื่อแก้ปัญหานี้ โดยนำตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิมมาพัฒนาเป็นตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวเอง สำหรับระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ ทำให้ระบบควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการให้มีสมรรถนะที่ดีเหมือนเดิม แม้ว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการหรือการรบกวนจากภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงไป

THESIS TITLE DEVELOPMENT OF SELF-TUNING PID CONTROLLER
FOR DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM
STUDY MR. PAITON DECHAHONGSUWAN
THESIS ADVISOR ASSOC. PROF. DR. YOTHIN PREMPRANEERACH
LEVEL OF STUDY MASTER OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT ELECTRICAL ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY
LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 1991

ABSTRACT

This thesis describes the research and development of a self-tuning PID controller on a distributed control system for solving the problems which occur when the parameters of the process are varied. The performance of the control system will be decreased due to the parameters of process or when the disturbance is varied. This thesis presents the implementation of the self-tuning PID controller on the distributed control system for finding a solution to the above mentioned problem, by developing the classical PID with a self-tuning technique, which is achieved by adding software development to the classical PID controller. This controller can control the process which gives the high performance of output response even when the parameters of the process are varied or if the external disturbance occurs.

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

สารบัญ

สรุปตัวแปรในวิทยานิพนธ์

1. บทนำ	1.1
ปัญหาของการใช้งานตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง	1.2
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	1.4
2. ตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง	2.1
2.1 ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดเปรียบเทียบรูปแบบอ้างอิง	2.3
2.2 ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดระบุเอกลักษณ์ของระบบ	2.14
2.2.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ	2.15
2.2.1.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบแบบ Conventional least Square	2.15
2.2.1.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบแบบ Fast least Square	2.17
2.2.2 การออกแบบตัวควบคุม	2.19
2.2.2.1 ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองแบบPID	2.19
2.2.2.1.1 ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองแบบPID ด้วยISE IAE ITAE	2.20
2.2.2.1.2 ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองแบบPID ด้วย Ziegler-Nichols	2:24

2.2.2.1.3	ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองแบบPID ด้วย Deadbeat Algorithm	2.26
2.2.2.2	ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองแบบเล็งเล็ก	2.29
2.2.2.3	ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองแบบกำหนดโพล-ซีโร	2.34
3.	การจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์	3.1
	จุดประสงค์การจำลองระบบควบคุม	3.1
	การจำลองระบบ	3.2
	การจำลองตัวควบคุม	3.3
	การทดสอบการควบคุม	3.3
	สรุปผลการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์	3.15
4.	การใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองควบคุมกระบวนการจริง	4.1
	ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์	4.1
	โครงสร้างของระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์	4.5
	ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ที่ใช้ในการทดลอง	4.6
	กระบวนการตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศ	4.13
	การออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวเองบน	4.15
	ผลการทดสอบ	4.29
	สรุปผลการทดสอบ	4.36
5.	บทสรุป	5.1
	ข้อเสนอแนะในการวิจัย	5.2
	เอกสารอ้างอิง	
	กิตติกรรมประกาศ	
	ภาคผนวก 1. โปรแกรมจำลองกระบวนการแบบพารามิเตอร์คงที่	ผ1.1
	ภาคผนวก 2. โปรแกรมจำลองกระบวนการแบบพารามิเตอร์เปลี่ยน	ผ2.1
	แปลงตามเวลา	

ภาคผนวก 3.	โปรแกรมจำลองตัวควบคุมแบบพารามิเตอร์คงที่	ผ3.1
ภาคผนวก 4.	โปรแกรมจำลองส่วนระบุเอกลักษณ์	ผ4.1
ภาคผนวก 5.	โปรแกรมจำลองตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง	ผ5.1
ภาคผนวก 6.	โปรแกรมตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง	ผ6.1



สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1.1	ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายมาตรฐาน	2.4
รูปที่ 2.1.2	ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงการรบกวนมาตรฐาน	2.5
รูปที่ 2.1.3	Flowchart โปรแกรมการหาค่าพารามิเตอร์	2.6
รูปที่ 2.1.3	Flowchart โปรแกรมการหาค่าพารามิเตอร์ (ต่อ)	2.7
รูปที่ 2.1.4	ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า PID	2.10
รูปที่ 2.1.5	ตารางการกำหนดผลตอบสนองและค่าถ่วงน้ำหนัก	2.12
รูปที่ 2.1.6	ลักษณะแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะ	2.13
รูปที่ 2.2.2.1.1	ตารางการปรับแต่งแบบ ISE, IAE, ITAE	2.23
รูปที่ 2.2.2.1.2	ตารางการปรับแต่งแบบ Zeigler-Nichols	2.25
รูปที่ 2.2.2.3.1	กระบวนการที่ทำการศึกษา	2.35
รูปที่ 3.1	การระบุเอกลักษณ์ด้วย CLS และ Forgetting Factor = 0.995	3.5
รูปที่ 3.2	การระบุเอกลักษณ์ด้วย CLS และ Forgetting Factor = 0.999	3.5
รูปที่ 3.3	การระบุเอกลักษณ์ด้วย CLS และ Forgetting Factor = 0.9995	3.5
รูปที่ 3.4	การระบุเอกลักษณ์ด้วย CLS และ Forgetting Factor = 0.9999	3.5
รูปที่ 3.5	ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ ISE(Dist)	3.6
รูปที่ 3.6	ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ IAE(Dist)	3.6
รูปที่ 3.7	ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ ITAE(Dist)	3.6
รูปที่ 3.8	ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ ISE(S.P.)	3.6
รูปที่ 3.9	ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ IAE(S.P.)	3.7

รูปที่ 3.10	ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ ITAE(S.P.)	3.7
รูปที่ 3.11	ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ Zeigler-Nichols	3.7
รูปที่ 3.12	ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ Deadbeat	3.7
รูปที่ 3.13	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ ISE(Dist)	3.8
รูปที่ 3.14	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ IAE(Dist)	3.8
รูปที่ 3.15	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ ITAE(Dist)	3.8
รูปที่ 3.16	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ ISE(S.P.)	3.8
รูปที่ 3.17	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ IAE(S.P.)	3.9
รูปที่ 3.18	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ ITAE(S.P.)	3.9
รูปที่ 3.19	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ Zeigler-Nichols	3.9
รูปที่ 3.20	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ Deadbeat	3.9
รูปที่ 3.21	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ ISE	3.10
รูปที่ 3.22	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ IAE	3.10

รูปที่ 3.23	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ ITAE	3.20
รูปที่ 3.24	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ Zeigler-Nichols	3.10
รูปที่ 3.25	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ Deadbeat	3.10
รูปที่ 3.26	ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบปรับตัวเองโดยใช้ Zeigler-Nichols	3.11
รูปที่ 3.27	ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบปรับตัวเองโดยใช้ Deadbeat	3.11
รูปที่ 4.1.1	โครงสร้างระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์	4.7
รูปที่ 4.1.2	ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ขณะใช้งาน	4.8
รูปที่ 4.2	Distributed Process Unit (DPU)	4.9
รูปที่ 4.3	DPU ที่ใช้งาน	4.10
รูปที่ 4.4	ตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศแบบ Ljungstrom	4.11
รูปที่ 4.5	ตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศที่ใช้งานกับหม้อต้มไอน้ำ	4.12
รูปที่ 4.6	การทำงานของตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศ	4.14
รูปที่ 4.7.1	Signal Flow Diagram ของส่วนระบบเอกลักษณ์	4.17
รูปที่ 4.7.2	Signal Flow Diagram ของส่วนระบบเอกลักษณ์ (ต่อ)	4.18
รูปที่ 4.7.3	วงจรควบคุมตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศแบบปรับตัวเอง	4.19
รูปที่ 4.8	วงจรควบคุมตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศแบบพารามิเตอร์คงที่	4.20
รูปที่ 4.9.1	ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่โหลด 100%	4.21
รูปที่ 4.9.2	ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่โหลดเปลี่ยนจาก 100% ไป 75%	4.22
รูปที่ 4.9.3	ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่โหลดเปลี่ยนจาก 175% ไป 50%	4.23
รูปที่ 4.9.4	ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่โหลด 50%	4.24
รูปที่ 4.10	ผลการควบคุมขณะที่โหลดคงที่ 100%	4.25
รูปที่ 4.11	ผลการควบคุมขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง	4.26

สรุปตัวแปรในวิทยานิพนธ์

$A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1})$	= System polynomials
$D(z^{-1})$	= Filter polynomial
$E(z^{-1}), F(z^{-1})$	= Decomposition factors
$F(z^{-1}), G(z^{-1})$	= Predictor polynomials
$P(z^{-1})$	= Polynomial which generates Pseudo-process
$Q(z^{-1})$	= Control weighting transfer function
$a(t)$	= Zero mean white noise
u	= Control signal
r	= Setpoint
y	= System output
z^{-1}	= Backward shift operator
$\phi(t)$	= Auxiliary Output
k	= Normalized process gain
k_p	= Process gain
k_c	= Controller gain
k_u	= Ultimate gain
T_i	= Integral time
T_D	= Derivative time
T_u	= Ultimate period
λ	= Forgetting factor
θ	= Deadtime

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

บทนำ

ตั้งแต่อดีตที่ผ่านมา ในวงการอุตสาหกรรมได้มีความพยายามที่จะนำระบบควบคุมที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้เองอย่างอัตโนมัติมาใช้ เนื่องจากปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ ด้วยพนักงานเดินเครื่อง หรือวิศวกรควบคุมกระบวนการ จะทำได้ช้า และยากที่จะกำหนดสมรรถนะของระบบควบคุมได้แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นกับขีดจำกัดทางด้านความรู้ความสามารถ และประสบการณ์ของผู้ปรับแต่ง นอกจากนี้ในระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามเวลา การใช้มนุษย์เป็นผู้ปรับแต่ง จะทำให้สมรรถนะของการควบคุมลดลง เนื่องจากมักจะรอให้สมรรถนะของการควบคุมลดลงก่อนที่จะมีการปรับแต่ง ดังนั้นความคิดที่จะนำระบบควบคุมแบบปรับตัวเองมาใช้ จึงอยู่ในหลักการที่ว่า ระบบควบคุมจะต้องสามารถกำหนดสมรรถนะได้ตามที่ต้องการ และสามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวเองได้โดยอัตโนมัติ เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของการควบคุมกระบวนการ จากความพยายามที่จะนำระบบควบคุมแบบปรับตัวเองมาใช้ในอุตสาหกรรม ทำให้มีการเสนอแนวความคิดและทฤษฎีของระบบควบคุมแบบปรับตัวเองในหลายๆรูปแบบ เช่น แบบจดจำรูปแบบ (PATTERN RECOGNITION) [1][4], แบบการแปรปรวนน้อยที่สุด (Minimum Variance Control) [8], แบบกำหนดโพล-ซีโร (Pole-Zero placement) [2] โดยทั่วไประบบควบคุมแบบปรับตัวเอง นอกจากแบบจดจำรูปแบบ ที่ใช้การปรับแต่งพารามิเตอร์จากตาราง และการตัดสินใจแบบตรรกแล้วการคำนวณต่างๆจะใช้ หลักการระบุ

เอกลักษณ์ของระบบ(System Identification) และคำนวณตามกฎ-
การควบคุม(Control Law)

ปัญหาการใช้งานตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง

ในความพยายามที่จะใช้ ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองในงานอุตสาหกรรมนั้นยังไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากสมรรถนะในการควบคุมในงานอุตสาหกรรมนั้น มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันและบางเงื่อนไขทำให้ ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองไม่สามารถตอบสนองได้ โดยความต้องการในการควบคุมในอุตสาหกรรมมีเงื่อนไขดังนี้

1. ตัวควบคุมจะต้องมีความน่าเชื่อถือสูง คือมีความทนทานต่อการใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน และในสภาพแวดล้อมที่เลวได้ ทำให้ ตัวควบคุมที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ถูกออกแบบเป็นพิเศษ โดยเลือกอุปกรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือในการใช้งานสูง และมักมีฟังก์ชันในการใช้งานที่ง่าย ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงความบกพร่องในการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์เอง

2. ตัวควบคุมจะต้องมีเสถียรภาพสูง การทำงานตามฟังก์ชันของตัวควบคุมจะต้องไม่มีการกระทำใดๆ ที่เป็นการรบกวนต่อกระบวนการรวมทั้งสามารถควบคุมกระบวนการให้มีสมรรถนะในการเดินเครื่องที่ดี ทนทานต่อการรบกวนจากสิ่งต่างๆ ได้ดี

3. ตัวควบคุมจะต้องมีฟังก์ชันการทำงานที่ไม่ซับซ้อน มีความง่ายในการตรวจสอบและแก้ไขการทำงานของตัวควบคุม รวมถึงง่ายต่อการ

จากเงื่อนไขต่างๆ ทำให้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากข้อจำกัดจากอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง เช่น ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดจจจำรูปแบบ (Pattern Recognition) ในช่วงปรับแต่งพารามิเตอร์ จะมีการรบกวนกระบวนการก่อนเพื่อหาผลตอบสนองของระบบควบคุม ก่อนที่จะมีการปรับแต่ง หรือตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดระบุเอกลักษณ์ของระบบ ในปัจจุบันยังไม่สามารถรับรองได้ว่า การคำนวณจะลู่เข้า (Converge) หากการคำนวณลู่ออก จะทำให้ระบบเสียหายได้ นอกจากนี้ตัวควบคุมแบบ Minimum Variance Control และ Pole Cancellation ถึงแม้จะรักษาค่าตัวแปรกระบวนการได้ดี แต่ก็ทำให้สัญญาณควบคุมมีการแปรปรวนสูง ทำให้ระบบมีลักษณะเสถียรภาพต่ำ ในการใช้กับกระบวนการจริง อาจจะทำให้อุปกรณ์ขับเคลื่อน วาล์ว มอเตอร์ เสียหายได้ [4][2][5][6]

ดังนั้นการพัฒนาตัวควบคุมแบบปรับตัวเองจึงยึดหลักการต่อไปนี้

1. อัลกอริทึมที่ใช้งานควรจะมีเสถียรภาพสูงคือไม่มีแนวโน้มที่จะลู่ออก
2. อัลกอริทึม ควรจะสะดวกในการพิจารณาในรูปของ Discrete Time System ทำให้สะดวกในการพัฒนาเป็นโปรแกรม
3. อัลกอริทึมที่ใช้ในการควบคุมควรจะสะดวกและง่ายต่อการกำหนดสมรรถนะในการควบคุมของระบบ

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิจัยเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาตัวควบคุมแบบปรับตัวเองบนระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ โดยมีเนื้อหา ดังนี้

- บทที่ 1. จะเป็นบทนำในการศึกษาตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง
- บทที่ 2. จะเป็นการศึกษาตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดต่างๆทางด้านทฤษฎีได้แก่ ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดเปรียบเทียบรูปแบบอ้างอิง และตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดระบุเอกลักษณ์ เพื่อหาชนิดของตัวควบคุมแบบปรับตัวเองที่เหมาะสมต่อการพัฒนาบนระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์
- บทที่ 3. จะเป็นการเลือกเอาตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดระบุเอกลักษณ์มาจำลองการควบคุมกระบวนการด้วยคอมพิวเตอร์ โดยเปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุมแบบปรับตัวเองที่ใช้ทฤษฎีการปรับแต่งต่างๆกันซึ่งได้แก่ ISE IAE ITAE Zeigler-Nichols และ Deadbeat Algorithm นำผลที่ได้มาสรุปในตารางเพื่อเลือกใช้ทฤษฎีการปรับแต่งกับกระบวนการจริง
- บทที่ 4. จะเป็นการพัฒนาตัวควบคุมแบบปรับตัวเองบนระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์และทดลองควบคุมกระบวนการตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศ
- บทที่ 5. จะเป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนาตัวควบคุมแบบปรับตัวเองต่อไป

บทที่ 2

ตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง

ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองคือตัวควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวเอง ตามความเป็นไปของกระบวนการ เพื่อให้สมรรถนะในการควบคุม อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ตลอดเวลา โดยที่เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนไป ตัวควบคุมอาจจะเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าของพารามิเตอร์ หรืออาจจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวควบคุม เพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการได้สมรรถนะในระดับที่ต้องการ

สาเหตุที่ทำให้กระบวนการมีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เป็นไปได้หลายประการดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการเดินเครื่อง เช่น อัตราขยายของกระบวนการ (Process Gain) เปลี่ยนแปลงตามค่าเป้าหมายในกระบวนการควบคุม pH [7][8]
2. การเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ เช่น การเปลี่ยนแปลงชนิดของเชื้อเพลิงในกระบวนการหม้อต้มไอน้ำ
3. การรบกวนจากตัวรบกวนภายนอก (External Disturbance) เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของไอน้ำ ที่ใช้ในตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อัตราขยายของกระบวนการ (Process Gain) เปลี่ยนแปลง
4. การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการตามเวลา เช่น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ลดลงตามเวลาทำให้ อัตราขยายของกระบวนการ ลดลง และ

ค่าคงตัวขงเวลา เพิ่มขึ้น ตามเวลา

จากสาเหตุดังกล่าวจะทำให้กระบวนการ เป็นระบบที่มีความไม่แน่นอน การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบค่าพารามิเตอร์คงที่ เช่น ตัวควบคุมแบบ PID ทำให้การควบคุมกระบวนการ มีสมรรถนะ (Performance) ไม่แน่นอนเป็นไปตามเงื่อนไขการทำงานขอกระบวนการ การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิศวกร มักจะทำได้ล่าช้าและเสียค่าใช้จ่ายมาก

ดังนั้นในการแก้ปัญหา จึงได้มีการพัฒนาตัวควบคุม ที่สามารถปรับพารามิเตอร์ของตัวเองให้เหมาะสมกับสภาพเป็นจริงของกระบวนการ ซึ่งมีการพัฒนาในหลายรูปแบบและวิธีการดังนี้

ชนิดของตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง

ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งออกตามหลักการทำงาน การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ 2 ชนิดคือ

2.1 ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดที่ใช้การเปรียบเทียบกับรูปแบบอ้างอิง (Model Reference)

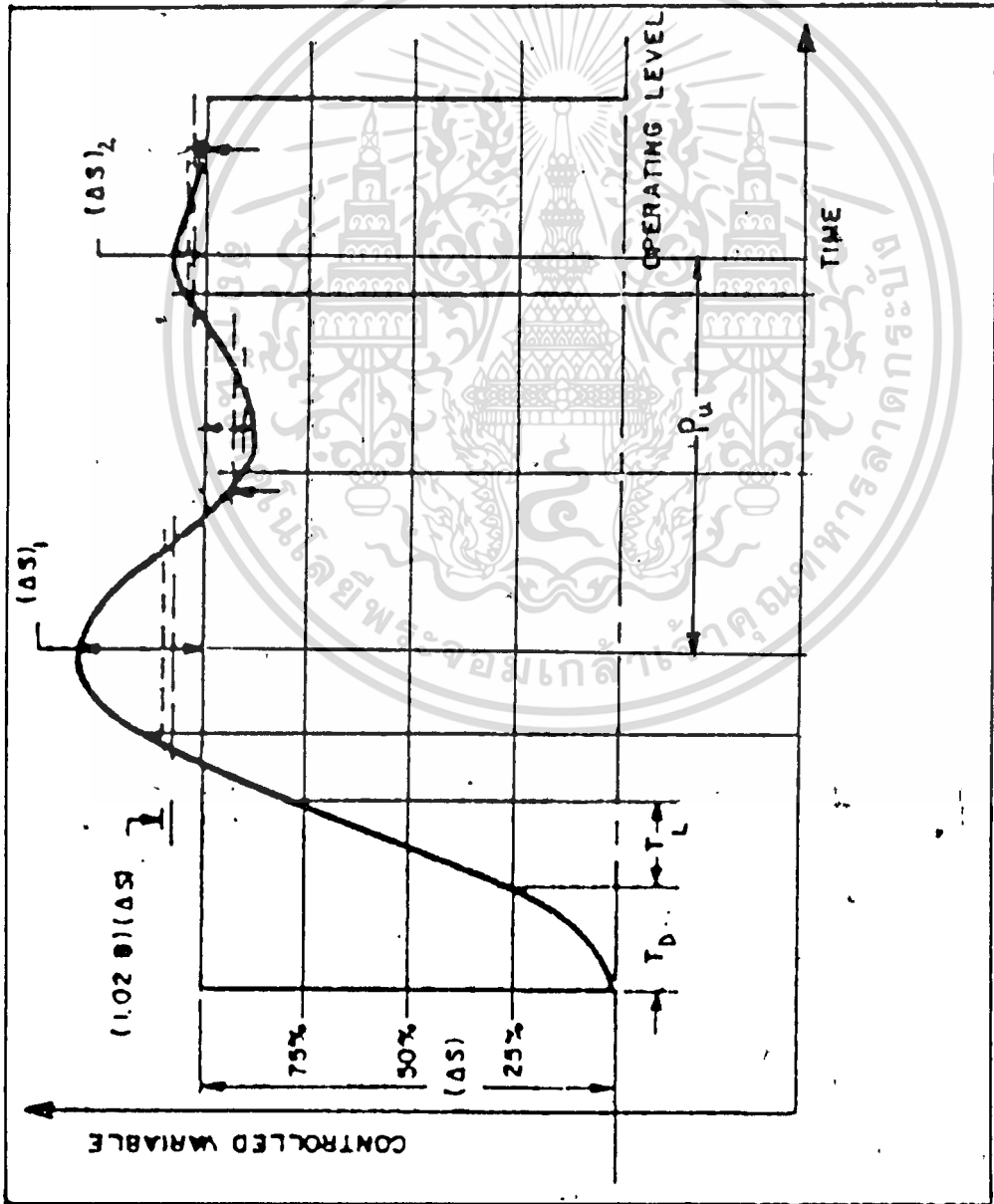
2.2 ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)

2.1 ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดเปรียบเทียบรูปแบบอ้างอิง

จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ค่าเล็งเล็ค ด้วยการคำนวณจากสมการคณิตศาสตร์ เช่น [9][10][11] จะได้สมรรถนะในการควบคุมที่ดี แต่จะทำให้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม มีการเปลี่ยนแปลงค่ารวดเร็ว และมีลักษณะทนต่อการเปลี่ยนแปลงต่ำ [12][13] ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง ที่หลีกเลี่ยงการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ แต่จะใช้การปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยการเปรียบเทียบรูปแบบผลตอบสนองของระบบจริง กับรูปแบบผลตอบสนองอ้างอิง หรือการจดจำรูปแบบมาตรฐาน (Pattern Recognition) [1][14][15][16][17][18] และสนับสนุนโดย [19][20][21][22][23]

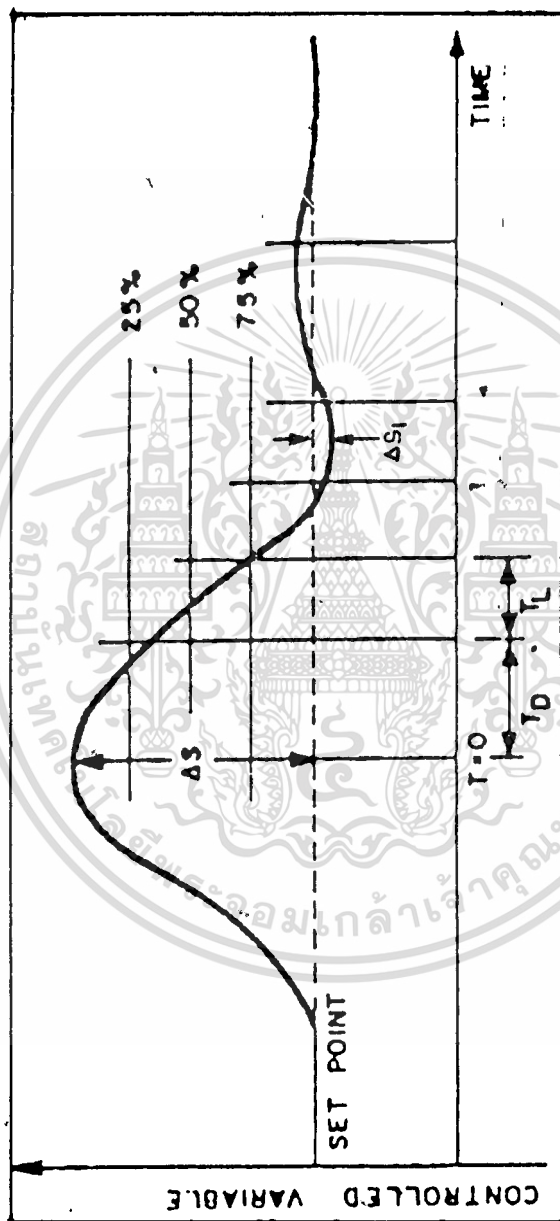
ขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดเปรียบเทียบรูปแบบอ้างอิงอาศัยหลักการพิจารณารูปลักษณะของผลตอบสนองของระบบจริง เปรียบเทียบกับรูปแบบของผลตอบสนองที่ต้องการ พิจารณาการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางตรรก ซึ่งมีส่วนที่สำคัญดังนี้

2.2.1 หาค่าพารามิเตอร์ของผลตอบสนองของระบบ ด้วยโปรแกรมการเปรียบเทียบทางตรรกตามรูปที่ 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3

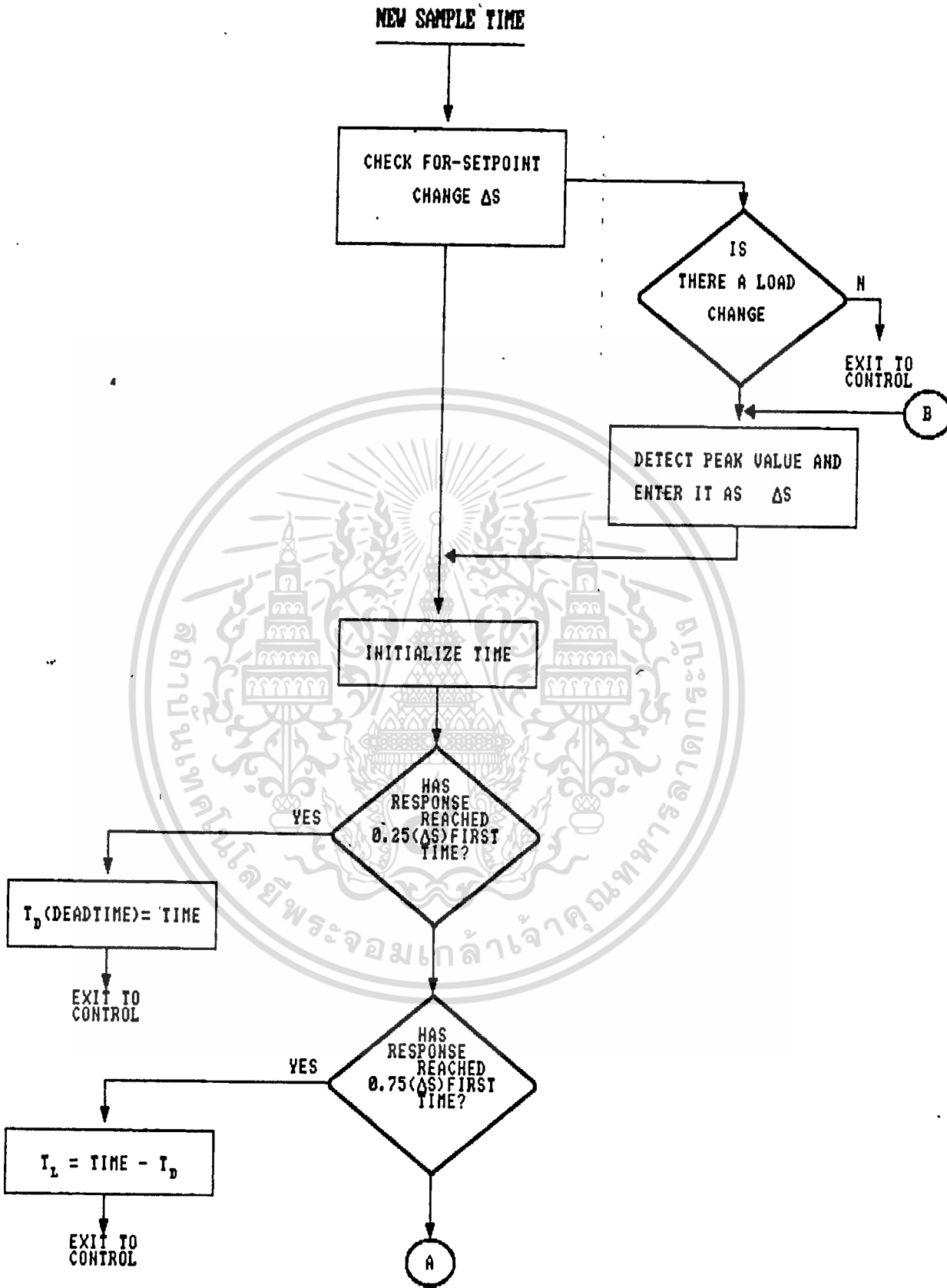


รูปที่ 2.1.1 ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

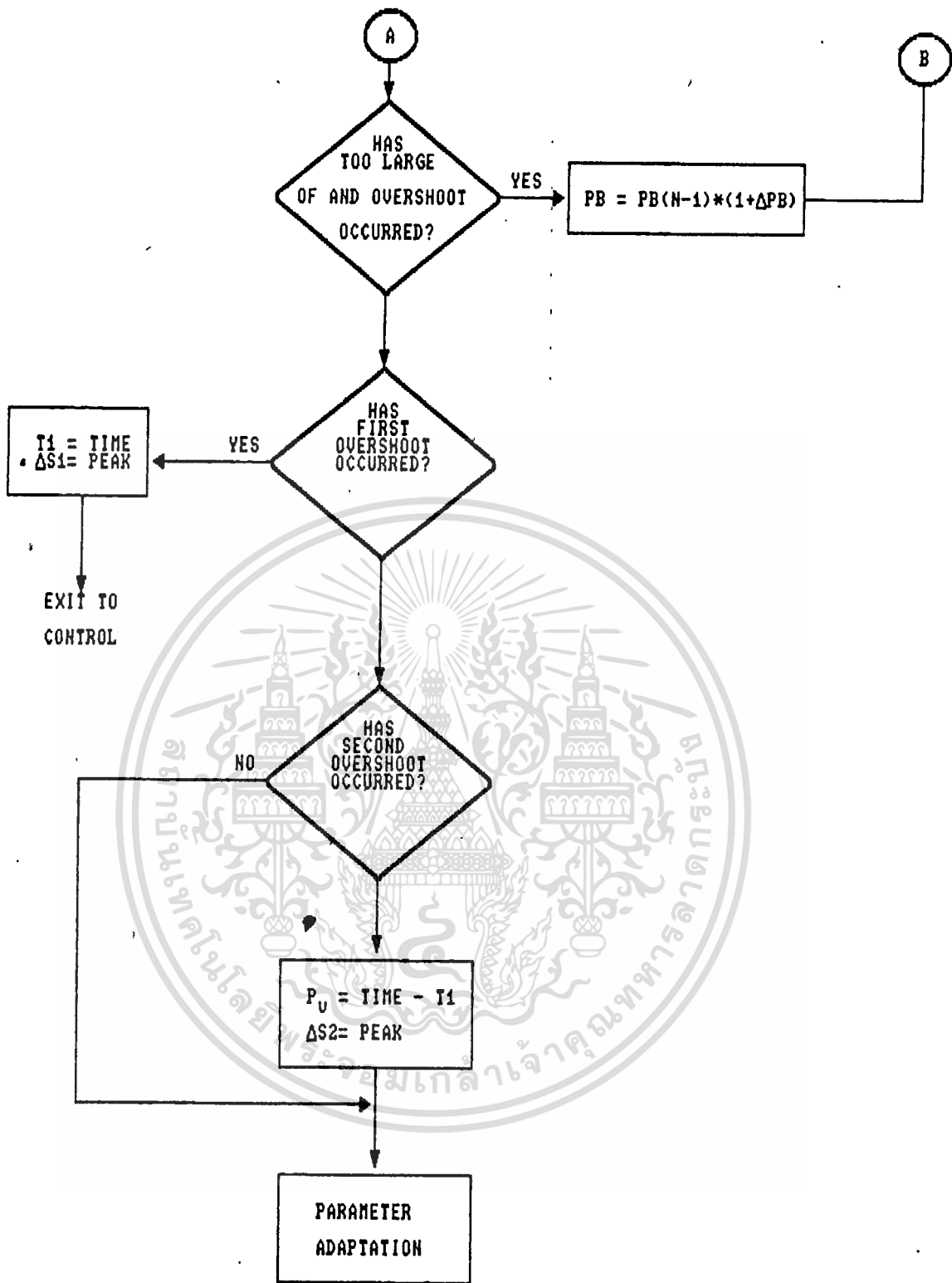


รูปที่ 2.1.2 ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงการควบคุมมาตรฐาน



รูปที่ 2.1.3 Flowchart โปรแกรมการหาค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 2.6 รัชศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1.3 Flowchart โปรแกรมการหาค่าพารามิเตอร์(ต่อ)

จากรูปที่ 2.1.3 พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการปรับแต่งได้แก่ เดดไทม์ (T_D) , ไรส์ไทม์ (T_r) , โอเวอร์ชูตลูกที่ 1 (ΔS_1) , โอเวอร์ชูตลูกที่ 2 (ΔS_2) , คาบของการแกว่ง (P_u) โดยที่

T_D คือเวลาที่ใช้ตั้งแต่ค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งผลตอบสนองของระบบเปลี่ยนแปลงไปเป็น 25% ของการเปลี่ยนแปลงของค่าเป้าหมาย

T_r คือเวลาที่ผลตอบสนองของระบบเปลี่ยนแปลงจาก 25% ไปเป็น 75% ของขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าเป้าหมาย

ΔS_1 คือขนาดของโอเวอร์ชูตลูกที่ 1

ΔS_2 คือขนาดของโอเวอร์ชูตลูกที่ 2

P_u คือระยะเวลาระหว่างโอเวอร์ชูตลูกที่ 1 จนถึงโอเวอร์ชูตลูกที่ 2

2.1.2 เปรียบเทียบรูปแบบของผลตอบสนองของระบบจริงกับรูปแบบของผลตอบสนองของระบบอ้างอิง เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยทั่วไปคุณลักษณะของรูปแบบของผลตอบสนองของระบบควบคุมที่น่าสนใจและมักใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินสมรรถนะของระบบควบคุมได้แก่

อัตราส่วนโอเวอร์ชูต ($\Delta S_2 / \Delta S_1$) คืออัตราส่วนของโอเวอร์ชูตลูกที่ 2 ต่อ โอเวอร์ชูตลูกที่ 1

เปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูตลูกที่ 1 (ΔS_1) คือจำนวนเปอร์เซ็นต์ของโอเวอร์ชูตลูกที่ 1 เทียบกับขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าเป้าหมาย

ไรส์ไทม์ (T_r) คือเวลาที่ผลตอบสนองของระบบ ใช้ในการเปลี่ยนแปลงจาก 25% ไปเป็น 75%

คาบของการแกว่ง (P_u) คือเวลาตั้งแต่เกิดโอเวอร์ชูตลูกที่ 1 จนถึง โอเวอร์ชูตลูกที่ 2

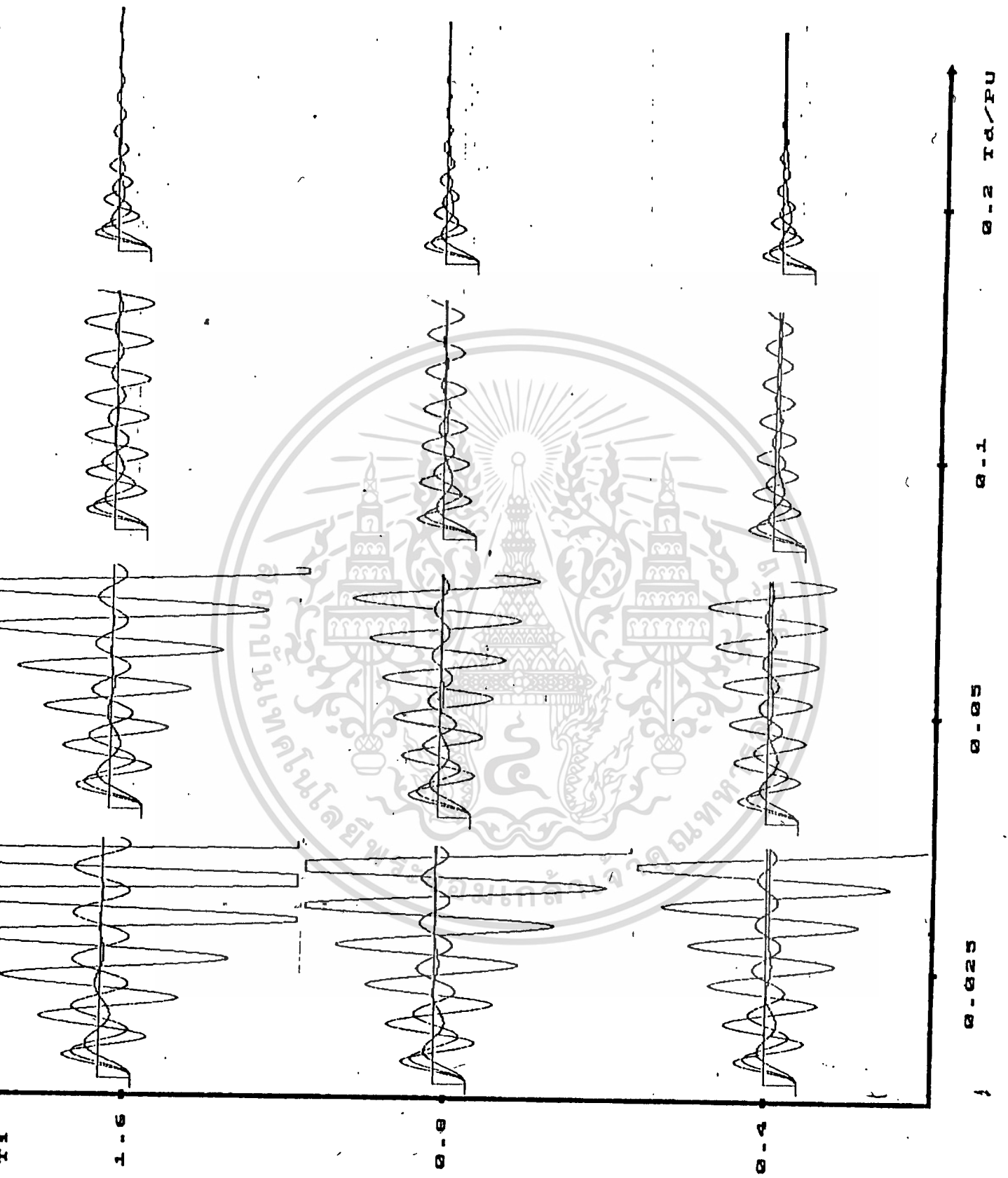
คุณลักษณะของผลตอบสนองของระบบควบคุมข้างบนแต่ละตัว จะถูกกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (PID) ไม่เหมือนกัน เช่น จากรูปที่ 2.1.4 ซึ่งเป็นการใช้ตัวควบคุม PID ควบคุมกระบวนการที่มีเดดไทม์เท่ากับ 5 วินาที และมีฟังก์ชันส่งผ่านเป็น

$$G_p(s) = e^{-5s} / (1+10s)(1+10s)$$

โดยการเปลี่ยนแปลงค่า $P = 2, 4, 6$ ค่า T_r จาก $P_u/T_r = 0.4, 0.8, 1.6$ และ $T_d/P_u = 0.025, 0.05, 0.1, 0.2$

จากรูปที่ 2.1.4 สามารถสรุปผลกระทบของแต่ละคุณลักษณะของผลตอบสนองของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงของแต่ละค่า PID เป็น

- 1) เพิ่มค่า K_c จะทำให้ คาบของการแกว่งลดลง, เปอร์เซ็นโอเวอร์ชูตเพิ่มขึ้น, ไรส์ไทม์ลดลง, อัตราส่วนโอเวอร์ชูตเพิ่มขึ้น
- 2) ลดค่า T_i จะทำให้ คาบของการแกว่งลดลง, เปอร์เซ็นโอเวอร์ชูตเพิ่มขึ้น, ไรส์ไทม์ลดลง, อัตราส่วนโอเวอร์ชูตเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.1.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 2.10 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เพิ่มค่า T_u จะทำให้ คาบของการแกว่งเพิ่มขึ้น, เปอร์เซ็นโอเวอร์ชู้ตลดลง, ไรส์ไทม์เพิ่มขึ้น, อัตราส่วนโอเวอร์ชู้ตลดลง

ดังนั้นการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจึงใช้วิธีการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบจริง กับผลตอบสนองของระบบที่ต้องการ ทีละคุณลักษณะและกำหนดทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ ที่จะทำให้ผลตอบสนองของระบบมีค่าเข้าใกล้ผลตอบสนองของระบบที่ต้องการ พร้อมทั้งคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ด้วยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนจากผลตอบสนองของระบบที่ต้องการและค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละคุณลักษณะ ซึ่งจะสรุปเป็นสมการได้ดังนี้ [15]

$$P(N) = P(N-1) [1 + f(n)^{-1} \operatorname{sgn}(\sum_{i=1}^n S_i W_i E_i)]$$

- $P(N)$ คือค่าพารามิเตอร์ใหม่
 $P(N-1)$ คือค่าพารามิเตอร์เก่า
 R คือจำนวนคุณลักษณะที่นำมาใช้ในการพิจารณาผลตอบสนองของระบบ
 S_i คือเครื่องหมายบวก, ลบ ตามทิศทางของพารามิเตอร์ที่จะต้องปรับเพื่อให้แต่ละคุณลักษณะมีค่าเข้าใกล้ผลตอบสนองที่ต้องการ
 W_i คือค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละคุณลักษณะ
 E_i คือเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองจริงกับผลตอบสนองที่ต้องการของแต่ละคุณลักษณะ

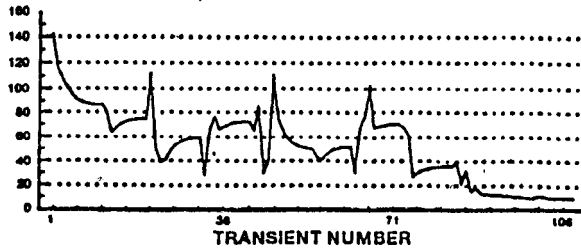
ตัวอย่างในตารางที่ 2.1.5 แสดงตัวอย่างการกำหนดผลตอบสนองที่ต้องการ กับค่าน้ำหนักของแต่ละคุณลักษณะ และทำให้การปรับแต่งพารามิเตอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะของแต่ละตัวตามรูปที่ 2.1.6

คุณลักษณะ	ค่าที่ต้องการ	ค่าถ่วงน้ำหนัก
เปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชู้ต	10	30
อัตราส่วนโอเวอร์ชู้ต	0.5	20
คาบของการแกว่ง	10	1.0
ไรส์ไทม์	2	1.0

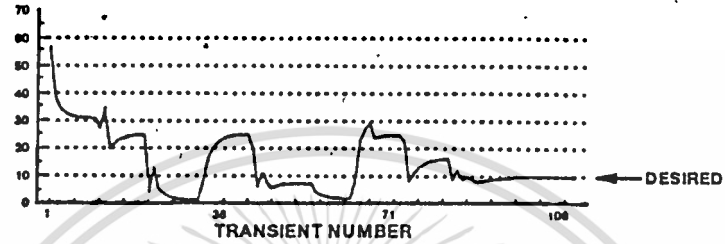
รูปที่ 2.1.5 ตารางการกำหนดผลตอบสนองและค่าถ่วงน้ำหนัก

จากรูปที่ 2.1.6 แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดนี้ การกำหนดผลตอบสนองของระบบที่ต้องการทำได้ง่าย (ตามตาราง 2.1.5) แต่การปรับแต่งจะต้องใช้เวลาพอสมควรจึงจะทำให้การปรับแต่งลู่เข้า และในกรณีที่การกำหนดผลตอบสนองที่ต้องการไว้ไม่เหมาะสม เช่น กำหนดไรส์ไทม์น้อยและเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชู้ตน้อยเกินไป ก็จะทำให้การปรับแต่งอาจจะไม่สามารถปรับให้ได้ผลตอบสนองตามต้องการ หรืออาจจะต้องใช้เวลาในการปรับแต่งนานมาก และนอกจากนี้ตัวควบคุมแบบนี้ยังไม่เหมาะสมที่จะกับกระบวนการจริงในสภาวะ

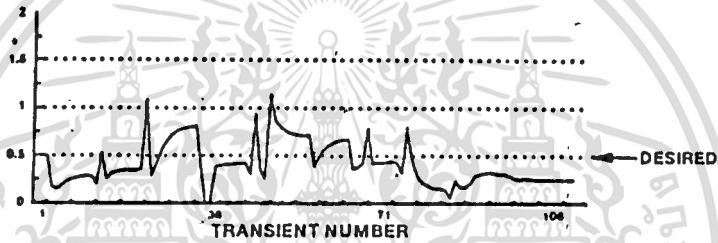
SCORE-SUM OF WEIGHTED ERRORS



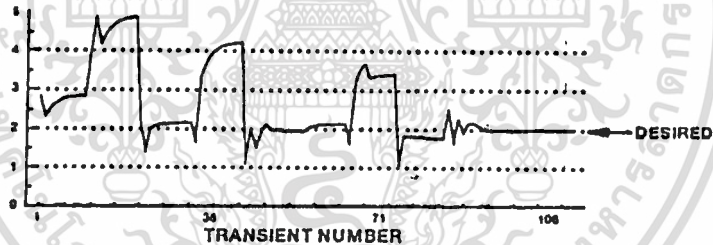
PERCENT OVERSHOOT



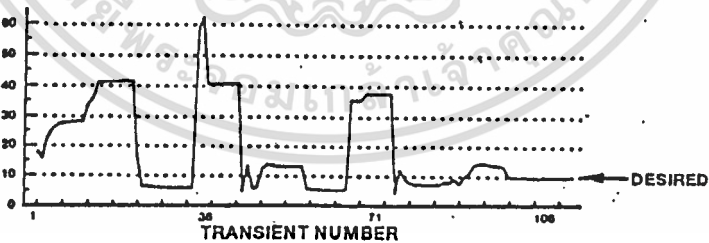
DAMPING



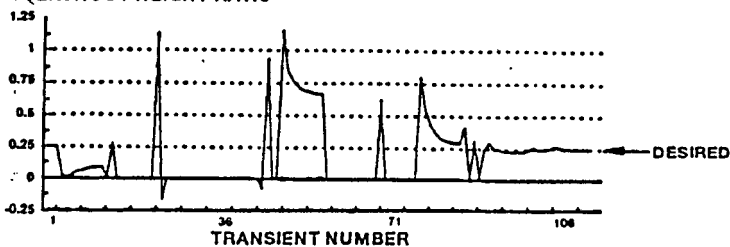
RISE TIME



PERIOD



OVERSHOOT HEIGHT RATIO



รูปที่ 2.1.6 ลักษณะแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ชั่วคราว เนื่องจากในสภาวะชั่วคราวสภาพกระบวนการอาจจะยังมีเงื่อนไขในการเดินเครื่องไม่ได้ตรงตามกับสภาพปกติ ทำให้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไปจากเดิม เมื่อเงื่อนไขการเดินเครื่องเข้าสู่สภาพปกติจะทำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีอยู่ไม่เหมาะสมกับสภาพของกระบวนการ อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อระบบได้

2.2 ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดระบบเอกลักษณ์ของระบบ

ตัวควบคุมชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภท Explicit และ Implicit

แบบ Explicit จะทำงานโดยมีส่วนประมาณค่า (Estimator) ทำการประมาณ (Estimate) ค่าพารามิเตอร์ของระบบ แล้วจึงนำพารามิเตอร์ ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมตามอัลกอริทึมในการออกแบบที่ตั้งไว้

แบบ Implicit จะทำการจัดสมการใหม่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยตรง ทำให้แบบ Implicit มีการคำนวณที่รวดเร็วและประหยัดในส่วน of หน่วยความจำ แต่ทำให้ตัวควบคุมแบบ Implicit มีเสถียรภาพน้อยกว่าแบบ Explicit

การทำงานของตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดระบบเอกลักษณ์ของระบบ แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือ

การระบุเอกลักษณ์ของระบบ(System Identification)
 การออกแบบตัวควบคุม(Control Design Algorithm)
 และทำงานตามกฎการควบคุม(Control Law)

2.2.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อเสถียรภาพของระบบควบคุม เพราะหากการคำนวณของการระบุเอกลักษณ์ของระบบ เกิดลู่ออก จะทำให้ระบบเกิดอเสถียรภาพ และหากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ เกิดลู่ออก แต่มีความผิดพลาดมาก ก็จะทำให้การควบคุมมีสมรรถนะไม่ตรงตามที่ต้องการ การระบุเอกลักษณ์ได้มีการนำเสนอหลายรูปแบบและวิธีการตาม [9][12][7][8][24][25][26] แต่ที่นิยมใช้กันมากมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่

Conventional Least Square Estimation (CLS)

Fast Least Square Estimation (FLS)

2.2.1.1 Conventional Least Square Estimation (CLS)

มีขั้นตอนและวิธีการคำนวณดังนี้

จาก AR (Autoregression) model

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = e(t) \quad (2.1)$$

$$\phi(t) = (-y(t-1), \dots, -y(t-n))^T \quad (2.2)$$

$$e = (a_1, \dots, a_n)^T \quad (2.3)$$

ดังนั้นจาก (2.1) สามารถเขียนเป็น

$$y(t) = \theta^T \phi(t) + e(t) \quad (2.4)$$

การประมาณค่า θ หาได้จาก

$$\theta(N) = \arg \min \sum_{t=1}^N (y(t) - \theta^T \phi(t))^2 \lambda^{N-t} \quad (2.5)$$

λ เป็นค่า forgetting factor และสรุปได้เป็น

$$\theta(N) = R^{-1}(N) f(N) \quad (2.6a)$$

$$R(N) = \sum_{t=1}^N \phi(t) \phi^T(t) \lambda^{N-t} \quad (2.6b)$$

$$f(N) = \sum_{t=1}^N \phi(t) y(t) \lambda^{N-t} \quad (2.6c)$$

จาก (2.6a) ถึง (2.6c) สามารถจัดรูปใหม่ได้

เป็น

$$\theta(t) = \theta(t-1) + R^{-1}(t) \phi(t) (y(t) - \theta^T(t-1) \phi(t)) \quad (2.7a)$$

$$R(t) = \lambda R(t-1) + \phi(t) \phi^T(t) \quad (2.7b)$$

ให้

$$P(t) = R^{-1}(t)$$

แทนค่า $P(t)$ ลงใน (2.7b) และจัด (2.7) ใหม่ได้

$$e(t) = e(t-1) + L(t)(y(t) - e^T(t-1)\phi(t)) \quad (2.8a)$$

$$L(t) = \frac{P(t-1)\phi(t)}{\lambda + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)} \quad (2.8b)$$

$$P(t) = \frac{[P(t-1) - P(t-1)\phi(t)\phi^T(t)P(t-1)]}{\lambda + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)} \quad (2.8c)$$

2.2.1.2 Fast Least Square Estimation (FLS)

จากค่าประมาณของ $y(t)$

$$y'(t) = e^T(t-1)\phi(t) \quad (2.9)$$

สำหรับ $K = 1$ ถึง $n-1$

$$K_k(t-1) = F_k(t-1)/R_k^m(t-2) \quad (2.10)$$

$$K_k^m(t-1) = F_k(t-1)/R_k^m(t-1)$$

$$Y'_k(t) = 0$$

$$Y'_k(t) = y'_{k-1}(t) + K_{k-1}(t-1)r_{k-1}(t-1)$$

$$Y'_n(t) = y'(t)$$

$$R_k^r(t-1) = \lambda \cdot R_k^r(t-2) + (1-\beta_k(t))r_k^2(t-1)^2$$

$$\beta_0(t) = 0$$

$$\beta_{k+1}(t) = \beta_k(t) + (1-\beta_k(t))^2 r_k^2(t-1)/R_k^r(t-1)$$

$$r_0(t) = y(t)$$

$$r_k(t) = r_{k-1}(t-1) - K_{k-1}^m(t-1)e_{k-1}(t)$$

$$e_k(t) = y(t) - y'_k(t)$$

$$R_k^m(t) = \lambda \cdot R_k^m(t-1) + (1-\beta_k(t))e_k(t)^2$$

$$F_k(t) = \lambda \cdot F_k(t-1) + (1-\beta_k(t))r_k(t-1)e_k(t)$$

สำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบนั้น วิธี FLS จะเห็นได้ว่าเป็นสมการที่ง่ายต่อการนำไปเขียนเป็นโปรแกรม ทำให้ประหยัดเนื้อที่หน่วยความจำ และเวลาในการคำนวณ แต่ลักษณะการคำนวณในสมการมีบางส่วนเป็นการยกกำลัง 2 ดังนั้นผลการคำนวณอาจจะไม่ลู่เข้า ซึ่งต่างกับแบบ CLS ซึ่งมีการคำนวณในลักษณะเมตริกส์ ทำให้การคำนวณใช้เวลานาน และเปลืองหน่วยความจำมากกว่า แต่ลักษณะการคำนวณจะเกิดค่าความผิดพลาดค่อยๆ ลดลง มีผลให้การคำนวณมีลักษณะลู่เข้ามากกว่า

2.2.2 การออกแบบตัวควบคุม ในส่วนนี้ของตัวควบคุมแบบปรับตัว-เองนี้ มีการทำงานได้หลายวิธีการ แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ 3 วิธีคือ

ตัวควบคุมแบบ PID

ตัวควบคุมแบบเล็งเลิศ (Optimal Controller)

ตัวควบคุมแบบกำหนดโพล-ซีโร่ (Pole-Zero Assignment Controller)

2.2.2.1 ตัวควบคุมแบบ PID ตัวควบคุมแบบนี้เป็นแบบที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีการทำงานใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบดั้งเดิม (Conventional Controller) โดยจะออกแบบตัวควบคุมด้วยการนำค่าพารามิเตอร์ของกระ-

บวนการที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบตามขั้นตอนที่ 2.2.1 มาทำการคำนวณหาค่า P, I, D แล้วจึงนำค่า P, I, D ไปให้กับตัวควบคุม PID โดยที่การคำนวณหาค่า PID อาจจะมีวิธีต่างๆกันดังนี้

2.2.2.1.1 การคำนวณหาค่า PID ตามบรรทัดฐาน(Criterion) ของ ISE, IAE, ITAE

ในกรณีที่เราต้องการให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามบรรทัดฐานของ

$$ISE = \text{Min of } \int e^2 dt$$

$$IAE = \text{Min of } \int |e| dt$$

$$ITAE = \text{Min of } \int t |e| dt$$

และเนื่องจากตัวควบคุมแบบ PID ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีโครงสร้างแตกต่างกันตาม [11][16] คือ

แบบคลาสสิก

$$m = \frac{k_c (1 + \frac{1}{T_i s}) (1 + T_d s)}{1 + T_s s} e$$

แบบขนาน

$$m = \left(k_c + \frac{1}{T_i s} \right) e^{-\left(\frac{T_d s}{1 + T_d s} \right) c}$$

แบบออสลากรรม

$$m = k_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left[r - \frac{(1 + T_d s)}{1 + T_d s} c \right]$$

T_{dD} เป็นค่าเวลาคงตัว (Time Constant) ของตัวกรอง
ความถี่ของตัว D

$$T_{dD} = 0.1 T_d$$

ทำให้ได้ค่า PID ที่เหมาะสมตามบรรทัดฐานตามสมการที่ (2.11a) ในกรณีปรับแต่งแบบพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตัวรบกวน และ สมการที่ (2.11b) ในกรณีปรับแต่งแบบพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

$$k k_c = a (\theta / \tau)^b$$

$$\tau / T_d = c (\theta / \tau)^d$$

$$T_d / T_1 = e (\theta / \tau)^f \quad (2.11a)$$

$$k k_c = a (\theta / \tau)^b$$

$$\tau / T_d = c + d (\theta / \tau)$$

$$T_d / \tau = e (\theta / \tau)^f \quad (2.11b)$$

โดยค่า a, b, c, d, e, f จะเป็นไปตามตาราง 2.2.2.1.1

และมี

θ = ค่าเดดไทม์

τ = ค่าเวลาคงตัวของกระบวนการ (Process Time Constant)

k = อัตราขยายของกระบวนการ (Process Gain)

2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPERATING CONDITION

DISTURBANCE TUNING

SET POINT TUNING

CRITERIA

CRITERIA

CONST.

ISE

IAE

ITAE

ISE

IAE

ITAE

a	1.11907	0.98089	0.77902	0.71959	0.65	1.12762
b	-0.89711	-0.76167	-1.06401	-1.03092	-1.04432	-0.80368
c	0.7987	0.91032	1.14311	1.12666	0.9895	0.99783
d	-0.9548	-0.85211	-0.70949	-0.18145	0.09539	0.02860
e	0.54766	0.59974	0.57137	0.54568	0.50814	0.42844
f	0.87798	0.89819	1.03826	0.86411	1.00433	1.0081

Table 1: Tuning constants for Classical controller when $0 < (\theta/T) < 1$

CONST.

ISE

CRITERIA

IAE

ITAE

ISE

CRITERIA

IAE

ITAE

a	1.3466	1.31509	1.3176	1.26239	1.13031	0.98304
b	-0.9308	-0.8826	-0.7937	-0.8388	-0.81314	-0.49851
c	1.6585	1.2587	1.12499	6.0356	5.7527	2.71348
d	-1.25738	-1.3756	-1.42603	-6.0191	-5.7241	-2.29778
e	-0.79715	0.5655	0.49547	0.47617	0.32175	0.21443
f	0.41941	0.4576	0.41932	0.24572	0.17707	0.16768

Table 2: Tuning constants for Noninteracting controller when $0 < (\theta/T) < 1$

CONST.

ISE

CRITERIA

IAE

ITAE

ISE

CRITERIA

IAE

ITAE

a	1.1147	0.91	0.7058	1.1427	0.81699	0.8326
b	-0.8992	-0.7938	-0.8872	-0.9365	-1.004	-0.7607
c	0.9324	1.01495	1.03326	0.99223	1.09112	1.00268
d	-0.8753	-1.00403	-0.99138	-0.35269	-0.22387	0.00854
e	0.56508	0.5414	0.60006	0.35308	0.44278	0.44243
f	0.91107	0.7048	0.971	0.70088	0.97186	1.11499

Table 3: Tuning constants for Industrial controller when $0 < (\theta/T) < 1$

รูปที่ 2.2.2.1.1 ตารางการปรับแต่งแบบ ISE, IAE, ITAE

2.2.2.1,2 การคำนวณค่าตามหลักของ Ziegler-Nichols ในกรณีที่ต้องการให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามหลักการของ Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, 3C ก็จะได้ค่า PID ตามตาราง 2.2.2,1.2

หลังจากนั้น C.C. HANG ได้ปรับปรุงหลักการของ Ziegler - Nichols ใหม่เป็นวิธี Refinements of Ziegler-Nichols (RZN) ตาม

$$k_c = \frac{5}{6} \left(\frac{12}{15} + k \right) \quad 1.2 < k < 15$$

$$k_u = 15 + 14k$$

$$T_u = \frac{1}{5} \left(\frac{4}{15} k + 1 \right) \quad 1.2 < k < 15$$

$$T_c = \frac{1}{15}$$

เมื่อ

$$k_u = \text{Ultimate Gain}$$

$$T_u = \text{Ultimate Period}$$

$$k = \text{Normalized Process Gain}$$

ซึ่งทำให้ RZN มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเป้าหมายดีขึ้นในด้านการลด โอเวอร์ชู้ต แต่ไม่มีผลต่อผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวน ตาม [23] [27]

Controller	Ziegler-Nichols	Cohen-Coon	3C
Proportional	$KK_c = (\theta/\tau)^{-1.0}$	$KK_c = (\theta/\tau)^{-1.0} + 0.333$	$KK_c = 1.208(\theta/\tau)^{-0.956}$
Proportional +	$KK_c = 0.9(\theta/\tau)^{-1.0}$	$KK_c = 0.9(\theta/\tau)^{-1.0} + 0.082$	$KK_c = 0.928(\theta/\tau)^{-0.946}$
Reset	$T_i/\tau = 3.33(\theta/\tau)$	$T_i/\tau = \frac{3.33(\theta/\tau) [1 + (\theta/\tau)/11.0]}{1.0 + 2.2(\theta/\tau)}$	$T_i/\tau = 0.928(\theta/\tau)^{0.583}$
Proportional +	$KK_c = 1.2(\theta/\tau)^{-1.0}$	$KK_c = 1.35(\theta/\tau)^{-1.0} + 0.270$	$KK_c = 1.370(\theta/\tau)^{-0.950}$
Reset	$T_i/\tau = 2.0(\theta/\tau)$	$T_i/\tau = \frac{2.5(\theta/\tau) [1.0 + (\theta/\tau)/5.0]}{1.0 + 0.6(\theta/\tau)}$	$T_i/\tau = 0.740(\theta/\tau)^{0.738}$
+			
Rate	$T_d/\tau = 0.5(\theta/\tau)$	$T_d/\tau = \frac{0.37(\theta/\tau)}{1.0 + 0.2(\theta/\tau)}$	$T_d/\tau = 0.365(\theta/\tau)^{0.950}$

ตาราง 2.2.2.1.2 ตารางการปรับแต่งแบบ Ziegler-Nichols

2.2.2.1.3 การหาค่า PID ตามหลักการของ Deadbeat จาก การออกแบบโดย Deadbeat Algorithm ตาม[10][28]และ[29][30]ให้ กระบวนการมีฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer Function) เป็น

$$G_p(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{(T_1s + 1)((T_2s + 1)}}$$

ถ้าเราให้

$$H(s) = \frac{e^{-\theta s}}{1 + G_p(s)G_c(s)}$$

จะได้

$$e^{-\theta s} = \frac{G_p(s)G_c(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)}$$

$$e^{-\theta s} = \frac{G_c(s) \times \frac{Ke^{-\theta s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}}{1 + G_c(s) \times \frac{Ke^{-\theta s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}}$$

$$e^{-\theta s} = \frac{G_c(s)Ke^{-\theta s}}{G_c(s)Ke^{-\theta s} + (T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

$$G_c(s)K = \frac{G_c(s)Ke^{-\theta s} + (T_1s + 1)(T_2s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

$$G_c(s) = \frac{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{K(1 - e^{-\theta s})}$$

จาก Power Series

$$e^{-\theta s} = 1 + \theta s - \frac{\theta^2 s^2}{2!} + \frac{\theta^3 s^3}{3!} + \dots$$

$$(T_1s + 1)((T_2s + 1))$$

$$G_c(s) = \frac{(T_1s + 1)((T_2s + 1))}{K\theta s}$$

$$= \frac{1}{\theta K} [T_1T_2s + (T_1+T_2) + \frac{1}{s}]$$

$$= \frac{(T_1+T_2) [T_1T_2s + 1 + \frac{1}{s}]}{KT_d (T_1+T_2) s(T_1+T_2)}$$

เทียบสัมประสิทธิ์ทำให้ได้

$$K_c = \frac{T_1 + T_2}{\theta K}$$

$$T_d = \frac{T_1 + T_2}{T_1 + T_2}$$

$$T_d = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$$

2.2.2.2 ตัวควบคุมแบบเล็งเลิศ (Optimal Control)

ตัวควบคุมแบบนี้ได้มีการนำเสนอหลายรูปแบบทั้งแบบ Minimum Variance Control ของ Astrom [30][31] และ Generalized Minimum Variance Control ของ Clarke, [4] แต่วิธีการของ Clarke มีข้อดีกว่าตาม [32][33] จึงเป็นที่นิยมกว่า

ตัวควบคุมแบบ Generalized Minimum Variance Control อาศัยหลักการที่จะทำให้ค่า Auxiliary Output ซึ่งใช้พิจารณาแทน Output จริงมีค่าน้อยที่สุด

ให้ระบบมีสมการตามรูปแบบทั่วไปคือ

$$A(z^{-1})y(z^{-1}) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + c(z^{-1})e(t) \quad (2.12)$$

เมื่อ

$e(t)$ เป็น Zero Mean Disturbance

$$\phi(t) = P(z^{-1})y(t) \quad (2.13)$$

โดยที่

$\phi(t)$ เป็น Auxiliary Output

$P(z^{-1})$ เป็น ฟังก์ชันส่งผ่านที่กำหนดขึ้นเอง

และ

$$P(z^{-1}) = P_n(z^{-1})/P_d(z^{-1})$$

จาก(2.1)ให้

$$C(z^{-1})P(z^{-1})y(t) = E(z^{-1})A(z^{-1})y(t) + z^{-k}F(z^{-1})u(t)/P_d(z^{-1}) \quad (2.14)$$

และจาก(2.12)-(2.14)

$$\phi(t+k) = E(z^{-1})y'(t) + G(z^{-1})u'(t) + E(z^{-1})y(t) \quad (2.15)$$

โดยที่

$$y'(t) = y(t)/C(z^{-1})P_d(z^{-1})$$

$$u'(t) = u(t)/C(z^{-1})$$

$$G(z^{-1}) = E(z^{-1})B(z^{-1})$$

ค่า Auxiliary Output น้อยที่สุดจะได้

$$\phi^*(t+k) = F(z^{-1})y'(t) + G(z^{-1})u'(t) \quad (2.16)$$

Prediction error จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} \phi'(t+k) &= \phi(t+k) - \phi^*(t+k) \\ &= E(z^{-1})e(t+k) \end{aligned}$$

ที่สภาวะคงตัวจะได้

$$\phi^*(t+k) = w(t)$$

เมื่อ

$w(t)$ เป็นค่าเป้าหมาย

จากสมการ(2.15)

$$u(t) = 1/G(z^{-1})[w(t) - F(z^{-1})y(t)/T(z^{-1})P_d(z^{-1})] \quad (2.17)$$

ทำให้ได้สมการรูปปิดเป็น

$$y(t) = \frac{1}{P(z^{-1})} w(t+k) + \frac{E(z^{-1})}{P(z^{-1})} e(t)$$

เนื่องจากสมการ(2.17) มีลักษณะการตอบสนองไวต่อการเกิดค่าความผิดพลาด(Error) ทำให้ผลตอบสนองของระบบ มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วเกินไป จึงสร้างฟังก์ชันส่งผ่าน $Q(z^{-1})$ ขึ้นมา เพื่อใช้ถ่วงน้ำหนักของผลตอบสนองของตัวควบคุม ทำให้ Cost Function เป็น

$$e(t+k) = \phi^*(t+k) + Q(z^{-1})u(t) - w(t) \quad (2.18)$$

ที่ลภาวะคงตัว $\phi^*(t+k)$ จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\phi^*(t+k) + Q(z^{-1})u(t) = w(t)$$

$$u(t) = 1/Q(z^{-1}) [w(t) - \phi^*(t+k)]$$

แทนค่าลงในสมการ(2.17)ทำให้ได้

$$u(t) = 1/(Q+GT)[w(t)-Fy(t)/P_u] \quad (2.19)$$

สมการรูปปิดเปลี่ยนใหม่เป็น

$$y(t) = B/(PB+QA)w(t) + (Eb+qt)/(PB+QA)e(t)/T \quad (2.20)$$

$$u(t) = A/(PB+QA)w(t) - (F/P_d)/(PB+QA)e(t)/T \quad (2.21)$$

การออกแบบตัวควบคุมแบบ Generalized Minimum variance ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. กำหนด $P(z^{-1})$ และ $Q(z^{-1})$ โดยให้

$$P(z^{-1}) = 1/M(z^{-1})$$

เมื่อ $M(z^{-1})$ ใช้แทนรูปแบบลักษณะของลูปปิดที่ต้องการ

$$Q(z^{-1}) = Q'(z^{-1})$$

และ

$$1/Q'(z^{-1}) = L(z^{-1}) \quad \text{จะมีส่วนประกอบของอินติกรัลอยู่}$$

ซึ่งการเลือก $Q(z^{-1})$ จะต้องพิจารณาให้ดี เพราะจะเป็นสาเหตุทำให้เกิด Offset[4]

2. ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ $F(z^{-1})$, $G(z^{-1})$ ด้วยวิธีการของการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

3. แทนค่าพารามิเตอร์ของ $F(z^{-1})$, $G(z^{-1})$ ลงใน (2.19) เพื่อหาค่า $u(t)$

2.2.2.3 ตัวควบคุมแบบกำหนดโพล-ซีโร

ตัวควบคุมแบบนี้ถูกออกแบบมาโดยอาศัยหลักการสร้างสัญญาณควบคุมด้วยการกำหนดโพลของระบบลูปปิด โดยนิยม เลือกโพลที่ต้องการอยู่ 1 คู่ ที่เหลือจะให้อยู่ใกล้จุดกำเนิด โพลที่จะเลือกมักจะกำหนดได้จากอัตราส่วนแดมป์บิ่ง (damping) และ ไรส์ไทม์ (Rise Time) ซึ่งหากกำหนดอัตราส่วนแดมป์บิ่งและไรส์ไทม์ลงไปในสมการโพลีเมียลของระบบลูปปิดแล้วก็จะสามารถสร้างสมการโพลีโนเมียล ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณการควบคุมได้จาก [3][30] การกำหนดโพลทำได้โดย กำหนด อัตราส่วนแดมป์บิ่ง (y) และ ความถี่ของการแกว่งที่ต้องการ (w) ที่ต้องการแล้วแทนค่าลงในสมการเพื่อหาโพลีโนเมียลของโพล $T(z^{-1})$

$$T(z^{-1}) = 1 - 2e^{-ywt} \cos wt \sqrt{1-y^2} z^{-1} + e^{-2ywt} z^{-2}$$

$T(z^{-1})$ - โพลีโนเมียลของโพลของลูปปิดที่ต้องการ

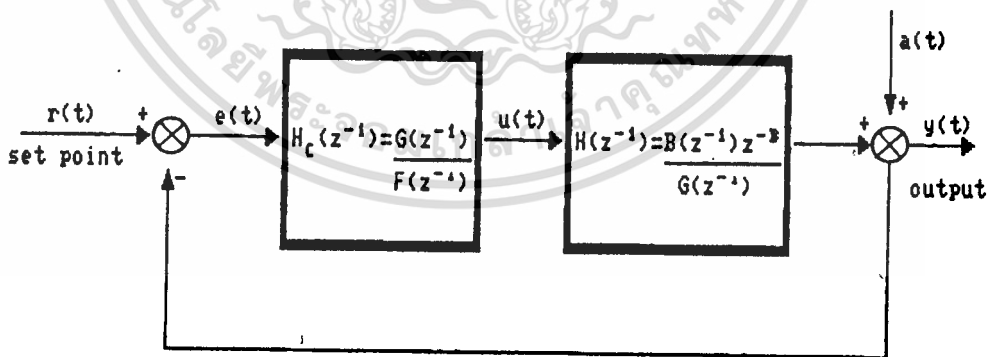
y - อัตราส่วนแดมป์บิ่งที่ต้องการ

w - ความถี่ของการแกว่งที่ต้องการ

T - คาบของการลุ่มข้อมูล

การกำหนดโพลด้วยวิธีนี้จะทำให้สามารถกำหนดผลตอบสนองของระบบปิดได้ง่ายและมีความมั่นคงกว่าตัวควบคุมแบบเล็งเล็ด เนื่องจากตัวควบคุมแบบเล็งเล็ดใช้วิธีการกำจัดซีโร ทำให้การแปรปรวนของสัญญาณควบคุมสูง การเกิดอเสถียรภาพจะเป็นไปได้ง่าย นอกจากนี้ตัวควบคุมแบบกำหนดโพลยังสามารถใช้ได้ดีกับระบบแบบ NON MINIMUM PHASE

ตัวควบคุมแบบโพลนี้ นอกจากข้อดีในการกำหนดผลตอบสนองของระบบทำให้ระบบมีความมั่นคงแล้ว ยังสามารถกำหนดซีโรเพื่อทำการขจัดซีโรของลูปเปิดทำให้ระบบมีผลตอบสนองรวดเร็ว และมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด [2][3] แต่ก็ทำให้ระบบมีความมั่นคงลดลง เนื่องจากจะทำให้มีการแปรปรวนของสัญญาณควบคุมสูง [5][6][31][32] อย่างไรก็ตามในกรณีที่ทราบฟังก์ชันส่งผ่านของค่าเป้าหมาย เราสามารถกำหนดซีโรของฟังก์ชันส่งผ่านของค่าความคลาดเคลื่อน ทำให้ระบบมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเป้าหมายเร็วขึ้น [35]



รูป 2.2.2.3.1 กระบวนการที่ทำการศึกษา

จากกระบวนการในรูป 2.2.2.3.1 เขียนเป็นสมการเวลาไม่ต่อเนื่องจะได้
ฟังก์ชันส่งผ่านของระบบเป็น

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-b}B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})a(t) \quad (2.22)$$

เมื่อ

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n}$$

b เป็นจำนวนเท่าของคาบการสุ่มข้อมูล

$a(t)$ เป็น zero mean white noise

และ ตัวควบคุมจะมีฟังก์ชันส่งผ่านเป็น

$$F(z^{-1})u(t) = G(z^{-1})y(t) \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$F(z^{-1}) = 1 + f_1 z^{-1} + \dots + f_k z^{-k}$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_a z^{-a}$$

จาก (2.22), (2.23) ให้

$$n_b + k - 1 = n_f \quad \text{และ} \quad n_g = n_u - 1$$

ทำให้ได้ฟังก์ชันส่งผ่านของลูปปิด เป็น

$$y(z^{-1}) = H_o(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})G(z^{-1})z^{-b}}{r(z^{-1})}$$

$$r(z^{-1}) = A(z^{-1})F(z^{-1}) + B(z^{-1})G(z^{-1})z^{-b} \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) ถ้าให้ $T(z^{-1})$ เป็น โพลีโนเมียลของโพลของลูปปิดที่ต้องการจะได้

$$A(z^{-1})F(z^{-1}) - z^{-b}B(z^{-1})G(z^{-1}) = D_m(z^{-1})D_o(z^{-1}) \quad (2.25)$$

เมื่อ

$D_m(z^{-1})$ เป็นโพลีโนเมียลของโพลที่ต้องการ

โดย

$$D_m(z^{-1}) = 1 + d_1 z^{-1} + \dots + d_n z^{-n}$$

$D_o(z^{-1})$ เป็นโพลีโนเมียลที่เราให้เป็นโพลสังเกตการณ์ (observer Pole) ซึ่งจะให้อยู่ใกล้จุดกำเนิด เพื่อให้มีผลตอบสนองในทางพลวัตเร็วกว่าระบบลูปปิด

โดย

$$D_o(z^{-1}) = 1 + 1_1 z^{-1} + \dots + 1_c z^{-c}$$

เมื่อใช้วิธีระบบเอกลักษณ์ของระบบทำการคำนวณหาพารามิเตอร์ของสมการ (2.22) จะได้ระบบจำลองที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์

$$A^*(z^{-1})y(t) = B^*(z^{-1})u(t) + e(t) \quad (2.26)$$

โดยที่

$$A^*(z^{-1}) = 1 + a_1^* z^{-1} + \dots + a_n^* z^{-n}$$
$$B^*(z^{-1}) = b_0 + b_1^* z^{-1} + \dots + b_{n+k-1}^* z^{-n-k}$$

แทนค่า พารามิเตอร์ $a_1^*, \dots, a_n^*, b_0^*, \dots, b_{n+k-1}^*$ ในสมการ (2.25) จะได้

$$A^*(z^{-1})F(z^{-1}) - B^*(z^{-1})G(z^{-1}) = D_m(z^{-1})D_o(z^{-1})$$

(2.27)

แก้สมการ (2.27) ก็จะได้พารามิเตอร์ของ $F(z^{-1}), G(z^{-1})$ ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันส่งผ่านของตัวควบคุมที่ทำให้โพลของลูปปิดเป็นไปตามต้องการ

หากเราพิจารณาเพิ่มความเร็วของผลตอบสนองของระบบที่ไม่ทำให้ระบบขาดความมั่นคง เราจะได้จาก

$$\frac{E(z^{-1})}{r(z^{-1})} = \frac{A(z^{-1})F(z^{-1})}{A(z^{-1})F(z^{-1}) + B(z^{-1})G(z^{-1})z^{-b}} \quad (2.28)$$

เมื่อ

$$E(z^{-1}) = r(z^{-1}) - y(z^{-1})$$

$$\frac{r(z^{-1})}{r(z^{-1})} = \frac{r(z^{-1})}{r(z^{-1})}$$

หรือ

$$\frac{E(z^{-1})}{r(z^{-1})} = \frac{A(z^{-1})F(z^{-1})}{A(z^{-1})F(z^{-1}) + B(z^{-1})G(z^{-1})z^{-b}} \cdot r(z^{-1}) \quad (2.29)$$

สมการ (2.29) แสดงถึงว่า ฟังก์ชันส่งผ่านของค่าความคลาดเคลื่อนมีส่วนประกอบเป็นฟังก์ชันของสัญญาณค่าเป้าหมายด้วย ดังนั้น ซีโรของฟังก์ชันส่งผ่านของค่าเป้าหมายย่อมเป็นซีโรของฟังก์ชันส่งผ่านของค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองของระบบเร็วขึ้น [41]

ให้

$$r(z^{-1}) = \frac{\psi(z^{-1})}{\lambda(z^{-1})} \quad (2.30)$$

และให้

$$F(z^{-1}) = F'(z^{-1})F''(z^{-1}) \quad (2.31)$$

เมื่อ

$$F'(z^{-1}) = \lambda(z^{-1}) = f_0' + f_1' z^{-1} + \dots + f_p' z^{-p}$$

และ

$$F''(z^{-1}) = f_0'' + f_1'' z^{-1} + \dots + f_p'' z^{-p}$$

เมื่อเรากำหนด $D_m(z^{-1})D_0(z^{-1})$ และหาฟังก์ชันส่งผ่านของค่า-
เป้าหมายแล้วจึงแทนลงใน (2.25) ใหม่จะได้เป็น

$$A(z^{-1})F'(z^{-1})F''(z^{-1}) - z^{-b}B(z^{-1})G(z^{-1}) = D_m(z^{-1})D_0(z^{-1}) \quad (2.32)$$

(2.32) จะสามารถหาคำตอบ คือ $F''(z^{-1})$, $G(z^{-1})$ ได้เมื่อเงื่อนไข
ต่อไปนี้เป็นจริง [3][30]

(a) $A(z^{-1})$, $F(z^{-1})$ และ $B(z^{-1})$ เป็น Coprime

(b) $\text{Deg}\{D_m(z^{-1})D_o(z^{-1})\} = \text{Max}\{\text{Deg}[A(z^{-1})F(z^{-1})], \text{Deg}[B(z^{-1})G(z^{-1})z^{-b}]\}$

หรือ

$$n + t = \text{Max}(n+j+p, m+q+b) \quad (2.33)$$

การแก้สมการ (2.32) ทำได้โดย

ให้

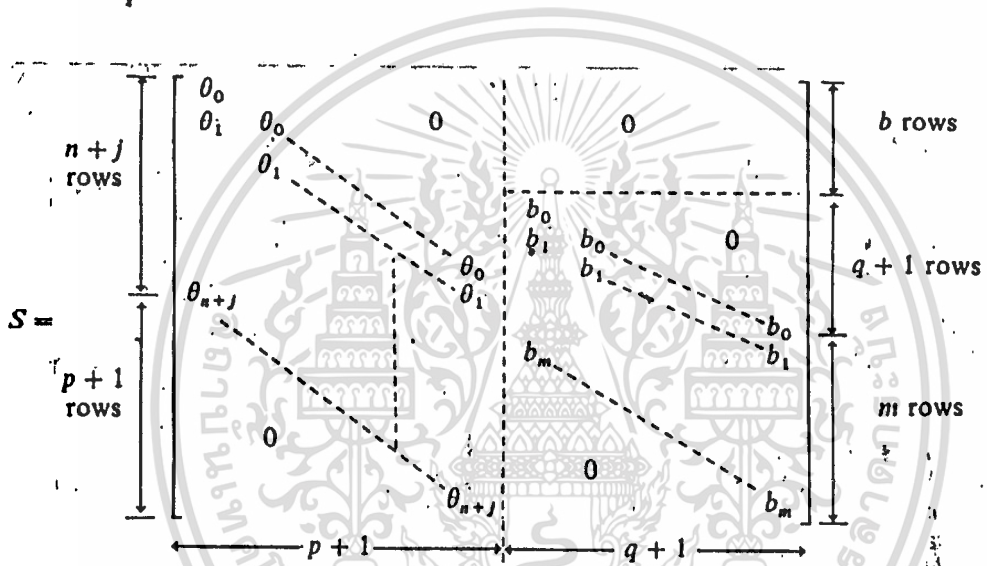
$$D_m(z^{-1})D_o(z^{-1}) = \phi_0 + \phi_1 z^{-1} + \dots + \phi_{t+n} z^{-(t+n)} \quad (2.34)$$

$$A(z^{-1})F(z^{-1}) = \theta_0 + \theta_1 z^{-1} + \dots + \theta_{n+j} z^{-(n+j)} \quad (2.35)$$

ให้

$$S \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} = \phi \quad (2.36)$$

เมื่อ



$$r^{\#} = (r_0^{\#}, r_1^{\#}, \dots, r_p^{\#})^T$$

$$s = (s_0, s_1, \dots, s_n)^T$$

$$\phi = (\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_{n+j})^T$$

และกำหนดให้

$$\begin{aligned} n+j+p &= p+q+1 \\ \text{หรือ} \\ q &= n+j-1 \end{aligned} \quad (2.37)$$

จาก (2.33) ทำให้

$$p = b+m-1$$

และ

$$t = j+p$$

ถ้าหาก $\det S = 0$ แล้วเราจะหาค่าพารามิเตอร์ f^* , g ได้จาก

$$\begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} = S^{-1} \phi \quad (2.38)$$

ซึ่งเมื่อนำไปแทนค่าแล้วจะได้ฟังก์ชันส่งผ่านของตัวควบคุมเป็น

$$G_c(z^{-1}) = \frac{G(z^{-1})}{F'(z^{-1})F^*(z^{-1})}$$

บทที่ 3

การจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

ในการที่มีความต้องการที่จะนำระบบควบคุมแบบปรับตัวเองไปใช้ในการควบคุมกระบวนการจริงนั้น เนื่องจากระบบควบคุมแบบปรับตัวเองนั้นมีลักษณะของการลู่ออกอยู่ ดังนั้นก่อนการตัดสินใจที่จะนำระบบควบคุมแบบปรับตัวเองไปใช้งานจึงได้ทดลองจำลองระบบควบคุมแบบปรับตัวเองด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาและทดสอบการใช้งานระบบควบคุมแบบปรับตัวเอง ในบทนี้จะเป็นการจำลองระบบควบคุมแบบปรับตัวเองบนไมโครคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ TUTSIM ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับการจำลองระบบควบคุมโดยเฉพาะ ทำให้การจำลองระบบควบคุมทำได้สะดวกเร็วและมีความน่าเชื่อถือสูง โดยผลการจำลองระบบควบคุมจะแสดงออกทางกราฟิกบนแกนเวลา และค่าสุดท้ายของการคำนวณเป็นตัวเลข ทำให้สามารถนำข้อมูลมาใช้ศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบ เพื่อออกแบบระบบควบคุมที่จะใช้งานจริง

จุดประสงค์ของการจำลองระบบควบคุม

การจำลองระบบควบคุมในบทนี้ จะเป็นการจำลองการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ด้วยวิธี Conventional Least Square โดยเปรียบเทียบผลกระทบของค่า Forgetting Factor ต่อความละเอียดและความแน่นอนในการระบุเอกลักษณ์ เมื่อเทียบกับระบบอันดับหนึ่งที่จำลองขึ้นมา

ในส่วนการศึกษาระบบควบคุมแบบปรับตัวเองนั้นจะทำการจำลองระบบ

อันดับหนึ่ง ทดลองควบคุมด้วยตัวควบคุม PID แบบพารามิเตอร์คงที่ ด้วยทฤษฎี การปรับแต่งที่ยึดถือเกณฑ์สมรรถนะต่างๆกันคือ ISE, IAE, ITAE, Ziegler-Nichols, Deadbeat ทั้งในกรณีที่มีค่าพารามิเตอร์ของระบบคงที่ และ ค่าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา รวมถึงการใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองในการควบคุมระบบที่มีค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบและวิเคราะห์ สมรรถนะในการควบคุมและเสถียรภาพในการควบคุม ของการปรับแต่งด้วยวิธีการแบบต่าง และด้วยตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง

การจำลองระบบ

ในการจำลองระบบควบคุมนี้จะเป็นการจำลองกระบวนการที่เรากำหนด ให้เป็นระบบอันดับหนึ่งมีสมการของฟังก์ชันส่งผ่านเป็น

$$G_p = \frac{K_p e^{-sT_d}}{(1 + sT)}$$

- เมื่อ
- Td เป็น ค่าเดดไทม์
 - T เป็นค่าคงตัวของเวลา
 - K_p เป็นอัตราขยายของกระบวนการ

เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบเราจะกำหนดให้กระบวนการที่จำลองมีค่าเดดไทม์ = 3 วินาที ค่าคงตัวของเวลาเป็น 10 วินาที ค่าอัตราขยาย

ของกระบวนการเป็น 1 ในกรณีที่กระบวนการเป็นแบบค่าพารามิเตอร์คงที่ และค่าอัตราขยายของกระบวนการเพิ่มขึ้นตามเวลาในกรณีที่กระบวนการเป็นแบบค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามเวลา ตามภาคผนวก 1, 2

การจำลองตัวควบคุม

ในกรณีที่ตัวควบคุมเป็นแบบค่าพารามิเตอร์คงที่ จะใช้ตัวควบคุม PID แบบขนานโดยตัดแปลงจากตัวควบคุม PID มาตรฐานของ TUTSIM ตามภาคผนวก 3 ในกรณีที่ตัวควบคุมเป็นแบบปรับตัวเองจะใช้การระบุเอกลักษณ์แบบ Conventional Least Square ตามภาคผนวก 4 และตัวควบคุม PID แบบแปรค่าพารามิเตอร์ได้ตาม ภาคผนวก 5

การทดสอบการควบคุม

ในการทดสอบการควบคุมจะทดสอบการควบคุมเพื่อหาสมรรถนะในการควบคุมของตัวควบคุมแบบต่างๆ

กรณีระบบมีค่าพารามิเตอร์คงที่

ผลตอบสนองของการถูกรบกวนจากภายนอก ด้วยการปรับแต่งแบบ ISE, IAE, ITAE, Zeigler-Nichols, Deadbeat

ผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย ด้วยการปรับแต่งแบบ ISE, IAE, ITAE, Zeigler-Nichols, Deadbeat

กรณีระบบมีค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามเวลา

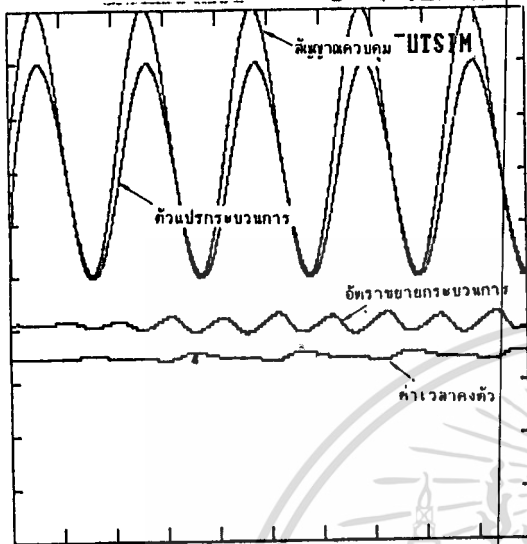
ผลตอบสนองของการถูกรบกวนจากภายนอก ด้วยการปรับแต่งแบบ

ISE, IAE, ITAE, Zeigler-Nichols, Deadbeat

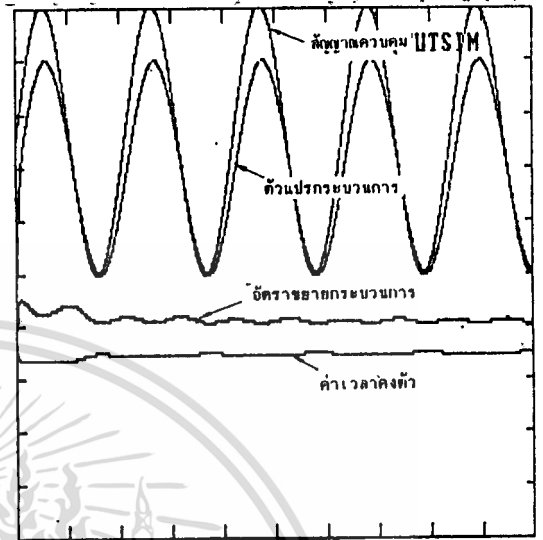
ผลตอบสนองของการถูกรบกวนจากภายนอก ด้วยตัวควบคุมแบบปรับ
ตัวเองด้วยวิธี Zeigler-Nichols และ Deadbeat

ค่า Forgetting Factor	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	
	ค่าอัตราขยาย ของกระบวนการ	ค่าเวลาดังตัว ของกระบวนการ
0.995	-	-
0.999	1.5	3
0.9995	1.5	3
0.9999	4	5

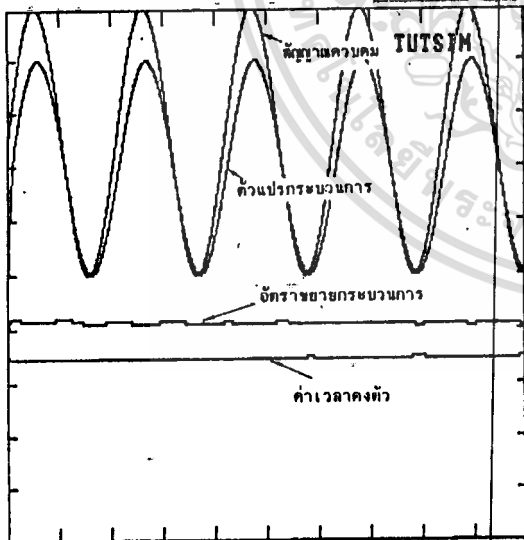
ตาราง 3.1 แสดงการเปรียบเทียบผลของการระบุเอกลักษณ์ด้วยการใช้ค่า
Forgetting Factor ต่างๆกัน



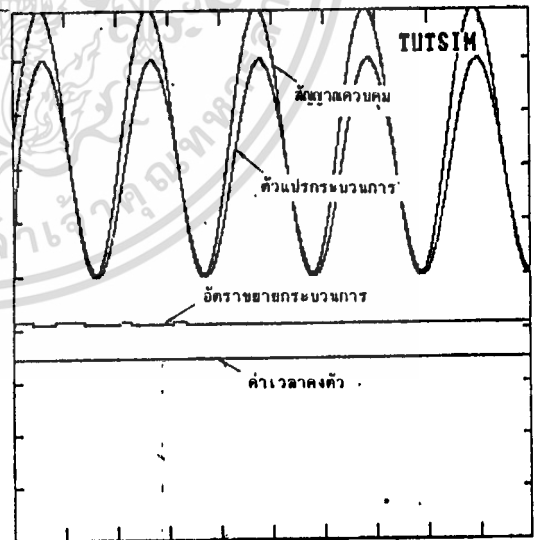
รูปที่ 3.1 การระบุเอกลักษณ์ด้วย CLS และ Forgetting Factor = 0.995



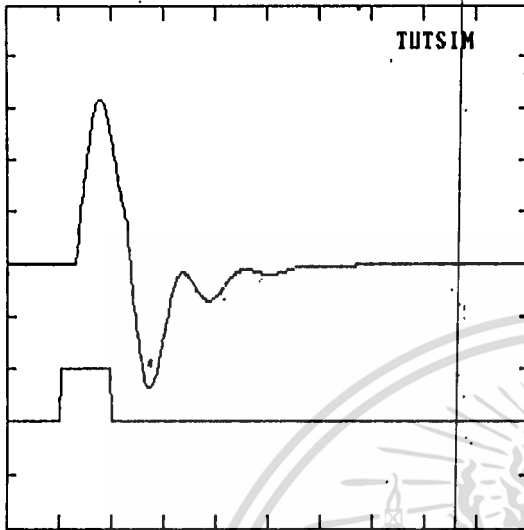
รูปที่ 3.2 การระบุเอกลักษณ์ด้วย CLS และ Forgetting Factor = 0.999



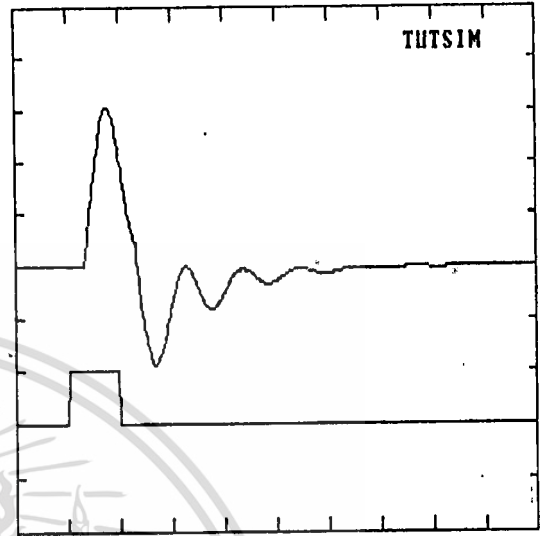
รูปที่ 3.3 การระบุเอกลักษณ์ด้วย CLS และ Forgetting Factor = 0.9995



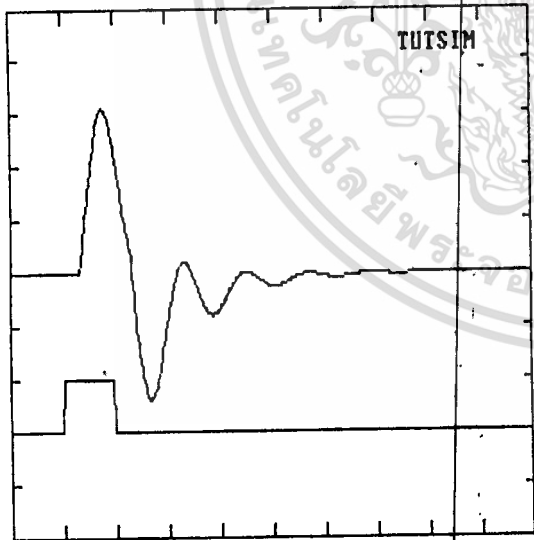
รูปที่ 3.4 การระบุเอกลักษณ์ด้วย CLS และ Forgetting Factor = 0.9999



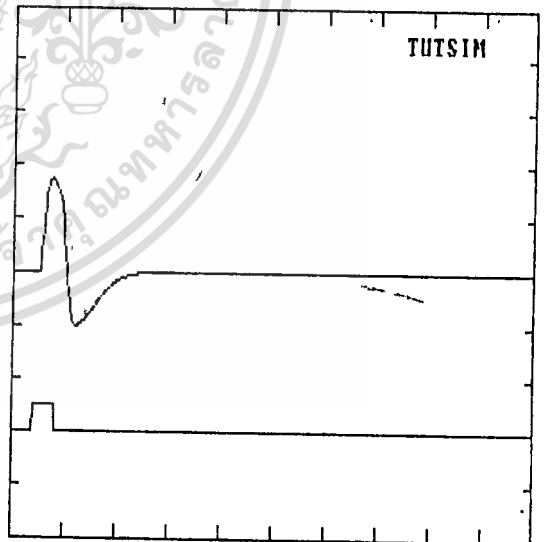
รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ ISE(D1๕๕)



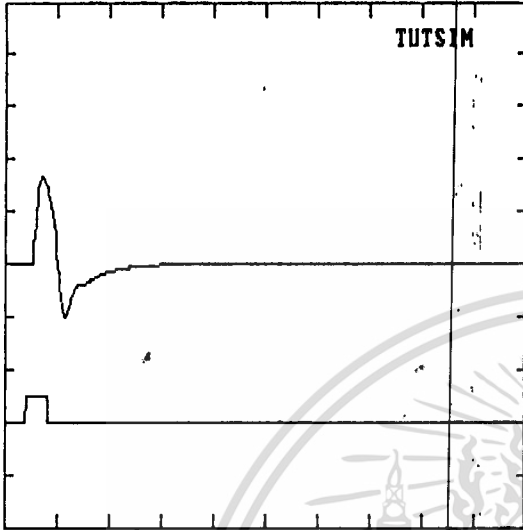
รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ IAE(D1๕๕)



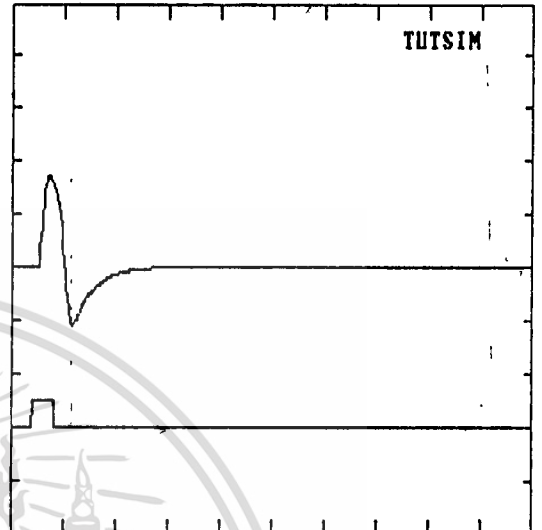
รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ ITAE(D1๕๕)



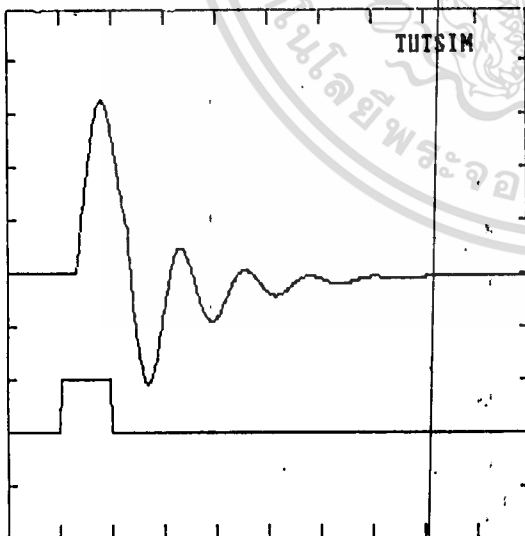
รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับแต่งแบบ ISE(S.P.)



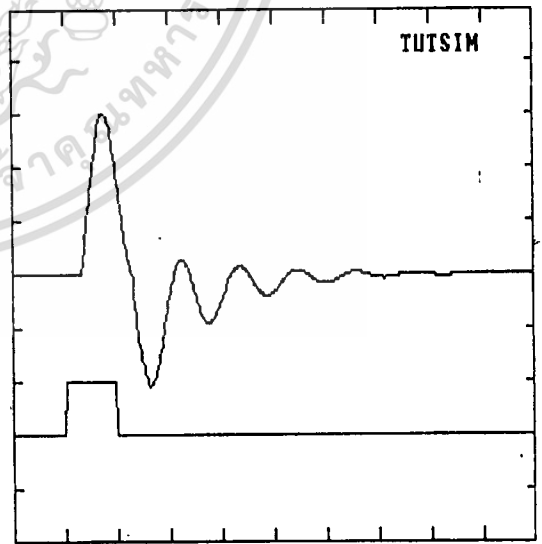
รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับตั้งแบบ IAS(S.P.)



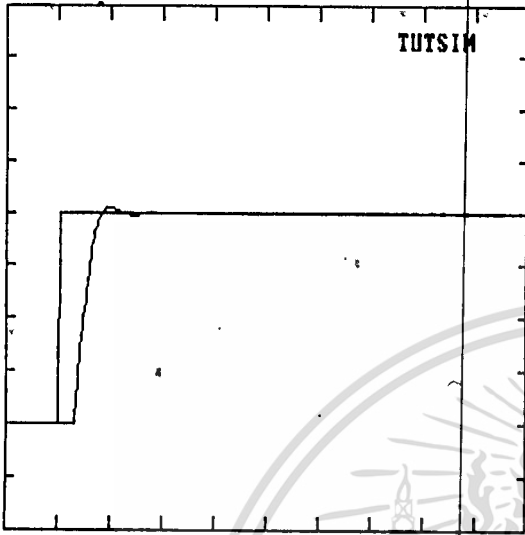
รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับตั้งแบบ IAS(S.P.)



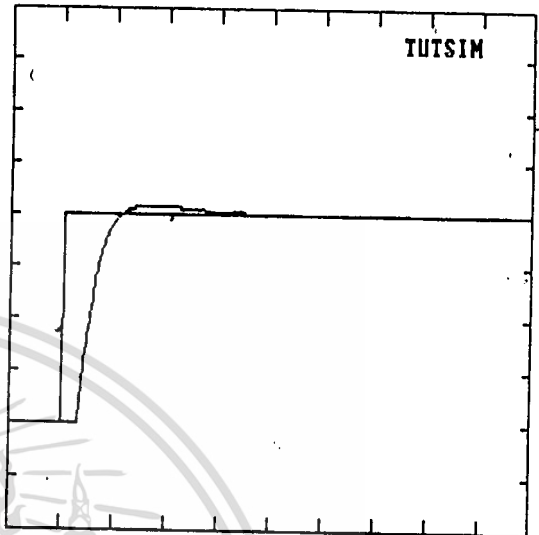
รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับตั้งแบบ Ziegler-Nichols



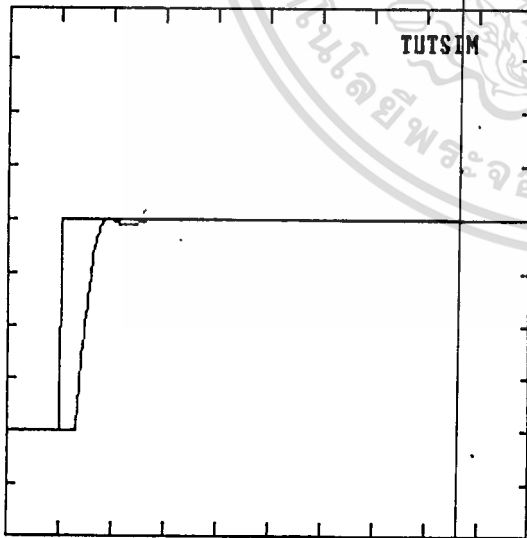
รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองต่อการรบกวนด้วยการปรับตั้งแบบ Deadbeat



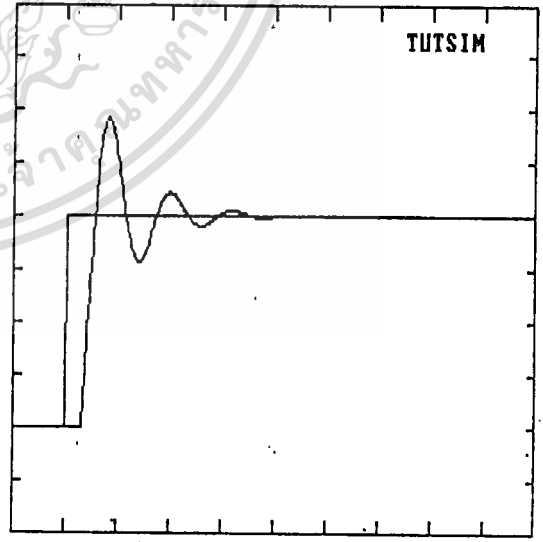
รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ ISR(Diel)



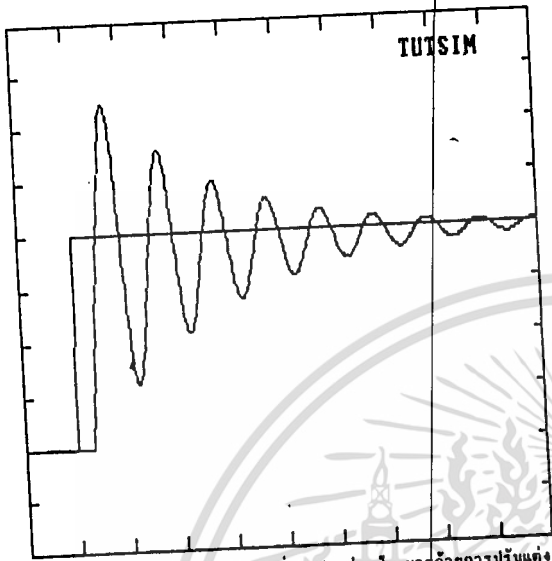
รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ IAK(Diel)



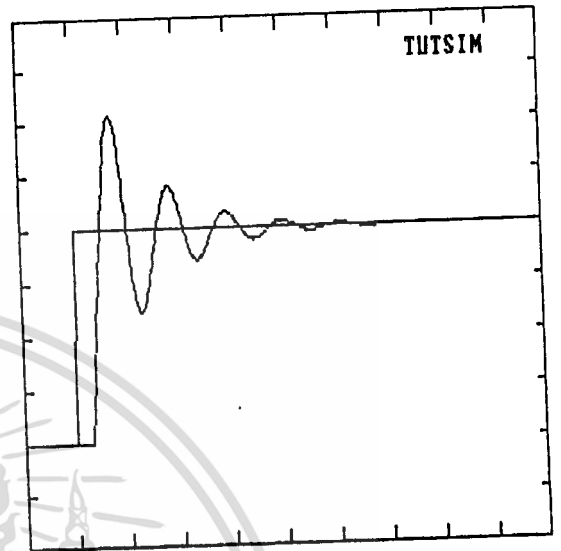
รูปที่ 3.15 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ ITAE(Diel)



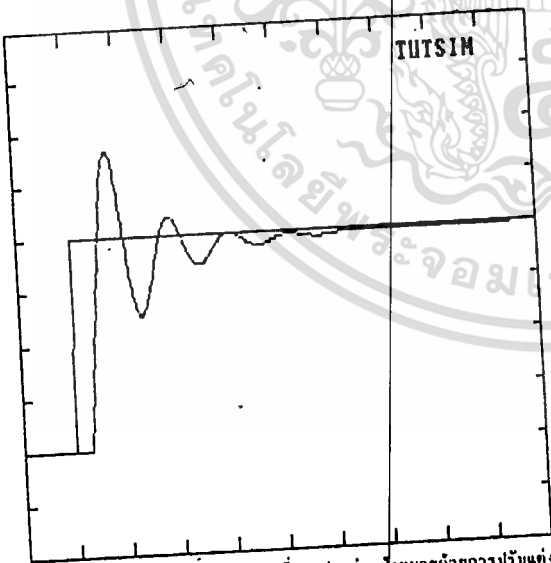
รูปที่ 3.16 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ ISR(S.P.)



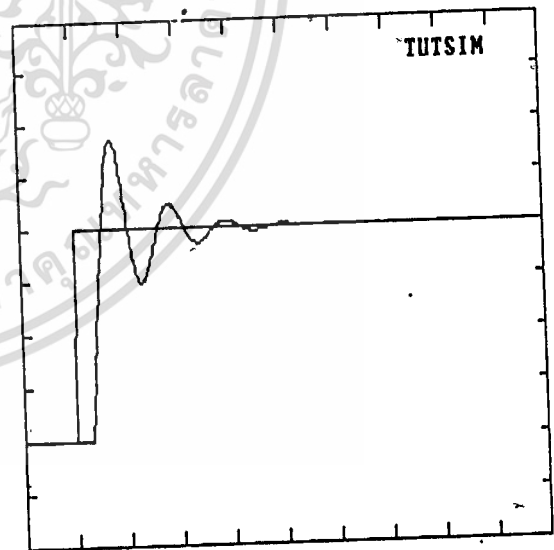
รูปที่ 3.17 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ IAE(S.P.)



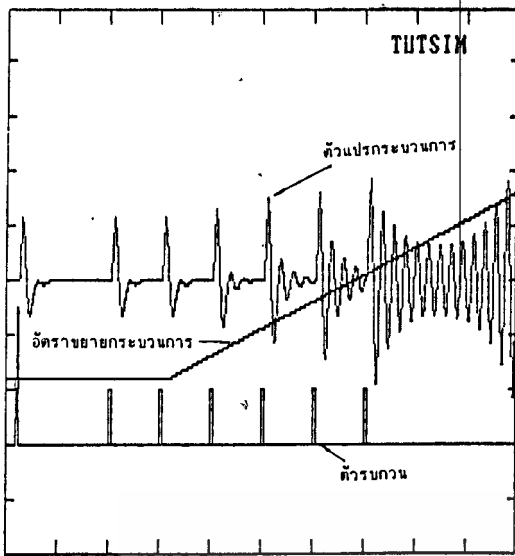
รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ ITAE(S.P.)



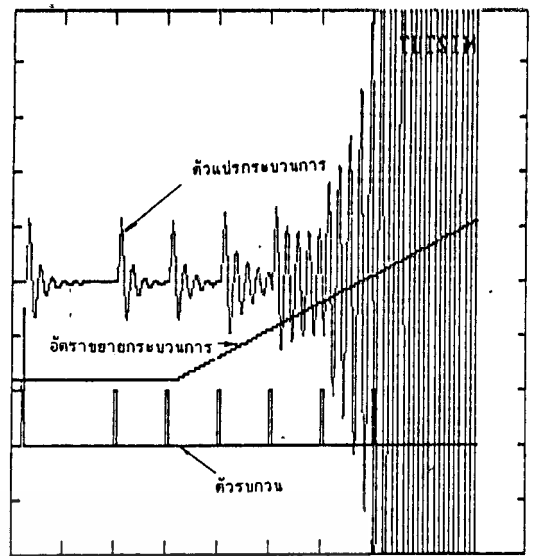
รูปที่ 3.19 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ Ziegler-Nichols



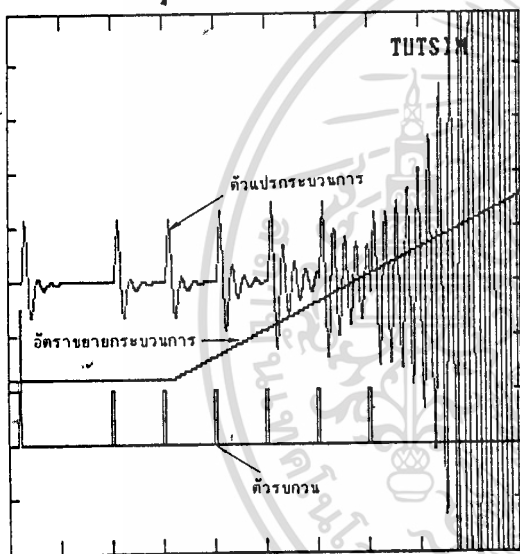
รูปที่ 3.20 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบ Deadbeat



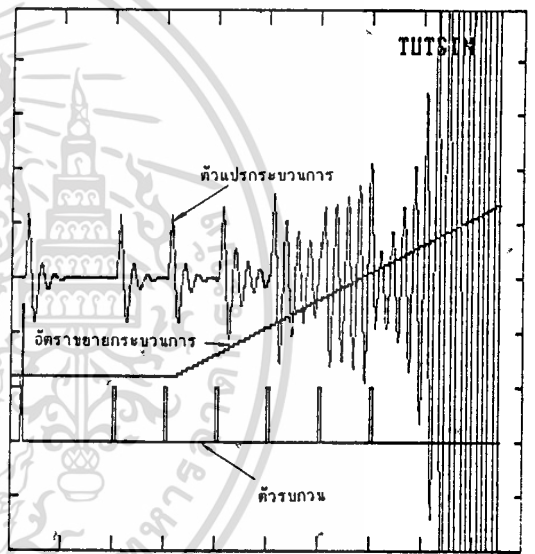
รูปที่ 3.21 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ 15%



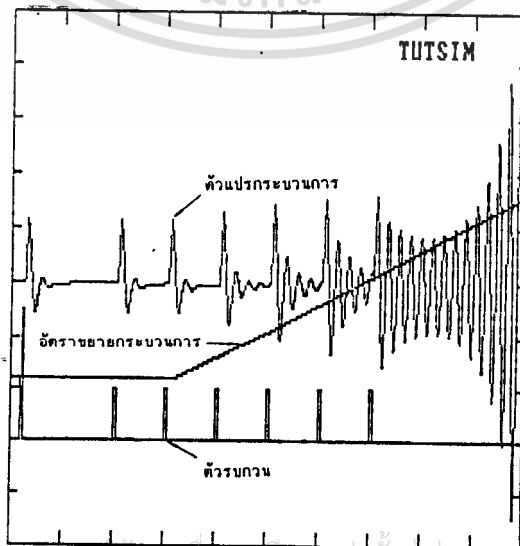
รูปที่ 3.22 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ IAE



รูปที่ 3.23 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ ITAE



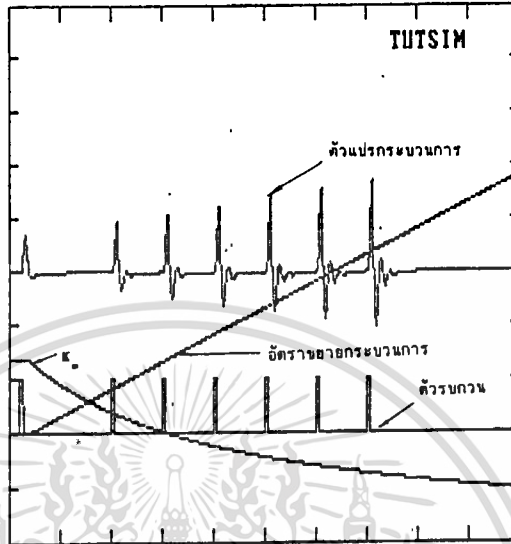
รูปที่ 3.24 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ Zeigler-Nichols



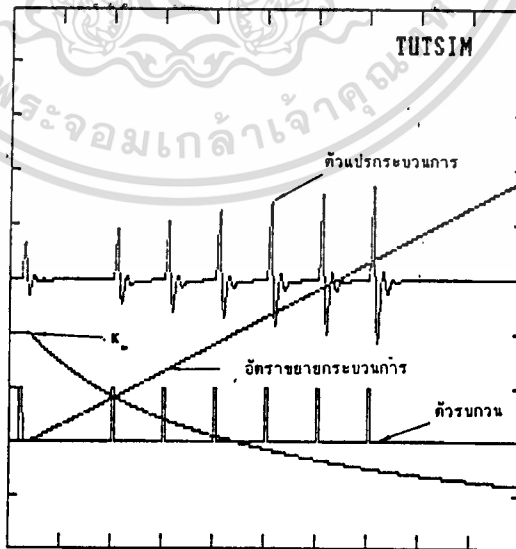
รูปที่ 3.25 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการด้วยการปรับแต่งแบบ Deadbeat

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารนี้อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบปรับตัวเองโดยใช้ Zeigler-Nichols



รูปที่ 3.27 ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบปรับตัวเองโดยใช้ Deadbeat

ตารางผลตอบสนองต่อการรบกวนจากภายนอก					
Tuning- Methode	Percent- Overshoot	Settling Time(sec)	ISE	IAE	ITAE
ISE (Dist)	4.7	45	18.53E-6	0.405	0.157
IAE (Dist)	3.8	53	1.05E-3	0.319	0.154
ITAE(Dist)	4.7	56.7	72.96E-6	0.361	0.142
ISE (S.P.)	5.0	49.3	22.00E-6	0.641	0.257
IAE (S.P.)	5.0	64	24.00E-6	0.520	0.224
ITAE(S.P.)	5.4	56.7	9.00E-6	0.569	0.237
Z.N.	4.1	70	624.0E-6	0.432	0.195
Deadbeat	4.1	73	56.58E-6	0.350	0.147

ตาราง 3.2 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองการรบกวนจากภายนอกด้วยการปรับแต่งแบบต่างๆ

ตารางผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย					
Tuning- Methode	Percent- Overshoot	Settling Time(sec)	ISE	IAE	ITAE
ISE (Dist)	2.68	10	44.70E-9	0.618	0.140
IAE (Dist)	4.46	34	491.0E-9	0.503	0.099
ITAE(Dist)	0	16	357.0E-9	0.504	0.098
ISE (S.P.)	46.4	39.3	2.12E-6	0.745	0.193
IAE (S.P.)	69.6	130	729.0E-6	1.589	0.740
ITAE(S.P.)	53.6	58.1	71.96E-6	0.905	0.275
Z.N.	41.1	84.1	745.8E-6	0.901	0.310
Deadbeat	42.9	41.1	7.33E-6	0.726	0.189

ตาราง 3.3 ตารางเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายด้วยการปรับแต่งแบบต่างๆ

ตารางผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการ				
Tuning- Methode	ความมั่นคง (%)	ISE	IAE	ITAE
ISE (Dist)	205	1.21	17.10	86.12
IAE (Dist)	130	1.99E03	2.3E3	16.6E3
ITAE(Dist)	165	0.54	226.5	1.59E3
Z.N.	190	4.95	23.71	133.94
Deadbeat	140	102.06	307.7	2.08E3

ตาราง 3.4 ตารางเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายกระบวนการ ด้วยการปรับแต่งแบบต่างๆ

วิธี	ISE	IAE	ITAE
Ziegler-Nicholes	98E-6	11.54	41.12
Deadbeat	326E-9	11.38	40.42

ตาราง 3.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง

สรุปผลการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

จากผลการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า Forgetting Factor ต่อการระบุเอกลักษณ์ของระบบว่าการลดลงของค่า Forgetting Factor จะมีผลทำให้การระบุเอกลักษณ์ของระบบมีความถูกต้องมากขึ้น (เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดลดลง) แต่ก็ทำให้เกิดลักษณะของการลู่ออกมากขึ้น ซึ่งจากการจำลองทำให้ได้ค่า Forgetting Fac-

tor ที่เหมาะสมคือ 0.9995 เนื่องจากมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อย และไม่มีลักษณะการลู่ออก

ด้านการควบคุมระบบในกรณีที่ระบบมีค่าพารามิเตอร์คงที่ การใช้วิธีการปรับแต่งแบบ ISE, IAE, ITAE จะได้รับการควบคุมที่มีสมรรถนะดี แต่วิธีการใช้เลขยกกำลังด้วยจุดทศนิยมจะทำให้การพัฒนาเป็นโปรแกรมทำได้ยาก ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธี Zeigler-Nichols และ Deadbeat ซึ่งสะดวกในการพัฒนาจากผลการจำลองตัวควบคุมแบบปรับตัวเองแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองสามารถแก้ปัญหาหาระบบเกิดอเสถียรภาพเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ การใช้วิธี Deadbeat จะได้สมรรถนะที่ดีกว่า (เทียบได้จากการเปรียบเทียบค่า ISE, IAE, ITAE ตามตารางที่ 3.5 ของวิธีทั้งสอง)



การใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองควบคุมกระบวนการจริง

จากบทที่ 3 ได้ใช้การจำลองการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมแบบปรับตัวเองโดยคอมพิวเตอร์ ทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID แบบค่าพารามิเตอร์คงที่ และตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิด PID ในบทนี้เป็นการนำตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิด PID ไปพัฒนาใช้งานในระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ (Distributed Control System) โดยเลือกใช้ควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ย ของตัวเพิ่มความร้อนอากาศแบบ Ljungstrom ซึ่งใช้งานอยู่ในกระบวนการหม้อต้มไอน้ำขนาด 1000 T/H

ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์

ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์นี้ในปัจจุบันนิยมใช้กันมาก และมีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนที่ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (Conventional Control System) และระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ (Centralize Control System) เนื่องจากระบบควบคุมแบบดั้งเดิม มีปัญหาในด้านการติดตั้งทำได้ยาก ใช้เวลานาน จะต้องใช้ช่างชำนาญงาน เพราะแต่ละระบบจะมีวิธีติดตั้งเฉพาะตัว และที่สำคัญ คือการประยุกต์ใช้งานทำได้ยากลำบาก เนื่องจากระบบควบคุมแบบดั้งเดิมเป็นระบบที่ใช้การนำโมดูลในการคำนวณที่เราเรียกว่า Computing Relay แต่ละโมดูลมาต่อเข้าด้วยกันทำให้เป็นลูบในการควบคุม ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้งานในการควบคุมแบบการควบคุมขั้นสูงได้เพราะ

Computing Relay จะมีเฉพาะโมดูลในการคำนวณพื้นฐาน เช่น บวก ลบ คูณหาร ถอดรากที่ 2 และ PID เป็นต้น และการต่อโมดูลเข้าด้วยกันหลายๆ โมดูล จะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น การใช้ระบบควบคุมขั้นสูงในระบบควบคุมแบบดั้งเดิมจึงทำได้ยากและค่าใช้จ่ายสูง ส่วนระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ เป็นระบบควบคุม ที่พัฒนาจากระบบควบคุมแบบ DIREC DIGITAL CONTROL ทำให้สามารถประยุกต์ใช้การควบคุมขั้นสูงได้ เนื่องจากมีการควบคุมกระบวนการด้วยพื้นฐานของคอมพิวเตอร์ (Computer Based Process Control) การติดตั้งการใช้งาน จะง่ายและสะดวกกว่า ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม แต่ก็ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากเป็นระบบที่ให้ความสำคัญต่อคอมพิวเตอร์กลางสูงสุด จึงข้อดีน้อยกว่าระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ดังนี้

1. ระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ให้ความสำคัญต่อคอมพิวเตอร์กลางสูงสุด การเกิดปัญหาที่คอมพิวเตอร์กลาง จะทำให้เกิดปัญหา หรืออาจจะเกิดอันตรายต่อบุคคลและอุปกรณ์ในระบบที่ควบคุมอยู่ เช่นการที่คอมพิวเตอร์กลางหยุดเดินเครื่อง จะทำให้ต้องหยุดเดินเครื่องระบบที่ถูกควบคุมอยู่ด้วย การแก้ปัญหาลักษณะนี้จะทำด้วยการการออกแบบให้คอมพิวเตอร์กลางมีระบบคอมพิวเตอร์สำรอง ที่จะสามารถทำงานแทนคอมพิวเตอร์กลางได้ แต่การออกแบบลักษณะนี้หากจะให้ได้ผลจริงก็จะต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงมีใช้เฉพาะระบบที่มีความสำคัญและต้องการความปลอดภัยสูง เช่น โรงไฟฟ้าปฏิกรณ์ปรมาณู หรือ ในยานอวกาศ

2. เนื่องจากระบบควบคุมแบบรวมศูนย์มีการทำงานในลักษณะคอมพิวเตอร์โดยที่จะมีการทำงานของโปรแกรมเฉพาะที่คอมพิวเตอร์กลางเท่านั้น ในกรณีที่ระบบที่ถูกควบคุมใหญ่ขึ้น ขนาดของโปรแกรมจะใหญ่ขึ้น ทำให้

การทำงานของระบบควบคุมช้าลง และมีโอกาสที่จะเกิดปัญหาในโปรแกรมมากขึ้นด้วย ในกรณีที่ปัญหาขึ้นในโปรแกรมการควบคุม หากระบบควบคุมแบบรวมศูนย์นี้ไม่มีคอมพิวเตอร์สำรอง การแก้ไขปัญหาโดยไม่ต้องหยุดเดินเครื่องจะทำได้ยากและอาจจะมีปัญหาต่อระบบก็ได้

ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์จึงได้ถูกออกแบบให้แก้ปัญหาดังกล่าวคือ ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์จะถูกออกแบบให้มีระบบควบคุมหลายๆ ตัวในโครงข่าย (NETWORK) เดียวกัน และแต่ละระบบควบคุมจะมีการทำงานเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งเราเรียกแต่ละระบบว่า NODE หาก NODE ใดๆ มีความเสียหายเกิดขึ้นก็จะต้องไม่มีผลกระทบต่อ NODE อื่นๆ โดยที่ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์จะมีข้อดีดังนี้

1. ค่าใช้จ่ายจะลดลง เนื่องจากการออกแบบระบบควบคุมแบบนี้จะกระจายการทำงานของแต่ละ NODE ออกไป ทำให้แต่ละ NODE มีการทำงานเฉพาะตัวดังนั้นแต่ละ NODE จึงมีขนาดเล็กและไม่จำเป็นต้องมีฟังก์ชันการทำงานมากเกินไป การออกแบบระบบควบคุมจึงง่ายต่อการเลือกใช้ชนิดและจำนวนของ NODE ตามความจำเป็นของระบบที่ถูกควบคุม ซึ่งต่างจากระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ ที่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายขั้นต่ำสำหรับคอมพิวเตอร์กลางซึ่งถูกออกแบบเพื่อไว้สำหรับกระบวนการขนาดใหญ่

2. ความมั่นคงของระบบดีขึ้น เนื่องจากระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ถูกออกแบบให้ NODE ที่ใช้ในการควบคุมมีขนาดเล็ก และใช้เฉพาะงาน ดังนั้นจึงสามารถออกแบบให้มีตัวควบคุมสำรองได้ง่ายโดยไม่เสียค่าใช้จ่ายมากนัก นอกจากนี้ ในกรณีที่ตัวควบคุมหลัก และตัวควบคุมสำรองเกิด

ความเสียหาย ไม่สามารถควบคุมกระบวนการ ระบบควบคุมแบบนี้ยังถูกออกแบบให้สามารถคงสภาพการเดินเครื่องไว้ได้ โดยมีส่วนที่เรียกว่า HARD STATION ตัว HARD STATION นี้จะมีหน้าที่ควบคุมสัญญาณเข้าออกของระบบควบคุม ในกรณีที่ตัวควบคุมหลักหรือตัวควบคุมสำรองตัวใดตัวหนึ่งยังสามารถทำงานได้อยู่ HARD STATION จะรับสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมที่กำลังทำงานอยู่ แล้วส่งออกไปเพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์ขั้นต่างๆ แต่หากทั้งตัวควบคุมหลักและตัวควบคุมสำรอง ไม่สามารถทำงานได้ HARD STATION ซึ่งคอยตรวจสอบการทำงานของตัวควบคุมทั้งสองอยู่ ก็จะทำการปลดตัวเองออกจากการควบคุมของตัวควบคุม ทำให้พนักงานเดินเครื่อง สามารถปฏิบัติการเพื่อรักษาสภาพการเดินเครื่องไว้ได้

3. ระบบควบคุมมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เนื่องจากระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ มีการใช้ตัวควบคุมสำรอง ทำให้สามารถปรับปรุงแก้ไขหรือขยายระบบควบคุมในขณะที่เดินเครื่อง

4. ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ สามารถเพิ่มขีดความสามารถของระบบในด้านข้อมูลข่าวสารในระบบ เช่น การเก็บประวัติการเดินเครื่อง การสร้าง TREND การติดต่อระหว่างพนักงานเดินเครื่องกับกระบวนการ การตรวจสอบการทำงานในส่วนต่างๆของระบบ การคำนวณหาประสิทธิภาพของการเดินเครื่อง การติดต่อกับคอมพิวเตอร์ที่ใช้ทางด้านบริหารของโรงงาน การติดต่อกับคอมพิวเตอร์ที่ใช้ทางด้านแนะนำการเดินเครื่อง (Supervisory Control) หรือระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) โดยไม่มีผลกระทบต่อการทำงาน ทั้งนี้เนื่องจากระบบควบคุมแบบนี้แต่ละส่วนที่กล่าวมาจะแยกกันทำงานและติดต่อกันผ่านทาง DATA HIGHWAY เฉพาะข้อมูล

ที่จำเป็นสำหรับตัวเอง หรือถูกร้องขอจากส่วนอื่นเท่านั้น จึงสามารถรักษาการทำงานไว้ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งต่างจากระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ที่คอมพิวเตอร์กลาง จะทำหน้าที่นี้ทั้งหมดทำให้การทำงานของเครื่องช้าลง และหากมีปัญหาขึ้นในส่วนของข้อมูลข่าวสาร อาจจะทำให้การทำงานของคอมพิวเตอร์กลางช้าลงหรืออาจมีผลให้คอมพิวเตอร์กลางทำงานผิดพลาดได้

5. ในส่วนของโปรแกรมการทำงานต่างๆของระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ เช่น อัลกอริทึมในการควบคุม การแสดงข้อมูลบนจอภาพ การใช้ฟังก์ชันติดต่อระหว่างพนักงานเดินเครื่องกับระบบการที่เรียกว่า (SOFT STATION) จะถูกสร้างมาจากบริษัทผู้ผลิตในลักษณะสำเร็จรูป ทำให้การพัฒนาระบบควบคุมง่ายขึ้น และมีการผิดพลาดเนื่องจากโปรแกรมน้อยลง ต่างกับระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ ที่ใช้การพัฒนาระบบควบคุมในลักษณะโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้การพัฒนาระบบควบคุมทำได้ช้า ต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ในด้านคอมพิวเตอร์ และอาจเกิดการผิดพลาดจากโปรแกรมได้ง่าย

โครงสร้างของระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์

ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์จะถูกออกแบบมาให้มีลักษณะเป็นโครงข่ายที่ประกอบด้วย NODE แบบต่างๆ ที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน ติดต่อกันด้วยระบบสื่อสารเรียกว่า DATA HIGHWAY โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. ส่วนระบบควบคุม (Control System Unit) ส่วนนี้ จะมีหน้าที่หลักคือ เป็นตัวควบคุมกระบวนการ และมีชนิดต่างๆดังนี้

1.1 หน่วยควบคุมท้องถิ่น (Local Control Unit) หน่วยนี้เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการโดยตรง โดยรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัด นำข้อมูลมาผ่านโปรแกรมการควบคุม (Control Algorithm) แล้วนำสัญญาณควบคุมส่งไปควบคุมอุปกรณ์ขับ

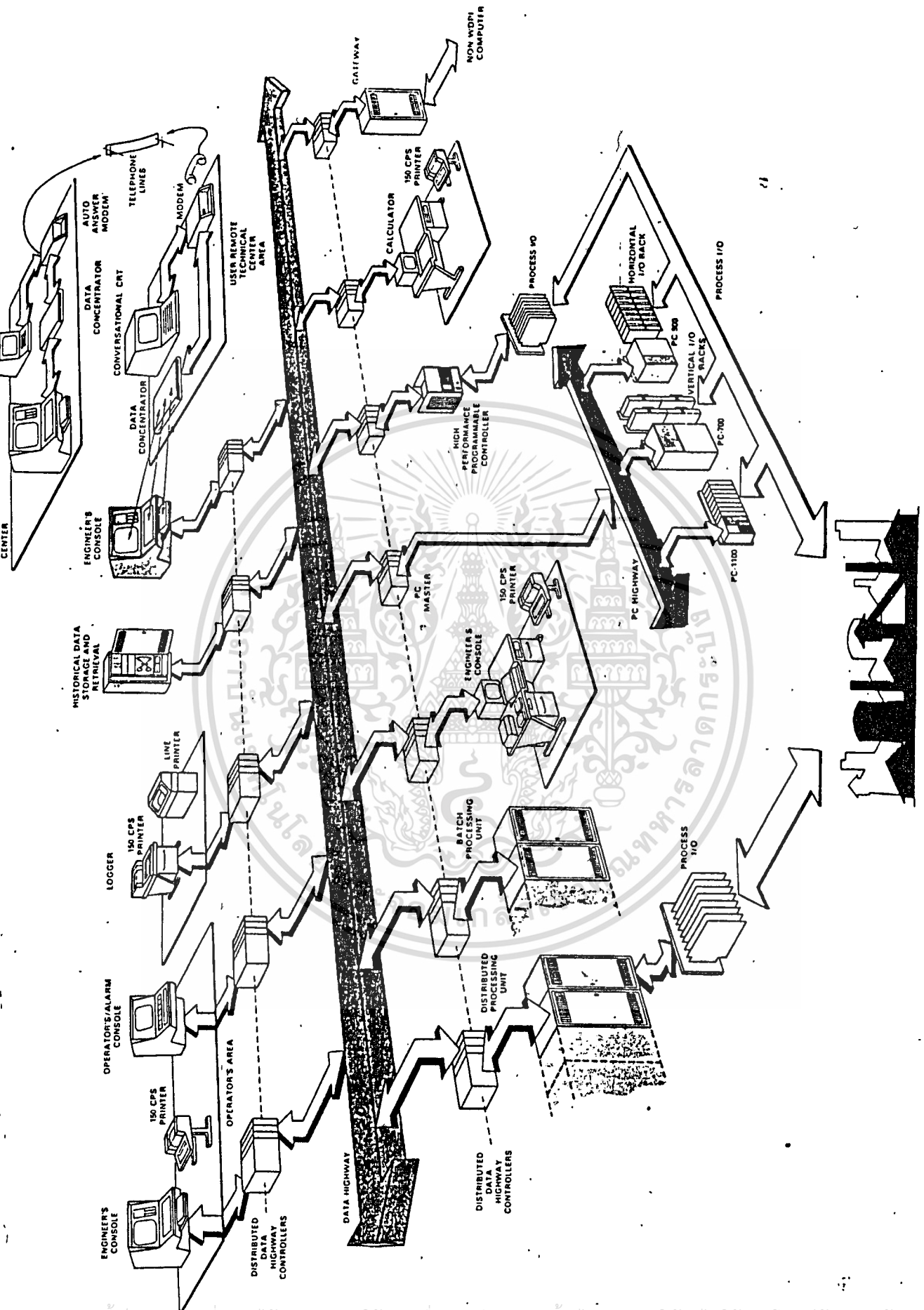
1.2 หน่วยติดต่อตัวควบคุมอื่น (PC interface) หน่วยนี้จะเป็นส่วนที่ติดต่อกันตัวควบคุมแบบโปรแกรมได้ (Programmable Controller) อื่นๆ เพื่อให้การทำงานของเชื่อมให้การควบคุมเป็นระบบเดียวกัน

2. ส่วนปฏิบัติการควบคุม (Human Interface) ส่วนนี้จะ เป็นหน่วยที่ให้พนักงานเดินเครื่องติดต่อกับกระบวนการ โดยใช้สำหรับควบคุมกระบวนการ และเรียกดูข้อมูลข่าวสารต่างๆ

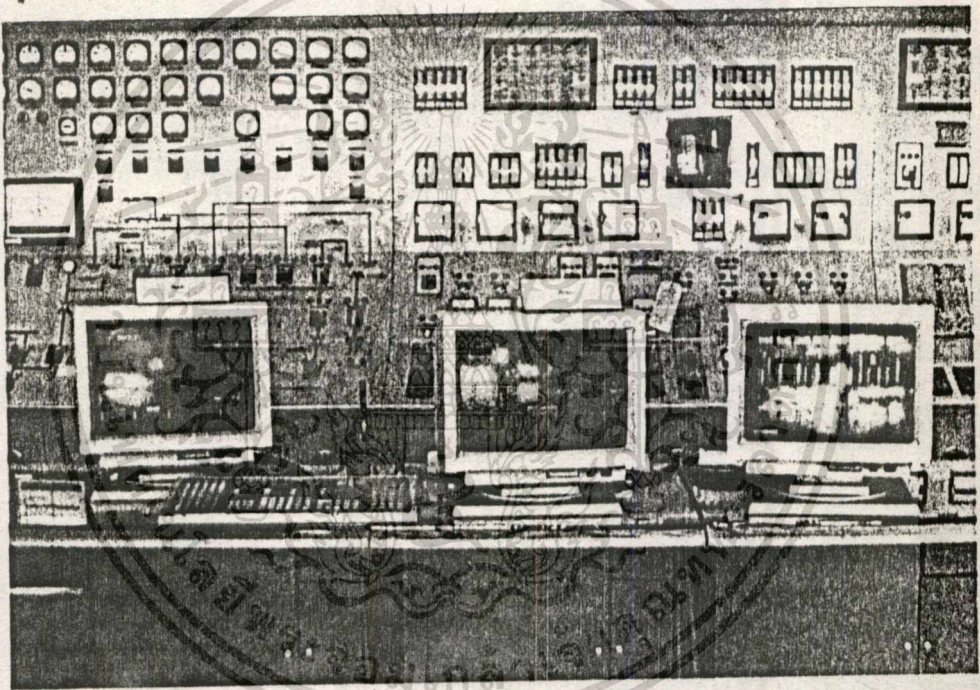
3. ส่วนข้อมูลข่าวสาร (Information System) ส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นส่วนที่ทำการประมวลผลข้อมูลต่างๆ เป็นส่วนที่รับข้อมูลจากกระบวนการ ทำการเก็บข้อมูลที่ถูกกำหนดไว้เพื่อใช้ในการสรุปและวิเคราะห์ การเดินเครื่อง รวมถึงระบบคำนวณประสิทธิภาพและระบบเตือนภัยต่างๆ

ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ที่ใช้ในการทดลอง

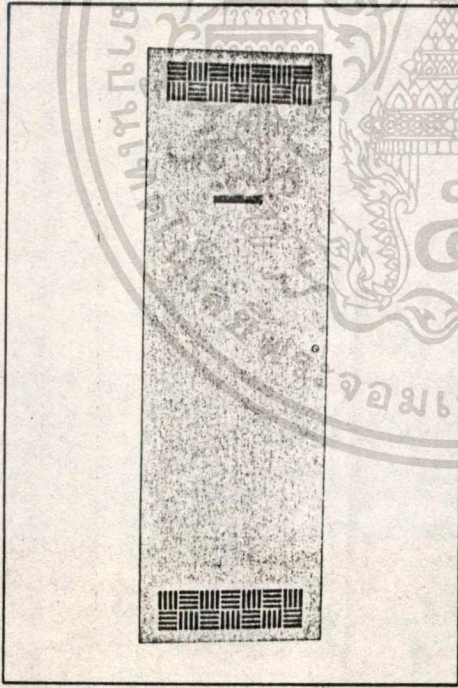
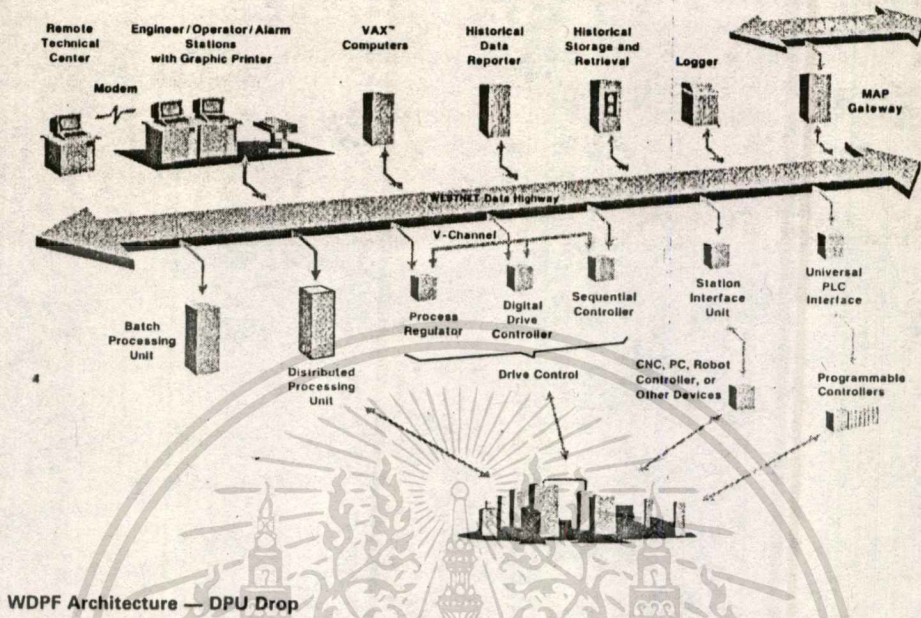
ในการพัฒนาตัวควบคุมแบบปรับตัวเองนี้ ได้ทำการพัฒนาบระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ที่ใช้งานอยู่ที่ โรงจักรไฟฟ้าพระนครใต้ เครื่องที่ 3 ทำหน้าที่ควบคุมหม้อต้มไอน้ำขนาด 1000 T/H. มีโครงสร้างของระบบ



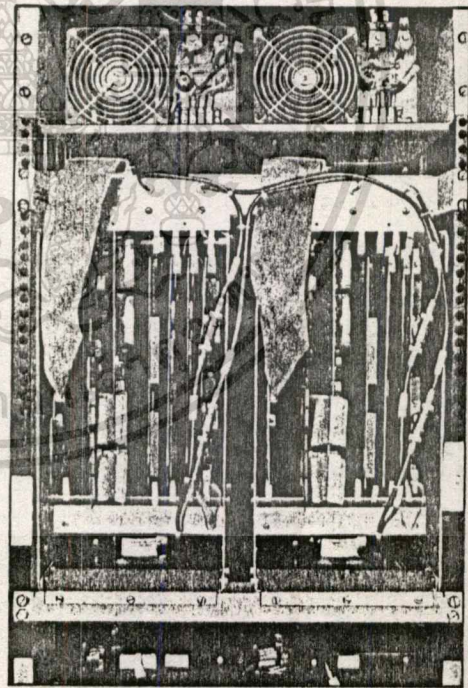
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ 4.1.2 ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ขณะใช้งาน



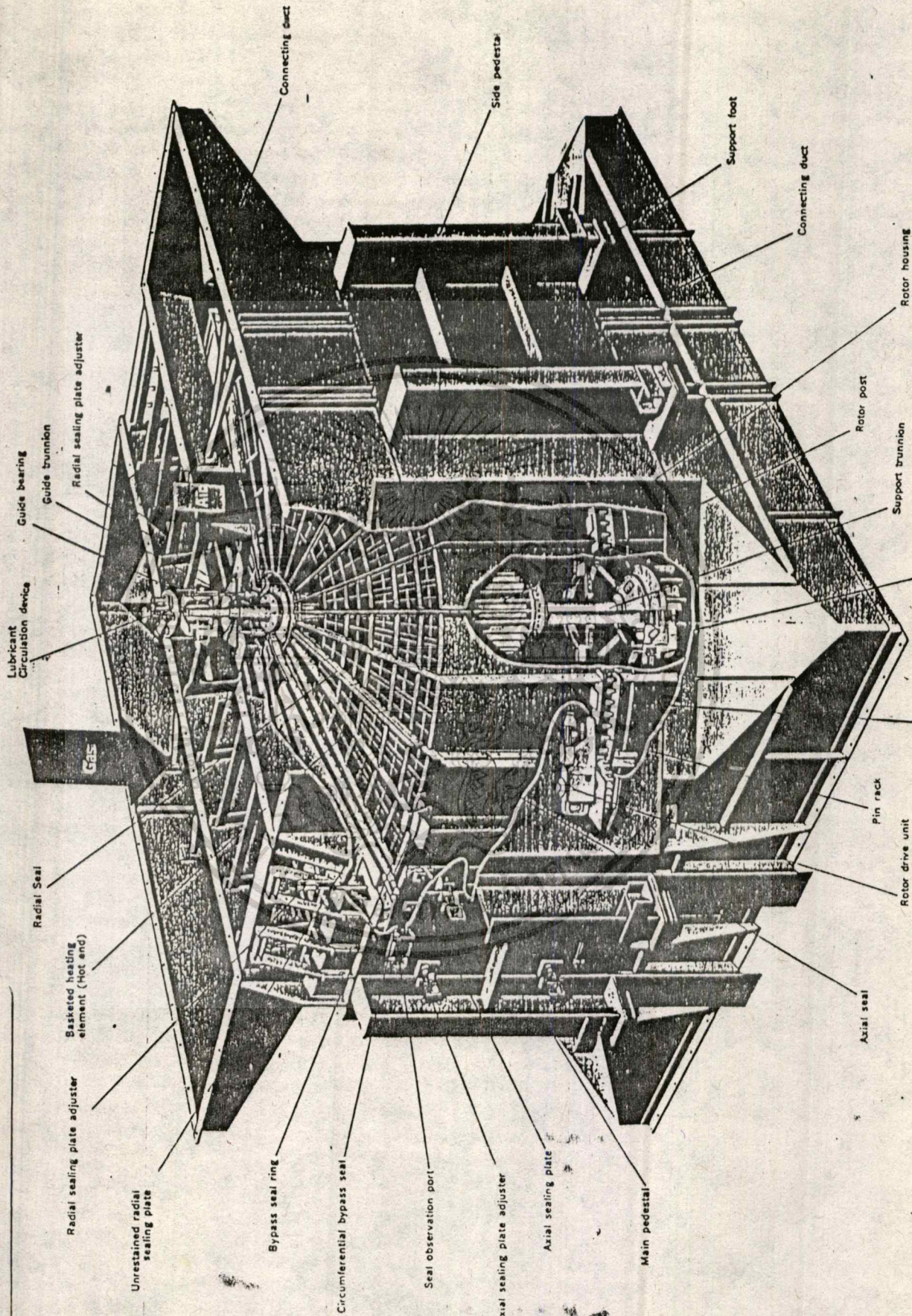
DPU Cabinet



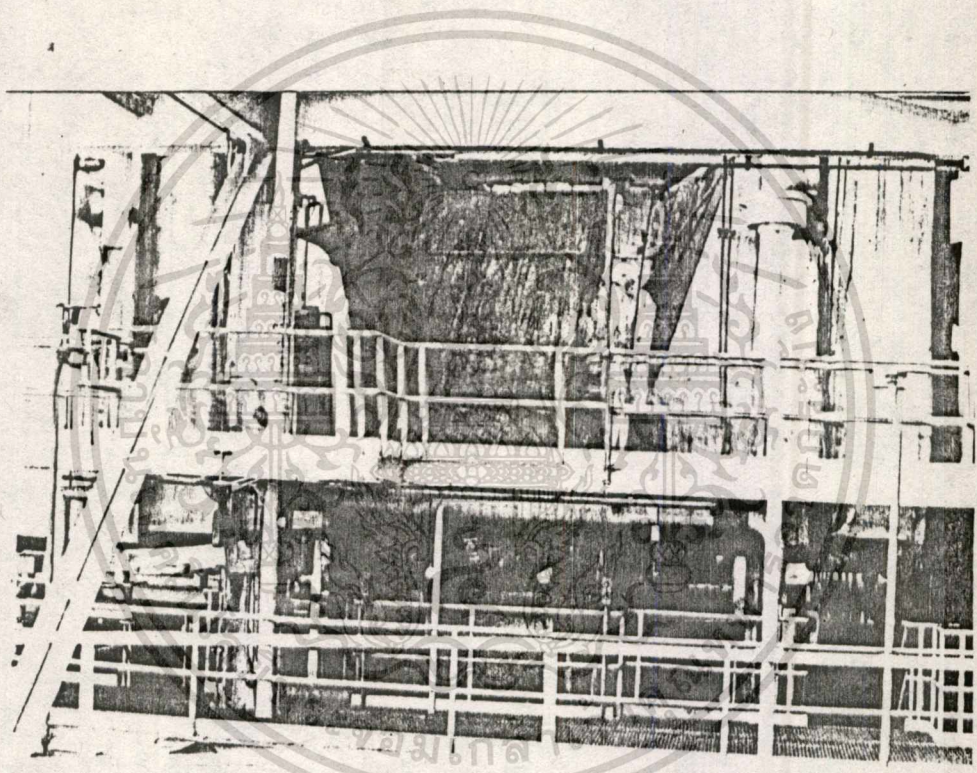
DPU Electronics

รูปที่ 4.2 Distributed Process Unit(DPU)

Ljungström



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



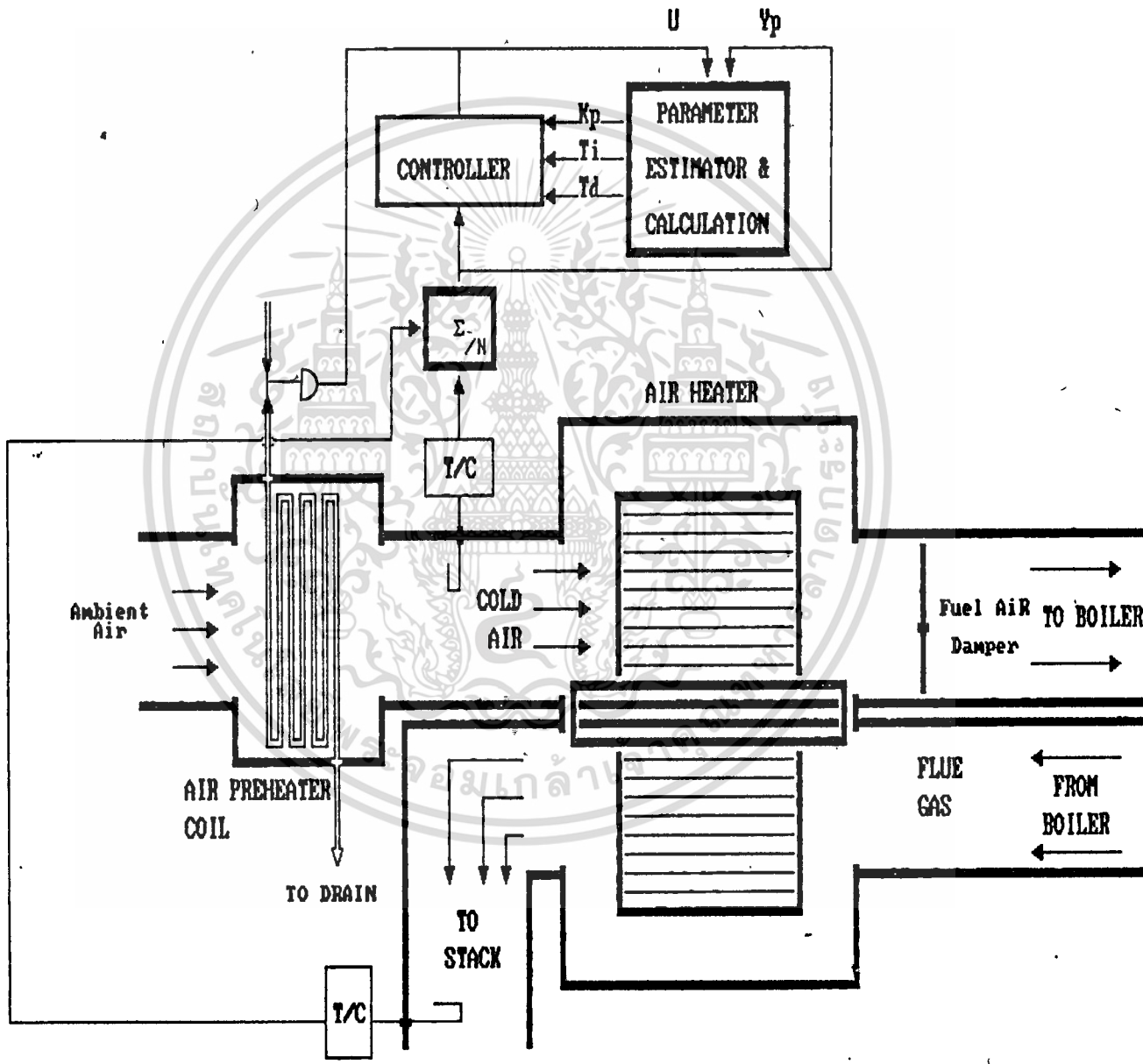
รูปที่ 4.5 ตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศที่ใช้งานกับหม้อต้มไอน้ำ

ตามรูปที่ 4.1 ในส่วนที่ใช้ในการควบคุมเป็นส่วนที่เรียกว่า DPU (Distributed Process Unit) เป็นส่วนที่เก็บโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ในการควบคุม (ตามรูปที่ 4.2 และ 4.3) มีหน่วยรับสัญญาณตัวแปรกระบวนการ เป็น A/D ขนาด 13 บิต มีคาบการส่งข้อมูล 1 วินาที

กระบวนการตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศ

กระบวนการที่ใช้ในการทดลองเป็นกระบวนการตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศแบบ Ljungstrom ตามรูปที่ 4.4 ที่ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของกระบวนการเผาไหม้ในหม้อต้มไอน้ำ ตามรูปที่ 4.5 การทำงานของกระบวนการตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศแบบ Ljungstrom จะใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นลักษณะคล้ายท่อลม วนตัดผ่านการไหลของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ แล้วจึงวนตัดผ่านเพื่อคายความร้อนอากาศเย็น ทำให้อากาศก่อนเข้าเตามีอุณหภูมิสูงขึ้น ในการควบคุมอุณหภูมิจะควบคุมอุณหภูมิที่ได้จากการเฉลี่ยค่าอุณหภูมิของอากาศเย็นกับก๊าซร้อนก่อนออกจากเตา เพื่อรักษาประสิทธิภาพในการเผาไหม้ และ ป้องกันการเกิดกัดกร่อน ที่เนื้อโลหะ เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำของก๊าซร้อน เมื่อก๊าซร้อนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดควบแน่น วิธีการควบคุมอุณหภูมิจะทำโดยการใช้ไอน้ำอุ่นอากาศเย็นก่อนเข้าสู่ตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศ ด้วยตัวอุ่นอากาศ (Air Preheater Coil) เพื่อเพิ่มค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตามรูป 4.6 เนื่องจากกระบวนการตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศ เป็นกระบวนการที่มีค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง ตามเงื่อนไขการเดินทาง เครื่องทำให้เป็นกระบวนการที่มีพารามิเตอร์ไม่แน่นอน สาเหตุที่ทำให้ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงได้แก่

1. ชนิดของเชื้อเพลิง (แก๊ส หรือ น้ำมัน)



รูปที่ 4.6 การทำงานของตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศ

$$P(N+1) = 1 [P(N) - A \cdot D/B]$$

$$a = e^{-T/\tau}$$

$$b = k(1 - e^{-T/\tau})$$

$$\ln a = -T/\tau$$

$$\tau = -T/\ln a$$

$$b = k(1 - a)$$

$$k = b/(1-a)$$

2. ส่วนการคำนวณพารามิเตอร์ การคำนวณพารามิเตอร์นี้ เลือกใช้วิธีการแบบ Deadbeat Algorithm (จากบทที่ 2)

$$K_c = (T_1 + T_2) / (ok)$$

$$T_1 = T_1 + T_2$$

$$T_d = (T_1 \cdot T_2) / (T_1 + T_2)$$

เนื่องจากในการระบุเอกลักษณ์ประมาณค่าเพียงค่าคงตัวของเวลาเพียงลำดับที่ 1 ดังนั้นจึง ประมาณให้

$$\tau = T_1 + T_2$$

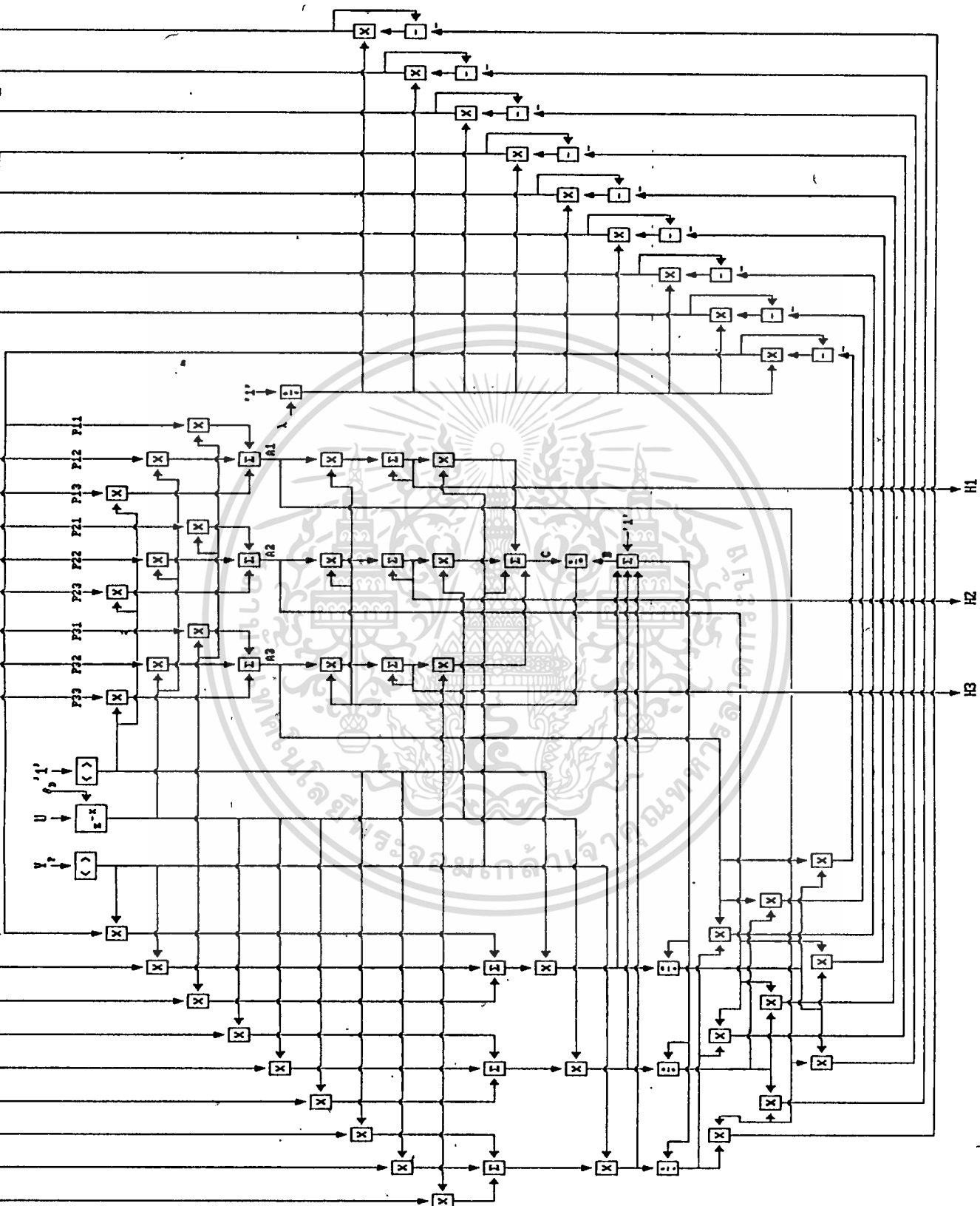
$$T_1 = T_2$$

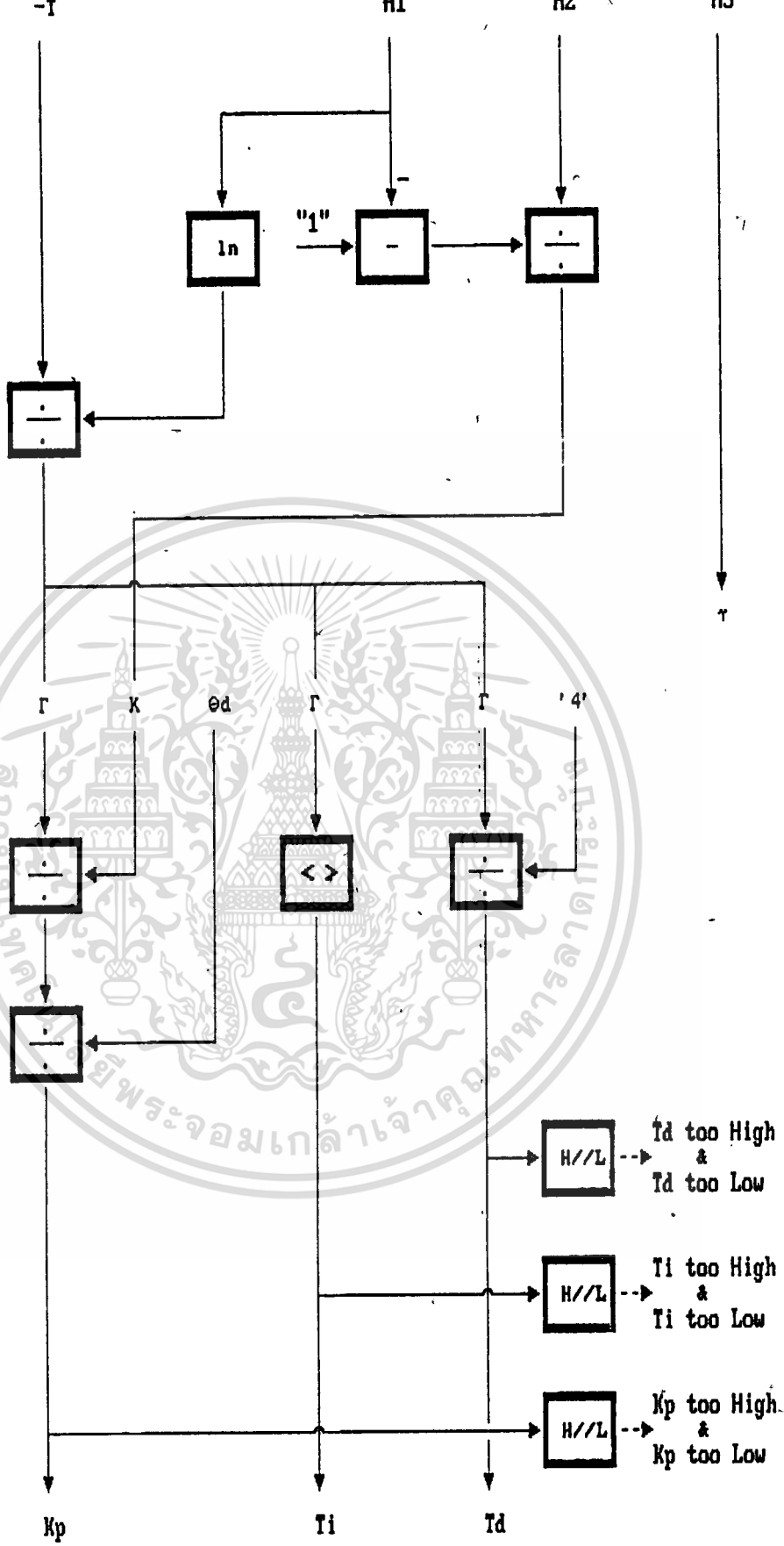
$$T_1 = \tau$$

$$T_d = \tau/4$$

จากสมการของตัวควบคุมที่สร้างขึ้นนำมาเขียนเป็น Signal Flow Diagram ได้ตามรูป 4.7 และนำไปเขียนเป็นโปรแกรมควบคุมระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ได้ตามภาคผนวก 6

หลังจากทำการสร้างโปรแกรมควบคุมระบบควบคุมแล้วจึงทำการทดสอบตัวควบคุมแบบปรับตัวเองด้วยนำเข้าไปใช้งานควบคุมตัวเพิ่มความร้อนตัวที่ 2



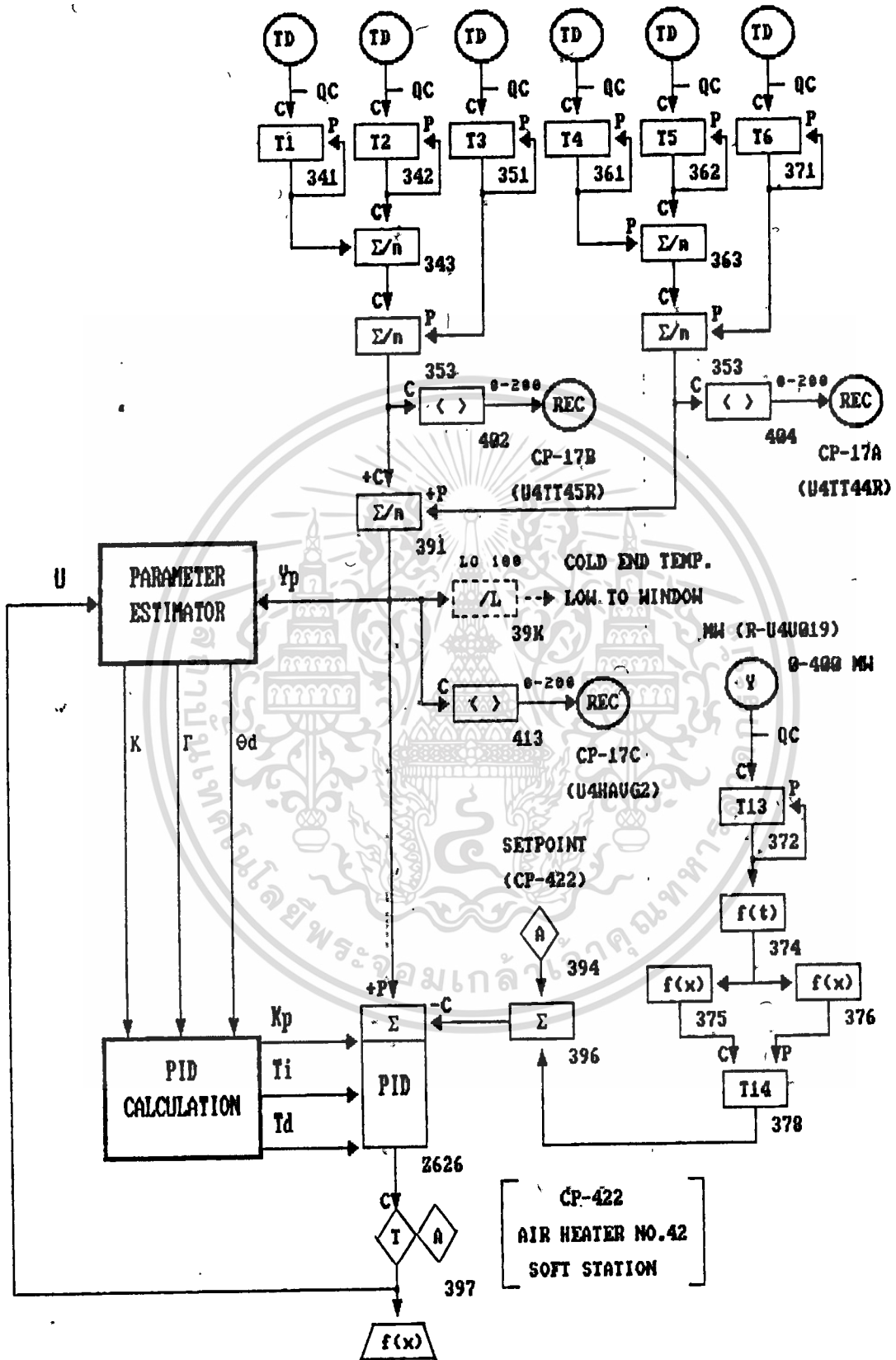


รูปที่ 4.7.2 Signal Flow Diagram ของส่วนระบบเอกลักษณ์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 4.18 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

GAS OUTLET TEMP. (0-200 °C) AIR INLET TEMP. (0-200 °C)

U4TD23 U4TD24 U4TD24 U4TD20 U4TD21 U4TD22



PREHEAT STEAM COIL 4mA = OPEN
 STEAM ADMISSION VALVE CRU-81 20mA = CLOSED

X1:U2Y001
Y1:U3P001

TIME CONSTANT
PROCESS GAIN

X2:U2U019
Y2:

GROSS GEN OUTPUT

ค่าเวลาคงตัว

โหลด

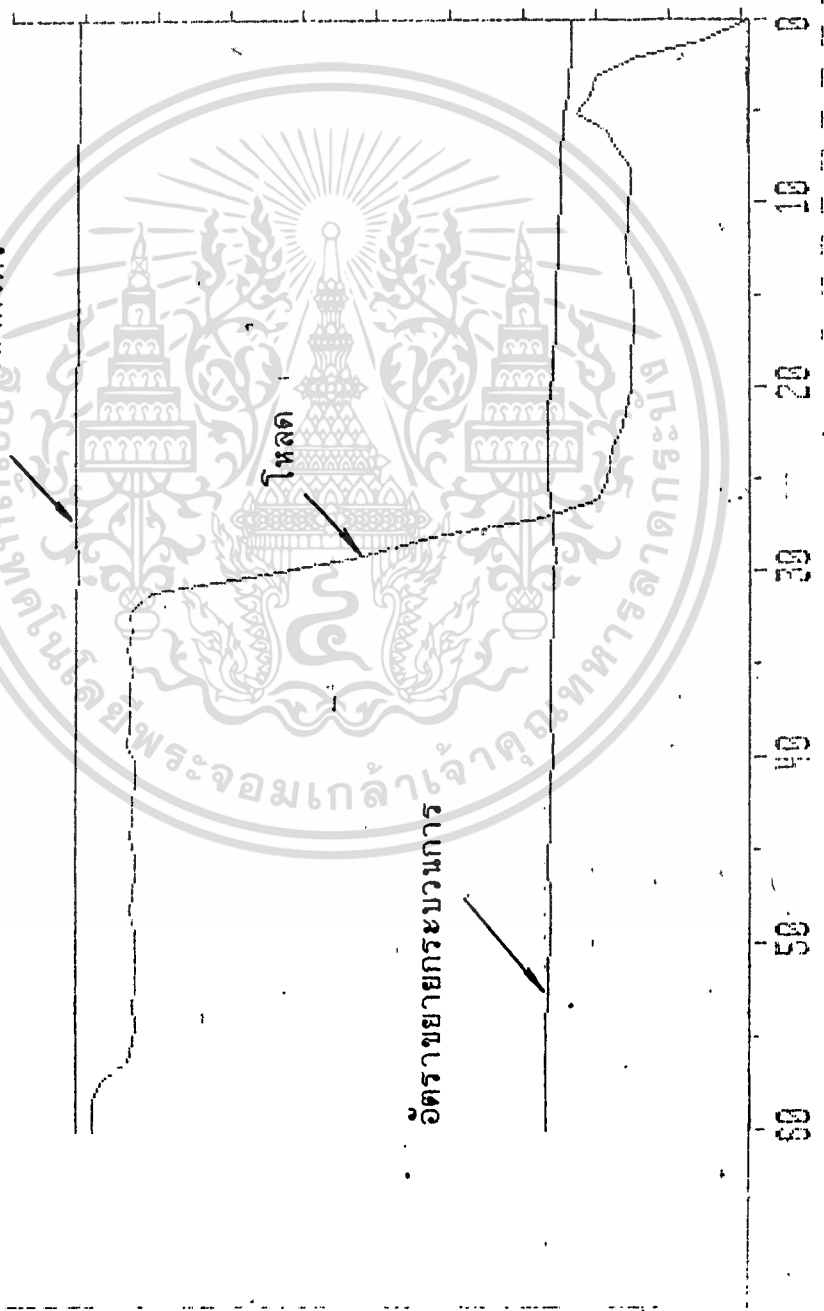
อัตราขยายกระบวนการ

0.82
0.42

X1= 0.82F SEC
Y1= 0.42F
X2= 175.103 MW
Y2= B

GROSS GEN = 175.1 MW

0.82
0.42



รูปที่ 4.9.1 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่โหลด 100%

X1:U3TCE1
Y1:U3PG01

TIME CONSTANT
PROCESS GAIN

X2:U3UB019
Y2:

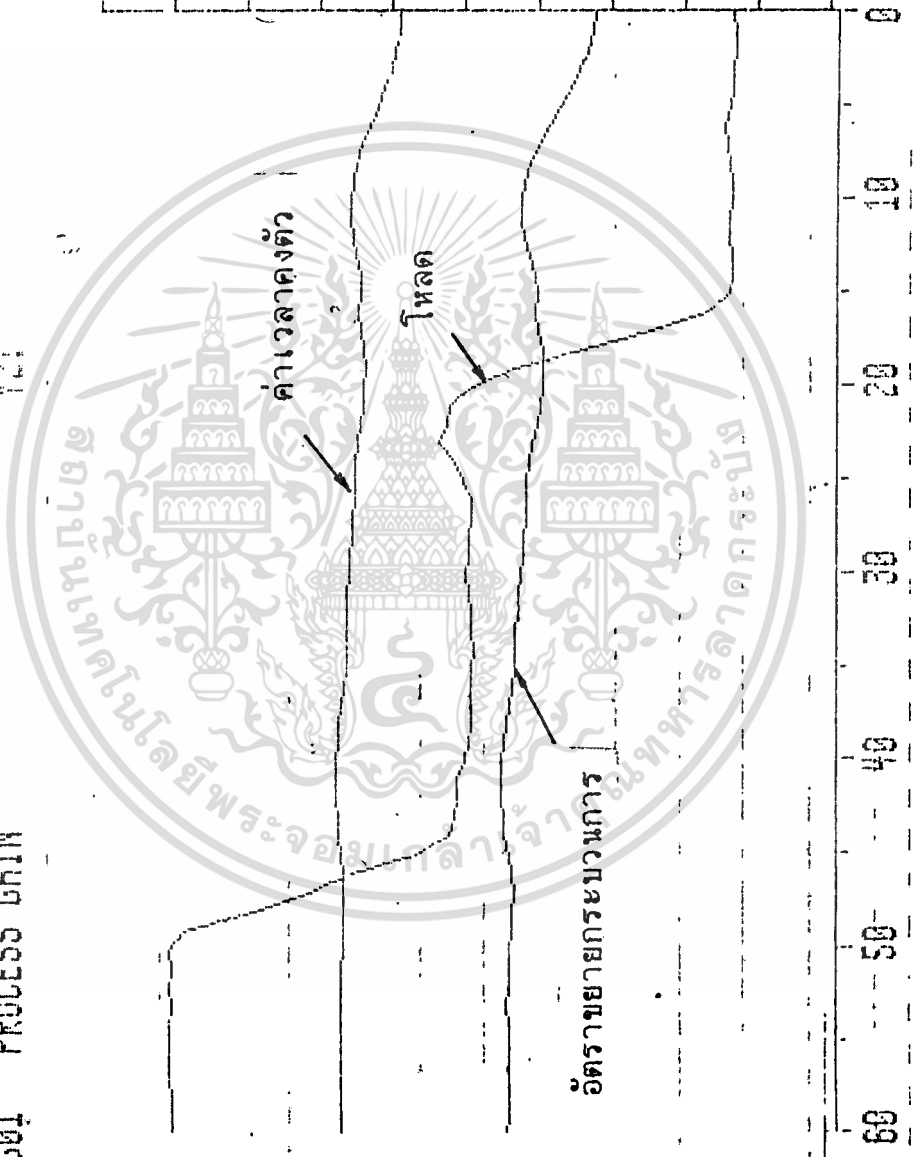
GROSS GEN OUTPUT

0.00
0.60

X1= 0.80F SEC
Y1= 0.40F
X2= 147.343 MW
Y2= 0

GROSS GEN = 147.3 MW

0.50
0.50



รูปที่ 4.9.2 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ไหลดเปลี่ยนจาก100%ไป75%

X1:U2T001
Y1:U3P001

TIME CONSTANT
PROCESS GAIN

X2:U6U019
Y2:

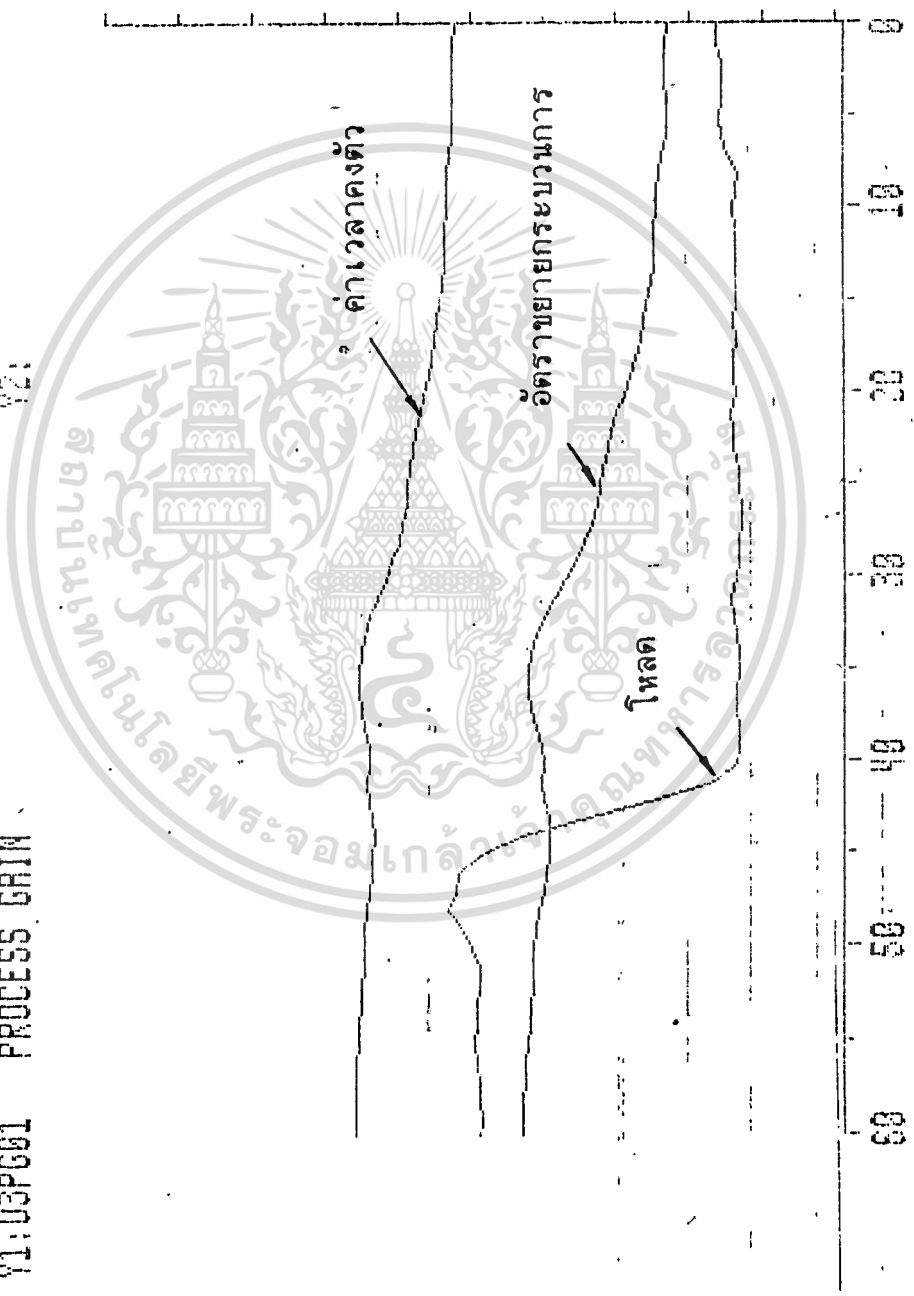
GROSS GEN OUTPUT

0.76F SEC
0.37F

X1= 0.76F SEC
Y1= 0.37F
X2= 152.681 MW
Y2= 0

GROSS GEN = 152.7 MW

0.76F SEC
0.37F



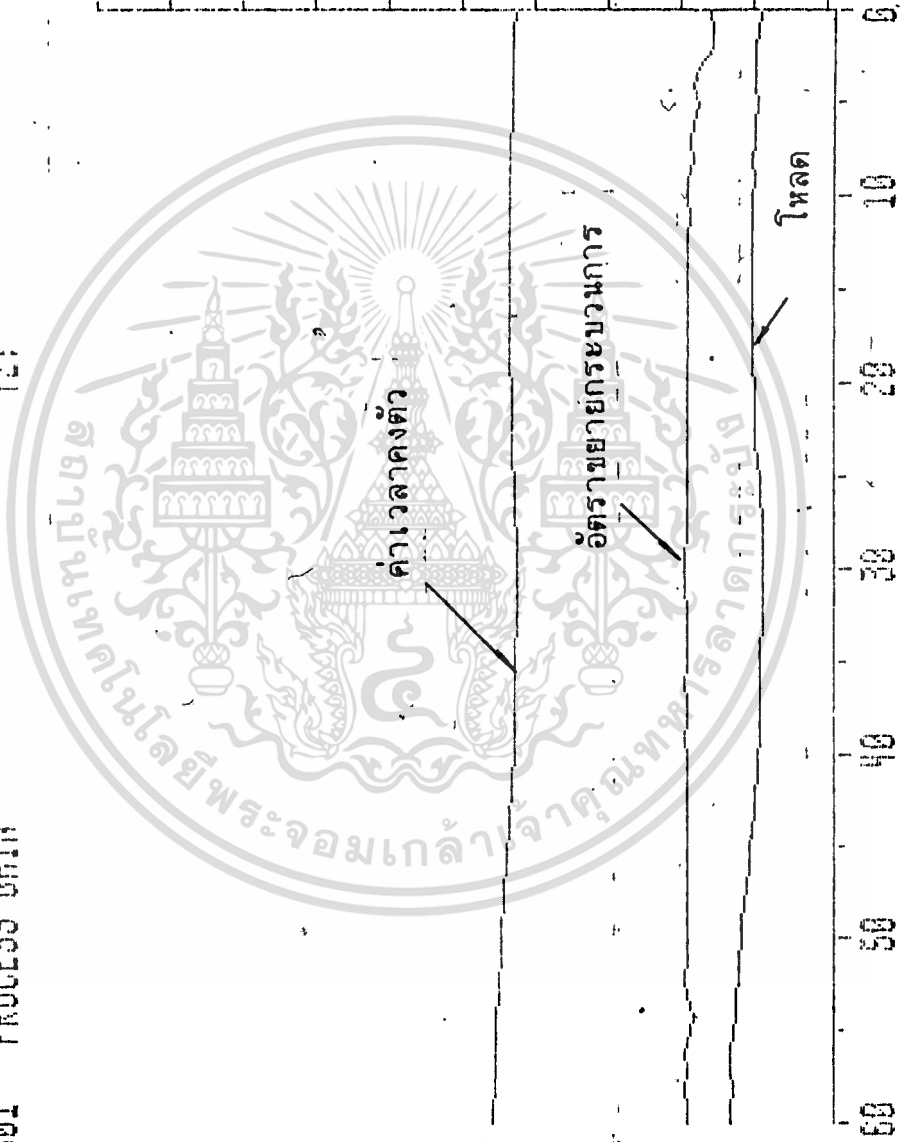
รูปที่ 4.9.3 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่โหลดเปลี่ยนแปลงจาก75%ไป50%

X1:U3T001
Y1:U3P001

TIME CONSTANT
PROCESS GAIN

Y2:U3U019
Y2:

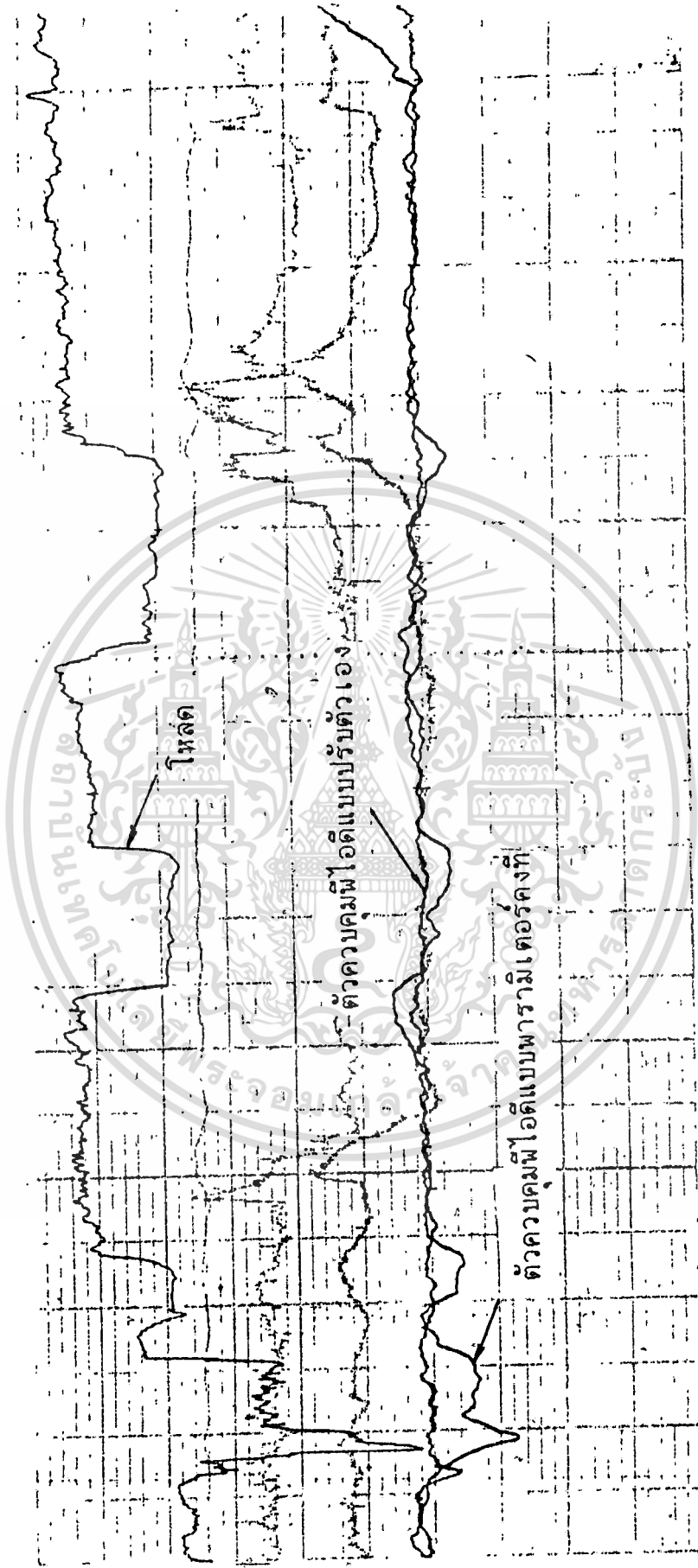
GROSS GEN OUTPUT



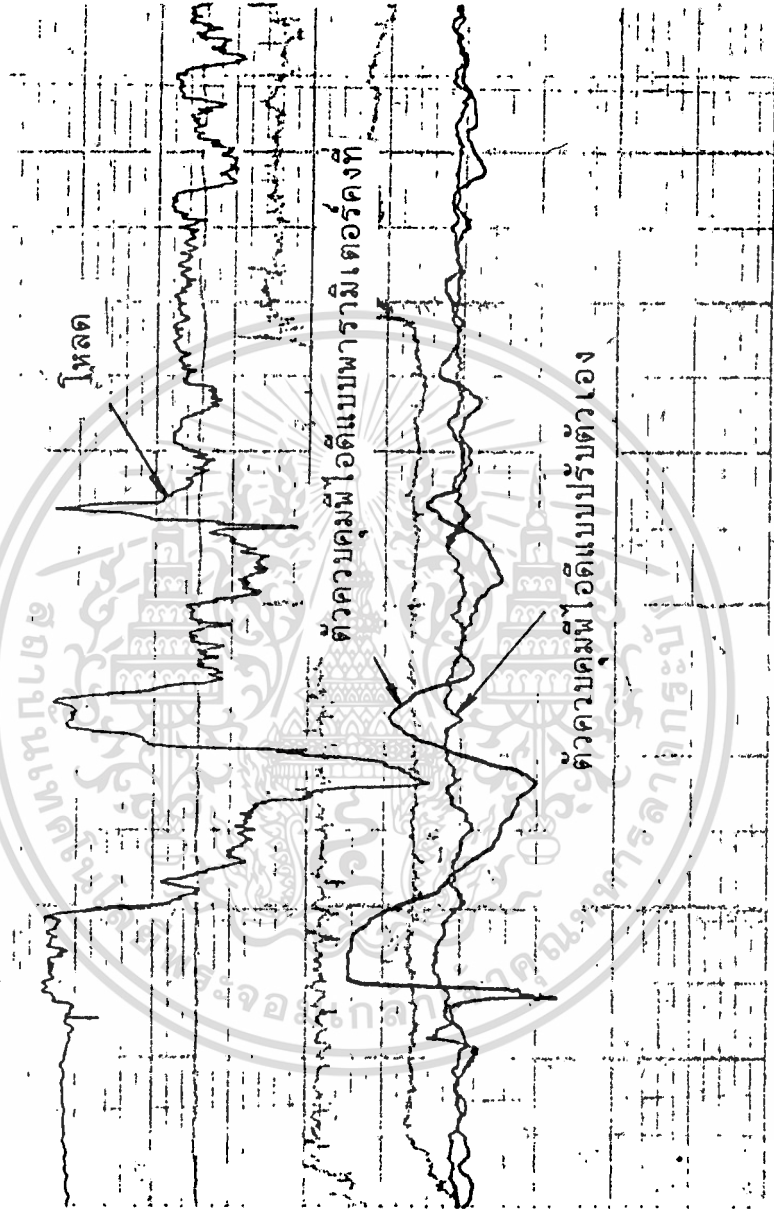
X1= 0.71F SEC
Y1= 0.33F
X2= 153.108 MM
Y2= B

GROSS GEN = 153.1 MM

รูปที่ 4.9.4 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่โหลด50%



รูปที่ 4.11.1 ผลการควบคุมแมลงที่ไหลตคงที่ 100%



รูปที่ 4.11.2 ผลการควบคุมขณะที่โหนดมีการเปลี่ยนแปลง

ของโรงจักรไฟฟ้าเครื่องที่ 3 เปรียบเทียบกับผลการควบคุมของตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศตัวที่ 1 ของโรงจักรไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ซึ่งควบคุมด้วยตัวควบคุม PID แบบพารามิเตอร์คงที่(ตามรูปที่ 4.8) ในการทดสอบได้กำหนดเงื่อนไขของการทดสอบคือ

1. ทดสอบหาค่า ค่าเวลาคงตัว และ อัตราขยายของกระบวนการที่ โหลด 50% , 75% และ 100%
2. การควบคุมตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศในขณะเดินเครื่องที่โหลดปกติ
3. การควบคุมตัวเพิ่มอุณหภูมิอากาศในขณะเดินเครื่องที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง

ผลการทดสอบ

จากการทดสอบในหัวข้อ 1. ทำให้ได้ผลการทดสอบตารางรูปที่ 4.9 และ ตารางในรูปที่ 4.10 การทดสอบที่ 2 และ 3 จะได้ผลตามรูปที่ 4.11 และ ตารางในรูปที่ 4.12

โหลด (%)	ค่าเวลาคงตัว (วินาที)	อัตราขยายกระบวนการ
50	71	0.33
75	82	0.43
100	85	0.45

รูปที่ 4.10 ตารางผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่โหลดต่างๆ

เงื่อนไขการทดสอบ	ตัวควบคุมแบบพารามิเตอร์คงที่ ความผิดพลาด (องศาเซลเซียส)	ตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง ความผิดพลาด (องศาเซลเซียส)
1. โหลด 100%	<0.2	<0.1
2. โหลดมีการเปลี่ยนแปลง	<1.2	<0.2

รูปที่ 4.12 ตารางผลการควบคุมที่เงื่อนไขต่างๆ

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในข้อ 1. แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการจริงการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขในการเดินเครื่องคือการเปลี่ยนขนาดโหลดจากที่โหลด 100% มาเป็น 50% จะทำให้อัตราขยายกระบวนการเปลี่ยนแปลง 17% และค่าเวลาดังตัวเปลี่ยนแปลงไป 17% เช่นกัน ในการทดลองข้อ 2., 3. แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบพารามิเตอร์คงที่ เมื่อกระบวนการมีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้สมรรถนะในการควบคุมลดลง แต่การใช้การควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวเองจะทำให้การควบคุมมีสมรรถนะในการควบคุมใกล้เคียงกันแม้ว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการทำงานและการออกแบบของตัวควบคุมแบบปรับตัวเองในบทที่ 2 ได้ศึกษาด้านทฤษฎีหลักการออกแบบและข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดต่างๆ ได้แก่ ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดเปรียบเทียบรูปแบบอ้างอิง มีข้อดีในแง่ที่ไม่ต้องมีการคำนวณในรูปของคณิตศาสตร์มากนัก แต่มีข้อเสียคือการใช้งานในกระบวนการที่มีการรบกวนจากระบบข้างเคียงตลอดเวลาจะทำให้สมรรถนะในการควบคุมไม่ดีและอาจเกิดออสซิลเลชันรบกวน ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดเล็งเล็คติงแม้จะมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดี แต่การที่มีการแปรปรวนของสัญญาณควบคุมสูงจะทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ขั้วลดลงและการเกิดออสซิลเลชันรบกวนจะเป็นไปได้ง่าย สำหรับตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดกำหนดโพล-ซีโร มีเสถียรภาพที่ดี และสามารถที่จะกำหนดสมรรถนะของการควบคุมได้ตามต้องการ แต่อัลกอริทึมมีลักษณะเป็นคอมพิวเตอร์มากกว่าทำให้ไม่สะดวกในพัฒนาบระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์ ดังนั้นตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิด PID จึงมีข้อได้เปรียบคือ เป็นตัวควบคุมที่ใช้งานทั่วไปมีเสถียรภาพที่ดี และสามารถเลือกใช้หลักการปรับแต่งเพื่อเป็นการกำหนดสมรรถนะของการควบคุม ในบทที่ 3 ได้ทำการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โดยพิจารณาเปรียบเทียบเพื่อหาค่า Forgetting Factor ที่เหมาะสมซึ่งก็ได้ค่าที่ต้องการคือ 0.9995 และเปรียบเทียบหลักการปรับแต่งแบบ ISE IAE ITAE Zeigler-Nichols และ Deadbeat ผลจากการจำลองได้การใช้วิธีการปรับแต่งแบบ Deadbeat จะมีสมรรถนะที่ดีทั้งในสถานการณ์รบกวนแบบต่างๆกันและการทดลองใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองด้วย Deadbeat ก็ได้สมรรถนะที่ดีกว่า

แบบ Zeigler-Nichols ในบทที่ 4 ได้ทดลองนำตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวเองชนิด Deadbeat ไปใช้ในการควบคุมกระบวนการจริงเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบพารามิเตอร์คงที่ ผลการทดลองพบว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวเองจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าทั้งในสภาพการเดินเครื่องปกติและถูกรบกวน

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

จากการวิจัยถึงแม้จะได้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองที่มีสมรรถนะดีตามที่ต้องการแต่ก็สามารถพัฒนาตัวควบคุมแบบปรับตัวเองในวิธีการอื่นๆ เช่นตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดเปรียบเทียบรูปแบบอ้างอิง จะสามารถนำหลักการของระบบผู้ชำนาญมาปรับปรุงทำให้การทำงานดีขึ้น หรือในกรณีที่ระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์มีการพัฒนาให้สามารถใช้ฟังก์ชันที่ยากขึ้นก็สามารถจะนำตัวควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดกำหนดโพล-ซีโร มาพัฒนาใช้งานก็จะทำให้ได้ระบบควบคุมที่มีสมรรถนะที่ดีกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] E.H. BRISTAL L, G.F. INALOGLU, J.F. STEADMAN: 'ADAPTIVE PROCESS BY PATTERN RECOGNITION' THE FOXBORO Co., MARCH, 1970
- [2] A.Y. ALLIDINA, AND F.M. HUGHES: 'GENERALISED SELF-TUNING CONTROLLER WITH POLE ASSIGNMENT', IEE PROC.D VOL.127, JANUARY 1980
- [3] K.J. ASTROM AND B. WITTENMARK: 'SELF-TUNING CONTROLLER BASED POLE-ZERO PLACEMENT', IEE PROC.D VOL.127, MAY 1980
- [4] D.W. CLARKE, A.J.F. HODGSON AND P.S. TUFFS: 'OFFSET PROBLEM AND K-INCREMENTAL PREDICTORS IN SELF-TUNING CONTROL' , IEE PROC.D VOL.130, SEPTEMBER 1983
- [5] ROBERT N. CLARK: 'ANOTHER REASON TO ESCHEW POLE-ZERO CANCELLATION', IEEE CONTROL SYSTEM MAGAZINE, APRIL 1988
- [6] C.C. HANG: 'THE CHOICE OF CONTROLLER ZEROS', IEEE CONTROL SYSTEM MAGAZINE, JANUARY 1989
- [7] F.G. SHINSKEY: 'ADAPTIVE pH CONTROLLER MONITORS NONLINEAR PROCESS', CONTROL ENGINEERING MAGAZINE, FEBURUARY 1974
- [8] C.G. POUNDFOOT, P.J. GAWTHROP AND O.L.R. JACOBS: 'SELF-TUNING PI CONTROL OF A pH NEUTRALISATION PROCESS', IEE PROC.D VOL.130, SEPTEMBER 1983
- [9] SALEM A.K., AI-ASSADI AND A.M. AI-CHALABI: 'OPTIMAL GAIN FOR PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE FEEDBACK', IEEE CONTROL SYSTEM MAGAZINE, DECEMBER 1987

- [10] C.L. SMITH: 'DIGITAL COMPUTER PROCESS CONTROL', INTEXT EDUCATION PUBLISHERS, 1972
- [11] A. KAYA. AND T.J. SCHEIB: 'TUNING OF PID CONTROLS OF DIFFERENT STRUCTURES', CONTROL ENGINEERING, JULY 1988
- [12] MINYUE FU, ANDRZEJ W. OLBROT AND MICHAEL P. POLIS: 'COMMENTS ON "OPTIMAL GAIN FOR PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE FEEDBACK"', IEEE CONTROL SYSTEM MAGAZINE, JANUARY 1989
- [13] JOHN P. GERRY: 'FIND OUT HOW GOOD THAT PID TUNING REALLY IS', CONTROL ENGINEERING, JULY 1988
- [14] B. PORTER, A.H. JONES and C.B. MCKEOWN: 'REAL-TIME EXPERT TUNERS FOR PI CONTROLLERS', IEE PROC.D, JULY 1987
- [15] JONATHAN LITT: 'AN EXPERT SYSTEM TO PERFORM ON-LINE CONTROLLER TUNING', IEEE CONTROL SYSTEM MAGAZINE, APRIL 1991
- [16] JOHN P. GERRY: 'A COMPARISON OF PID CONTROL ALGORITHMS', CONTROL ENGINEERING, MARCH 1987
- [17] PAUL S. BICKFORD: 'PROCESS TUNING A LOGICAL APPROACH', INTECH, SEPTEMBER 1988
- [18] HENRY M. MORRIS: 'HOW ADAPTIVE ARE ADAPTIVE PROCESS CONTROLLER', CONTROL ENGINEERING, MARCH 1987
- [19] NIKITA ANDREIEV: 'A NEW DIMENSION A SELF-TUNING CONTROLLER THAT CONTINUALLY OPTIMIZES PID CONSTANTS', CONTROL ENGINEERING, AUGUST 1981

- [20] 'EXPERT SELF-TUNING CONTROLLERS', TECHNICAL INFORMATION
YEWSERIES80 TI 1B4CO-01E, YOKOGAWA ELECTRIC CORPORATION,
JULY 1987
- [21] 'EXACT TUNING', 760 SERIES SINGLE-STATION MICRO CONTROLL-
ERS INSTRUCTION BOOK MI 018-843, FOXBORO COMPANY, 1985
- [22] 'SELF-TUNING CONTROLLERS', PNA-3 COMPACT CONTROLLER INS-
TRUCTION BOOK, FUJI ELECTRIC CORPORATION, 1990
- [23] C.C. HANG AND K.K. SIN: 'A COMPARATIVE PERFORMANCE STUDY
OF PID AUTO-TUNERS', IEEE CONTROL SYSTEM MAGAZINE, AUGUST
1991
- [24] S. LJUNG AND L. LJUNG: 'ERROR PROPAGATION PROPERTIES OF
RECURSIVE LEAST SQUARES ADAPTATION ALGORITHMS', IFAC 9th
TRIENNIAL WORLD CONGRESS BUDAPEST, HUNGARY, 1984
- [25] L. GERENCSEI, I. GYONGY AND GY. MICHALETZKY: 'CONTINUOUS-
TIME RECURSIVE MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD. A NEW APPROACH
TO LJUNG'S SCHEME', IFAC 9th TRIENNIAL WORLD CONGRESS
BUDAPEST, HUNGARY, 1984
- [26] A. OSORIO CORDERO AND D.Q. MAYNE: 'DETERMINISTIC CONVER-
GENCE OF A SELF-TUNING REGULATOR WITH VARIABLE FORGET-
TING FACTOR', IEE PROC. D VOL. 128 No.1, JANUARY 1981
- [27] C.C. HANG, K.J. ASTROM AND W.K. WHO: 'REFINEMENTS OF
THE ZIEGLER-NICHOLS TUNING FORMULA', IEE PROC. D VOL.
138, MARCH 1991
- [28] PRADEEP B. DESHPANDE AND RAYMOND H. ASH: 'ELEMENTS OF

COMPUTER PROCESS CONTROL', INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA, 1981

[29] 'ADVANCE CONTROL COURSE', WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, 1990

[30] M.A. KEYES AND A. KAYA: 'SELF-TUNING AND SELF-ADAPTIVE CONTROL OF A HEATING PROCESS BY DISTRIBUTED MICROPROCESSORS', 8th IFAC SYMPOSIUM ON IDENTIFICATION AND SYSTEM PARAMETER ESTIMATION, BEIJING, P.R. CHINA, AUGUST 1988

[31] K.J. ASTROM AND B. WITTENMARK: 'ADAPTIVE CONTROL', ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, 1989

[32] P.J. GAWTHROP: 'HYBRID SELF-TUNING CONTROL', IEE PROC. D VOL.127, SEPTEMBER 1980

[33] A.L. DEXTER: 'SELF-TUNING CONTROL ALGORITHM FOR SINGLE-CHIP MICROCOMPUTER IMPLEMENTATION', IEE PROC.D VOL.130, SEPTEMBER 1983

[34] 'OPEN-LOOP GAIN COMPENSATION FOR CLOSED-LOOP POLE-ASSIGNMENT SELF TUNERS', CORRESPONDENCE IEE PROC.D VOL. 134, NOVEMBER 1987

[35] S.C. PUTHENPURA AND J.F. MACGREGOR: 'POLE-ZERO PLACEMENT CONTROLLERS AND SELF-TUNING REGULATORS WITH BETTER SET-POINT TRACKING', IEE PROC.D VOL.134, JANUARY 1987

[36] K.J. ASTROM AND B. WITTENMARK: 'COMPUTER CONTROLLED SYSTEMS THEORY AND DESIGN', PRENTICE-HALL, 1984

- [37] IOAN DORE LANDAU: ' SYSTEM IDENTIFICATION AND CONTROL DESIGN ', PRENTICE-HALL, 1990
- [38] R.H. MIDDLETON AND G.C. GOODWIN: ' DIGITAL CONTROL AND ESTIMATION ', PRENTICE-HALL, 1990
- [39] C.J. HARRIS AND S.A. BILLINGS: ' SELF-TUNING AND ADAPTIVE CONTROL ', PETER PEREGRINUS Ltd., 1981
- [40] 'CONTROL ALGORITHMS', DISTRIBUTED PROCESSING UNIT AND MAC-4500 PROCESS CONTROLLER, WESTINGHOUSE ELECTRIC, JULY 1988
- [41] โยธิน เปรมปราณีรัชต์ และ ไพฑูรย์ เดชะหงษ์สุวรรณ: 'การปรับปรุงสมรรถนะในการติดตามค่าเป้าหมายโดยใช้ตัวควบคุมแบบกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโรว์', การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 13, พ.ศ. 2533

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. โยธิน เปรมปราณีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือด้านคำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมทุกท่านที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์ และการอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการวิจัย ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และโรงจักรไฟฟ้าพระนครใต้ที่ได้เอื้อเฟื้อระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บิดามารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจ แก่ผู้เขียนจนกระทั่งการวิจัยทำได้สำเร็จลุล่วง

ภาคผนวก

- ภาคผนวก 1. เป็นโปรแกรมจำลองกระบวนการที่มีพารามิเตอร์คงที่
- ภาคผนวก 2. เป็นโปรแกรมจำลองกระบวนการที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามเวลา
- ภาคผนวก 3. เป็นโปรแกรมจำลองตัวควบคุมแบบขนานที่มีพารามิเตอร์คงที่
- ภาคผนวก 4. เป็นโปรแกรมจำลองการระบุเอกลักษณ์ของระบบแบบ CLS
- ภาคผนวก 5. เป็นโปรแกรมจำลองตัวควบคุมแบบปรับตัวเอง
- ภาคผนวก 6. เป็นโปรแกรมตัวควบคุมแบบปรับตัวเองของระบบควบคุมแบบกระจายศูนย์



ภาคผนวก 1.

Model File: a:main5

Date: 1 / 1 / 1980

Time: 2 : 2

Timing: 0.500000 ,DELTA ; 500.0000 ,RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

	BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz:	0 ,	0.0000	500.0000	; Time
Y1:	80 ,	0.0000	5.0000	;
Y2:	14 ,	-0.4000000	-1.6000	; LOAD DISTUR.
Y3:	72 ,	-1.0000	1.0000	;
Y4:	85 ,	0.0000	2.0000	;

0.0000	1 PLS			;SETPOINT
0.0000				
0.0000				
1.0000	2 SUM	1	-72	
1.0000	3 GAI	2		
50.0000	4 PID	3		
0.0000				
1.0000				
0.0000				
0.0000				
1.0000	5 SUM	-3	4	
10.000E+03	6 MUL	5	97	
5.0000	7 PID	3		
1.0000				
1.000E+03	8 FIO	3		
0.0000				
	9 SUM	7	-8	
	10 MUL	9	98	
	11 SUM	29	6	10
1.0000	12. GAI	11		
	13 SUM	12	14	30
		31	32	
10.0000	14 PLS			;LOAD DISTUR.
20.0000				
0.5000000				
100.0000	15 DEL	13		;DEAD TIME
1.0000				
0.0000				

ผ1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.0000	16 FIO	15			;TIME LAG
5.0000					
0.0000					
1.0000	17 FIO	16			;TIME LAG
20.0000					
0.0000					
1.0000	18 FIO	17			;PROCESS VARIABLE
15.0000					
0.0000					
	19 ABS	2			
0.0000	20 INT	19			
	21 MUL	19	19		
	22 MUL	19	23		
0.0150000	23 GAI	24			
	24 TIM				
0.0000	25 INT	21			
	29 MUL	3	96		
150.0000	30 PLS				
160.0000					
0.5000000					
250.0000	31 PLS				
260.0000					
0.5000000					
350.0000	32 PLS				
360.0000					
0.5000000					
0.0000	50 PLS				
500.0000					
0.0000					
0.0000					
110.0000	52 PLS				
10.0000					
1.0000	54 CON				
10.0000	56 PLS				
50.0000					
1.0000					
0.5000000	58 CON				
	60 MUL	13	74		
	62 MUL	60	80		
	64 SUM	62	-70		
0.0000	68 INT	64			
	70 MUL	68	74		
100.0000	72 DEL	68			
2.0000					
0.0000					
	74 DIV	54	76		
	76 SUM	52	58	95	
	80 SUM	50	58	93	

ณ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.0000	81 CON		
1.0000	82 LIM	74	
20.0000			
0.5000000	83 LIM	80	
5.0000			
	84 MUL	81	83
	85 DIV	82	84
10.0000	86 CON		
	87 DIV	86	82
20.0000	88 CON		
	89 DIV	82	88
	91 TIM		
0.0050000	92 GAI	91	
0.0000	93 LIM	92	
5.0000			
0.0000	94 GAI	91	
0.5000000	95 LIM	94	
0.5000000			
0.1000000	96 LIM	85	
2.0000			
0.1000000	97 LIM	87	
2.0000			
0.1000000	98 LIM	89	
1.0000			



พ1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 2.

Model File: b:vg.the
 Date: 5 / 13 / 1992
 Time: 14 : 0
 Timing: 0.2000000 ,DELTA ; 500.0000 ,RANGE
 PlotBlocks and Scales:
 Format:

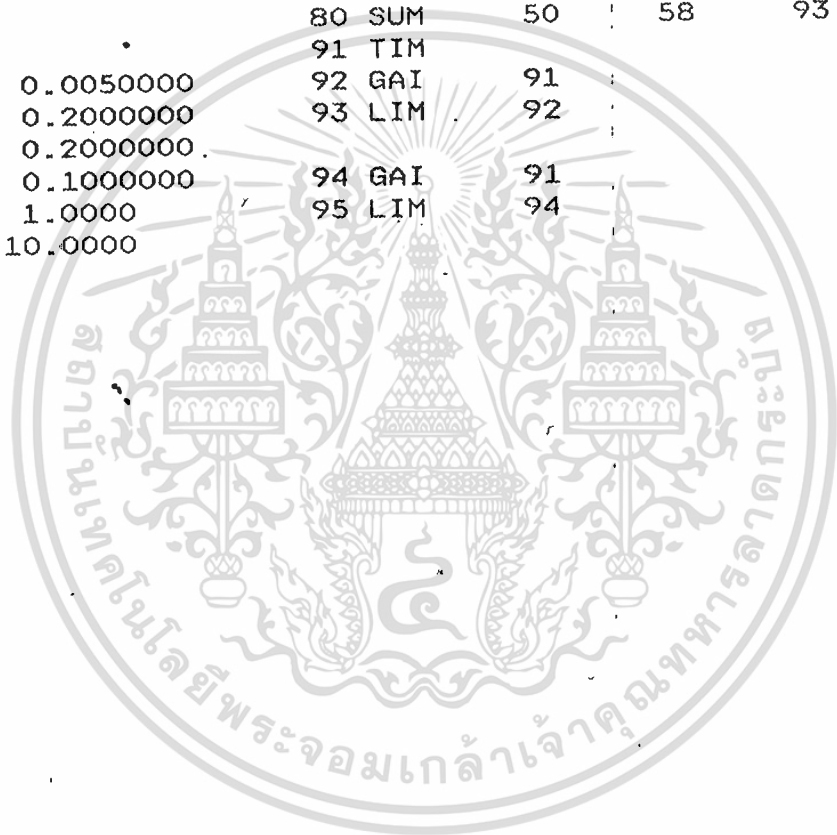
BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000	500.0000	Time
Y1: 76 ,	5.0000	25.0000	;
Y2: ,			;
Y3: 72 ,	-0.5000000	0.5000000	;
Y4: 40 ,	-1.0000	4.0000	;
0.0000	1 PLS		;SETPOINT
0.0000			
0.0000			
1.0000	2 SUM	1 -72	
1.0000	3 GAI	2	
2.8000	4 PID	3	
2.0000			
0.2000000			
0.0000			
0.0000			
1.0000	5 SUM	-3 4	
1.0000	6 GAI	5	
1.000E+03	7 PID	3	
0.0000			
0.1000000			
0.0000			
0.0000			
1.0000	8 FIO	3	
1.000E+03			
0.0000			
0.0000	9 SUM	7 -8	
0.0000	10 GAI	9	
1.0000	11 SUM	16 6 10	
1.0000	12 GAI	11	
10.0000	13 SUM	12 40	
13.0000	14 PLS		;LOAD DISTUR.
0.5000000			

	19 ABS	2	
0.0000	20 INT	19	
	21 MUL	19	19
	22 MUL	19	23
0.0150000	23 GAI	24	
	24 TIM		
0.0000	25 INT	21	
0.0000	26 INT	22	
100.0000	30 PLS		
103.0000			
0.5000000			
150.0000	31 PLS		
153.0000			
0.5000000			
200.0000	32 PLS		
203.0000			
0.5000000			
250.0000	33 PLS		
253.0000			
0.5000000			
300.0000	34 PLS		
303.0000			
0.5000000			
350.0000	35 PLS		
353.0000			
0.5000000			
	40 SUM	14	30
		32	33
		35	34
0.0000	50 PLS		
500.0000			
0.8000000			
0.0000	52 PLS		
500.0000			
9.0000			
1.0000	54 CON		
10.0000	56 PLS		
50.0000			
1.0000			
0.0000	58 CON		
	60 MUL	13	74
	62 MUL	60	80
	64 SUM	62	-70
0.0000	68 INT	64	
	70 MUL	68	74

ผ2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100.0000	72 DEL	68		
3.0000				
0.0000				
	74 DIV	54	76	
	76 SUM	52	58	95
	80 SUM	50	58	93
	91 TIM			
0.0050000	92 GAI	91		
0.2000000	93 LIM	92		
0.2000000				
0.1000000	94 GAI	91		
1.0000	95 LIM	94		
10.0000				



ผ2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 3.

Model File: b:main4

Date: 5 / 6 / 1992

Time: 11 : 30

Timing: 0.500000 ,DELTA ; 500.0000 ,RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

	BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz:	0	0.0000	500.0000.	: Time
Y1:	80	0.0000	5.0000	:
Y2:	14	-0.400000	1.6000	: LOAD DISTUR.
Y3:	72	-1.0000	1.0000	:
Y4:	12	-5.0000	5.0000	:

0.0000 1 PLS ;SETPOINT
 0.0000
 0.0000

0.5000000 2 SUM 1 -72
 1.0000 3 GAI 2
 21.7400 4 PID 3

0.0000
 1.0000
 0.0000
 0.0000

0.0000 5 SUM -3 4
 0.0000 6 GAI 5
 1.0000 7 PID 3

1.000E+03
 0.0000
 0.1000000
 0.0000
 0.0000

1.0000 8 FIO 3
 1.000E+03
 0.0000

0.0000 9 SUM 7 -8
 0.0000 10 GAI 9

1.0000 11 SUM 3 6 10
 13 GAI 11
 13 SUM 12 14 30
 31 32

10.0000 14 PLS ;LOAD DISTUR.
 20.0000
 0.5000000

100.0000 15 DEL 13 ;DEAD TIME
 1.0000
 0.0000

1.0000 16 FIO 15 ;TIME LAG
 5.0000
 0.0000

1.0000 17 FIO 16 ;TIME LAG
 20.0000
 0.0000

1.0000 18 FIO 17 ;PROCESS VARIABLE
 15.0000
 0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 4.

Model File: b:sys5.the
 Date: 5 / 13 / 1992
 Time: 14 : 29
 Timing: 1.0000 ,DELTA ; 3.000E+03 ,RANGE
 PlotBlocks and Scales:
 Format:

	BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz:	0 ,	0.0000 ,	3.000E+03 ;	Time
Y1:	1 ,	-1.0000 ,	1.0000 ;	
Y2:	4 ,	-1.0000 ,	1.0000 ;	
Y3:	404 ,	-2.0000 ,	8.0000 ;	
Y4:	408 ,	0.0000 ,	2.0000 ;	

0.5000000	1	GAI	11		
100.0000	2	DEL	1		
3.0000					
0.0000					
0.8000000	3	FIO	2		
10.0000					
0.0000					
1.0000	4	FIO	3		
5.0000					
0.0000					
0.0100000	8	TIM			
	9	GAI	8		
	10	SIN	9		
	11	SUM	10	104	
20.0000	100	DEL	4		
0.0000					
0.0000					
20.0000	102	DEL	1		
3.0000					
0.0000					
1.0000	104	CON			
20.0000	106	DEL	104		
0.0000					
0.0000					
	108	MUL	100	378	
	112	MUL	102	380	
	116	MUL	106	382	
	120	MUL	100	384	
	124	MUL	102	386	
	128	MUL	106	388	
	132	MUL	100	390	
	136	MUL	102	392	
	140	MUL	106	394	
	144	SUM	108	112	116
	146	SUM	120	124	128
	148	SUM	132	136	140

ผ4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	160	MUL	100	378	
	164	MUL	100	380	
	168	MUL	100	382	
	172	MUL	102	384	
	176	MUL	102	386	
	180	MUL	102	388	
	184	MUL	106	390	
	188	MUL	106	392	
	192	MUL	106	394	
	196	SUM	160	172	184
	198	SUM	164	176	188
	200	SUM	168	180	192
	210	MUL	100	196	
	214	MUL	102	198	
	218	MUL	106	200	
	222	SUM	104	210	214
			218		
	240	MUL	100	288	
	244	MUL	102	290	
	248	MUL	106	292	
	252	SUM	100	-240	-244
			-248		
	260	DIV	252	222	
	270	MUL	144	260	
	274	MUL	146	260	
	278	MUL	148	260	
	282	SUM	270	288	
	284	SUM	274	290	
	286	SUM	278	292	
-0.5000000	287	LIM	282		
100.0000					
20.0000	288	DEL	287		
0.0000					
0.0000					
-0.5000000	289	LIM	284		
100.0000					
20.0000	290	DEL	289		
0.0000					
0.0000					
-0.5000000	291	LIM	286		
100.0000					
20.0000	292	DEL	291		
0.0000					
0.0000					
	300	DIV	196	222	
	304	DIV	198	222	
	308	DIV	200	222	
	312	MUL	144	300	
	314	MUL	146	300	
	316	MUL	148	300	
	318	MUL	144	304	
	320	MUL	146	304	
	322	MUL	148	304	

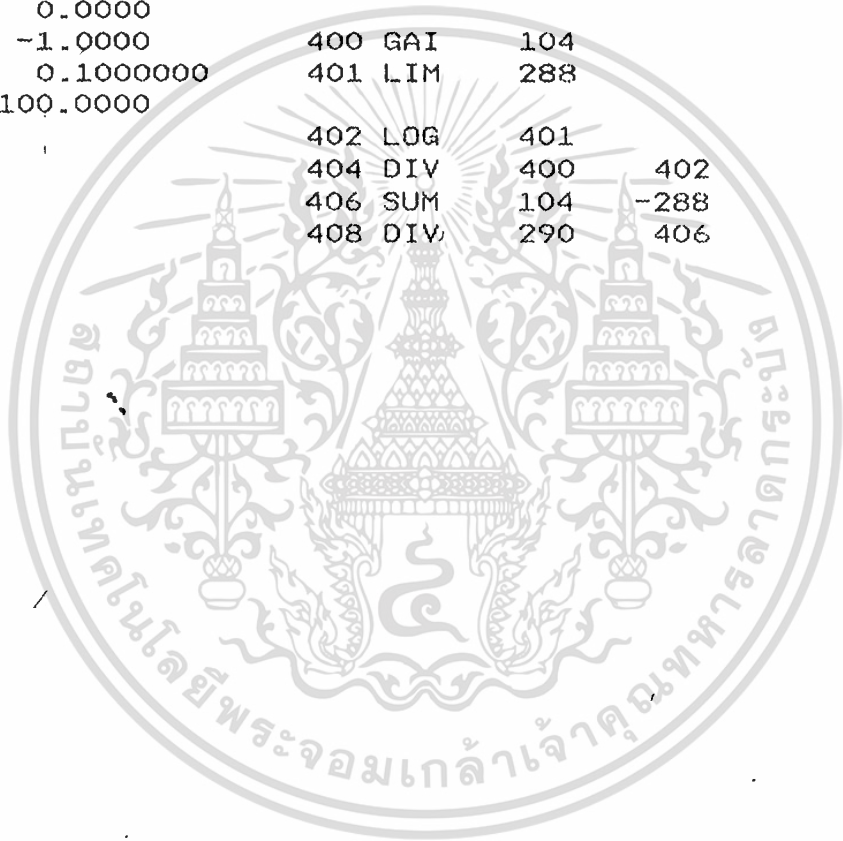
พ4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	324 MUL	144	308
	326 MUL	146	308
	328 MUL	148	308
	347 SUM	-312	378
	348 SUM	-314	384
	349 SUM	-316	390
	350 SUM	-318	380
	351 SUM	-320	386
	352 SUM	-322	392
	353 SUM	-324	382
	354 SUM	-326	388
	355 SUM	-328	394
0.9995000.	357 CON		
	358 DIV	104	357
	360 MUL	347	358
	362 MUL	350	358
	364 MUL	353	358
	366 MUL	348	358
	368 MUL	351	358
	370 MUL	354	358
	372 MUL	349	358
	374 MUL	352	358
	376 MUL	355	358
-0.5000000	377 LIM	360	
100.0000			
20.0000	378 DEL	377	
0.0000			
0.0000			
-0.5000000	379 LIM	362	
100.0000			
20.0000	380 DEL	379	
0.0000			
0.0000			
-0.5000000	381 LIM	364	
100.0000			
20.0000	382 DEL	381	
0.0000			
0.0000			
-0.5000000	383 LIM	366	
100.0000			
20.0000	384 DEL	383	
0.0000			
0.0000			
-0.5000000	385 LIM	368	
100.0000			
20.0000	386 DEL	385	
0.0000			
0.0000			
-0.5000000	387 LIM	370	
100.0000			
20.0000	388 DEL	387	
0.0000			
0.0000			

:forgeting

-0.5000000	389 LIM	372	
100.0000			
20.0000	390 DEL	389	
0.0000			
0.0000			
-0.5000000	391 LIM	374	
100.0000			
20.0000	392 DEL	391	
0.0000			
0.0000			
-0.5000000	393 LIM	376	
100.0000			
20.0000	394 DEL	393	
0.0000			
0.0000			
-1.0000	400 GAI	104	
0.1000000	401 LIM	288	
100.0000			
	402 LOG	401	
	404 DIV	400	402
	406 SUM	104	-288
	408 DIV	290	406



ภาคผนวก 5.

Model File: b:self.the
 Date: 5 / 13 / 1992
 Time: 14 : 37
 Timing: 0.500000 ,DELTA ; 500.0000 ,RANGE
 PlotBlocks and Scales:
 Format:

	BlockNo.	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz:	0	0.0000	500.0000	Time
Y1:	80	0.0000	5.0000	;
Y2:	40	-1.0000	4.0000	;
Y3:	72	-1.0000	1.0000	;
Y4:	85	0.0000	10.0000	;

0.0000	1 PLS			;SETPOINT
0.0000				
0.0000				
	2 SUM	1	-72	
1.0000	3 GAI	2		
1.0000	4 PID	3		
10.0000				
0.0000				
1.0000				
0.0000				
0.0000				
	5 SUM	-3	4	
	6 MUL	5	97	
1.0000	7 PID	3		
10.000E+03				
10.0000				
1.0000				
0.0000				
0.0000				
1.0000	8 FIO	3		
1.000E+03				
0.0000				
	9 SUM	7	-8	
	10 MUL	9	98	
	11 SUM	29	6	10
1.0000	12 GAI	11		
	13 SUM	12	40	

10.0000	14 PLS				;LOAD DISTUR.
13.0000					
0.5000000					
100.0000	15 DEL	13			;DEAD TIME
1.0000					
0.0000					
1.0000	16 FIO	15			;TIME LAG
5.0000					
0.0000					
1.0000	17 FIO	16			;TIME LAG
20.0000					
0.0000					
1.0000	18 FIO	17			;PROCESS VARIABLE
15.0000					
0.0000					
0.0000	19 ABS	2			
	20 INT	19			
	21 MUL	19	19		
	22 MUL	19	23		
0.0150000	23 GAI	24			
	24 TIM				
0.0000	25 INT	21			
0.0000	26 INT	22			
	29 MUL	3	96		
100.0000	30 PLS				
103.0000					
0.5000000					
150.0000	31 PLS				
153.0000					
0.5000000					
200.0000	32 PLS				
203.0000					
0.5000000					
250.0000	33 PLS				
253.0000					
0.5000000					
300.0000	34 PLS				
303.0000					
0.5000000					
350.0000	35 PLS				
353.0000					
0.5000000					
	40 SUM	14	30	31	
		32	33	34	
		35			
0.0000	50 PLS				
500.0000					
0.9000000					

0.0000	52 PLS			
500.0000				
10.0000				
1.0000	54 CON			
10.0000	56 PLS			
50.0000				
1.0000				
0.0000	58 CON			
	60 MUL	13	74	
	62 MUL	60	80	
	64 SUM	62	-70	
0.0000	68 INT	64		
	70 MUL	68	74	
100.0000	72 DEL	68		
2.0000				
0.0000				
	74 DIV	54	76	
	76 SUM	52	58	95
	80 SUM	50	58	93
3.0000	81 CON			
1.0000	82 LIM	76		
25.0000				
0.5000000	83 LIM	80		
5.0000				
	84 MUL	81	83	
	85 DIV	82	84	
10.0000	86 CON			
	87 DIV	86	82	
20.0000	88 CON			
	89 DIV	82	88	
	91 TIM			
0.0050000	92 GAI	91		
0.1000000	93 LIM	92		
5.0000				
0.0000	94 GAI	91		
0.0000	95 LIM	94		
0.0000				
0.1000000	96 LIM	85		
2.0000				
0.1000000	97 LIM	87		
2.0000				
0.1000000	98 LIM	89		
1.0000				

ภาคผนวก 6.

***** ALGORITMICS *****

```

PIDVLM/100, (TUNABLE), IN1 = 0002X213, HILM = US$H9 , LOLM = US$HMS2, TRIN = 1002X223, IMOD = US$HMAN ,
DIAG = 32, GAIN = 0.650000, RSET = 330.000000, DERG = 0.800000, RATE = 50.000000,
OUT = US$H8
GAINB1/495, (TUNABLE), IN1 = 0002X391, DIAG = 3, GAIN = 0.005000, BIAS = 0.000000, OUT = US$X01
GAINB1/496, (TUNABLE), IN1 = 0002X395, DIAG = 3, GAIN = 0.010000, BIAS = 0.000000, OUT = US$X02
PVSPSL1/ 1, (TUNABLE), PVAR = US$1125, STPT = 0002X011, ADDR = 112, IN11 = 3, ST11 = US$LI1M
PVSPSL1/ 2, (TUNABLE), PVAR = US$1125, STPT = 0002X043, ADDR = 123, IN11 = 3, ST11 = US$LI2M
PVSPSL1/ 3, (TUNABLE), PVAR = US$11261, STPT = 0002X051, ADDR = 60, IN11 = 3, ST11 = US$LI16
PVSPSL1/ 4, (TUNABLE), PVAR = US$11261, STPT = 0002X081, ADDR = 96, IN11 = 3, ST11 = US$LI16
PVSPSL1/ 5, (TUNABLE), PVAR = US$11261, STPT = US$GREUE2, ADDR = 64, IN11 = 3, ST11 = US$LI1R
PVSPSL1/ 6, (TUNABLE), PVAR = US$11231, STPT = 0002X211, ADDR = 32, IN11 = 3, ST11 = US$LI1S
PVSPSL1/ 7, (TUNABLE), PVAR = US$11231, STPT = 0002X211, ADDR = 48, IN11 = 3, ST11 = US$LI2S
GAINB1/ 8, (TUNABLE), IN1 = US$1123, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = US$1123T
GAINB1/ 9, (TUNABLE), IN1 = US$1124, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = US$1124T
GAINB1/10, (TUNABLE), IN1 = US$1125, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = US$1125T
GAINB1/11, (TUNABLE), IN1 = US$1126, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = US$1126T
GAINB1/12, (TUNABLE), IN1 = US$1127, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = US$1127T
GAINB1/13, (TUNABLE), IN1 = S002X457, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = US$1127T
PIDVGR/500, (TUNABLE), IN1 = US$X02 , GAIN = US$B00 , RSET = US$E00 , DERG = US$D01 , RATE = US$E02
TRIN = US$B03 , IMOD = US$D09 , DIAG = 22, HILM = 100.000000, LOLM = -100.000000,
OUT = US$B05
PIDVGR/501, (TUNABLE), IN1 = US$E05 , GAIN = US$B00 , RSET = US$E00 , DERG = US$D01 , RATE = US$E02
TRIN = US$B09 , IMOD = US$B09 , DIAG = 22, HILM = 100.000000, LOLM = -100.000000,
OUT = 0002Z501
PIDVGR/502, (TUNABLE), IN1 = 0002Z501, GAIN = US$B00 , RSET = US$E00 , DERG = US$D01 , RATE = US$E02
TRIN = US$B09 , IMOD = US$B09 , DIAG = 22, HILM = 100.000000, LOLM = -100.000000,
OUT = 0002Z502
SUM4W/503, (TUNABLE), IN1 = US$X02 , IN2 = US$E05 , IN3 = 0002Z501, IN4 = 0002Z502, DIAS = 5,
WT1 = 1.000000, WT2 = -0.000000, WT3 = 0.000000, WT4 = 0.000000, OUT = 0002Z503
MUL T6B/510, (TUNABLE), IN1 = US$P11 , IN2 = US$X01 , DIAS = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z510
MUL T6B/511, (TUNABLE), IN1 = US$P12 , IN2 = 0002Z503, DIAS = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z511
MUL T6B/512, (TUNABLE), IN1 = US$P13 , IN2 = US$E01 , DIAS = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z512
MUL T6B/513, (TUNABLE), IN1 = US$P31 , IN2 = US$X01 , DIAS = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z513
MUL T6B/514, (TUNABLE), IN1 = US$P32 , IN2 = 0002Z503, DIAS = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z514
MUL T6B/515, (TUNABLE), IN1 = US$P33 , IN2 = US$E01 , DIAS = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z515
MUL T6B/516, (TUNABLE), IN1 = US$P31 , IN2 = US$X01 , DIAS = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z516
MUL T6B/517, (TUNABLE), IN1 = US$P32 , IN2 = 0002Z503, DIAS = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z517
MUL T6B/518, (TUNABLE), IN1 = US$P33 , IN2 = US$E01 , DIAS = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z518
SUM4W/519, (TUNABLE), IN1 = 0002Z510, IN2 = 0002Z511, IN3 = 0002Z512, IN4 = 0002Z513, DIAS = 5,
WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000, WT3 = 0.500000, WT4 = 0.500000, OUT = 0002Z519
SUM4W/520, (TUNABLE), IN1 = 0002Z513, IN2 = 0002Z514, IN3 = 0002Z515, IN4 = 0002Z516, DIAS = 5,
WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000, WT3 = 0.500000, WT4 = 0.500000, OUT = 0002Z520
SUM4W/521, (TUNABLE), IN1 = 0002Z516, IN2 = 0002Z517, IN3 = 0002Z518, IN4 = 0002Z519, DIAS = 5,
WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000, WT3 = 0.500000, WT4 = 0.500000, OUT = 0002Z521

```

MUL T6B/525, (TUNABLE), IN1 = U3P11, IN2 = U3X01, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z525

MUL T6B/526, (TUNABLE), IN1 = U3P12, IN2 = U3X01, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z526

MUL T6B/527, (TUNABLE), IN1 = U3P13, IN2 = U3X01, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z527

MUL T6B/528, (TUNABLE), IN1 = U3P21, IN2 = 0002Z503, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z528

MUL T6B/529, (TUNABLE), IN1 = U3P22, IN2 = 0002Z503, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z529

MUL T6B/530, (TUNABLE), IN1 = U3P23, IN2 = 0002Z503, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z530

MUL T6B/531, (TUNABLE), IN1 = U3P31, IN2 = U3B01, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z531

MUL T6B/532, (TUNABLE), IN1 = U3P32, IN2 = U3B01, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z532

MUL T6B/533, (TUNABLE), IN1 = U3P33, IN2 = U3B01, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z533

SUM4W/534, (TUNABLE), IN1 = 0002Z525, IN2 = 0002Z525, IN3 = 0002Z528, IN4 = 0002Z531, DIAG = 5, WT1 = 0.500000, WT2 = 0.500000, WT3 = 1.000000, WT4 = 1.000000, OUT = 0002Z534

SUM4W/535, (TUNABLE), IN1 = 0002Z526, IN2 = 0002Z526, IN3 = 0002Z529, IN4 = 0002Z532, DIAG = 5, WT1 = 0.500000, WT2 = 0.500000, WT3 = 1.000000, WT4 = 1.000000, OUT = 0002Z535

SUM4W/536, (TUNABLE), IN1 = 0002Z527, IN2 = 0002Z527, IN3 = 0002Z530, IN4 = 0002Z533, DIAG = 5, WT1 = 0.500000, WT2 = 0.500000, WT3 = 1.000000, WT4 = 1.000000, OUT = 0002Z536

MUL T6B/540, (TUNABLE), IN1 = U3X01, IN2 = 0002Z534, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z540

MUL T6B/541, (TUNABLE), IN1 = 0002Z503, IN2 = 0002Z535, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z541

MUL T6B/542, (TUNABLE), IN1 = U3B01, IN2 = 0002Z536, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z542

SUM4W/543, (TUNABLE), IN1 = 0002Z540, IN2 = 0002Z541, IN3 = 0002Z542, IN4 = U3B01, DIAG = 5, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000, WT3 = 1.000000, WT4 = 1.000000, OUT = 0002Z543

MUL T6B/545, (TUNABLE), IN1 = U3H01, IN2 = U3X01, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z545

MUL T6B/546, (TUNABLE), IN1 = U3H02, IN2 = 0002Z503, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z546

MUL T6B/547, (TUNABLE), IN1 = U3H03, IN2 = U3B01, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z547

SUM4W/548, (TUNABLE), IN1 = U3X01, IN2 = U3B01, IN3 = 0002Z545, IN4 = 0002Z547, DIAG = 5, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000, WT3 = 1.000000, WT4 = 1.000000, OUT = 0002Z548

DIVIDE6B/549, (TUNABLE), IN1 = 0002Z548, IN2 = 0002Z543, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z549

MUL T6B/550, (TUNABLE), IN1 = 0002Z519, IN2 = 0002Z549, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z550

MUL T6B/551, (TUNABLE), IN1 = 0002Z520, IN2 = 0002Z549, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z551

MUL T6B/552, (TUNABLE), IN1 = 0002Z521, IN2 = 0002Z549, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z552

SUM4W/553, (TUNABLE), IN1 = 0002Z550, IN2 = 0002Z550, IN3 = U3H01, IN4 = U3H01, DIAG = 5, WT1 = 1.000000, WT2 = 0.000000, WT3 = 1.000000, WT4 = 0.000000, OUT = 0002Z553

TRANSF/630, IN1 = U3B07, IN2 = 0002Z553, FLAG = U3D07, OUT = U3H01

SUM4W/554, (TUNABLE), IN1 = 0002Z551, IN2 = 0002Z551, IN3 = U3H02, IN4 = U3H02, DIAG = 5, WT1 = 1.000000, WT2 = 0.000000, WT3 = 1.000000, WT4 = 0.000000, OUT = 0002Z554

TRANSF/631, IN1 = U3B07, IN2 = 0002Z554, FLAG = U3D07, OUT = U3H02

SUM4W/555, (TUNABLE), IN1 = 0002Z552, IN2 = 0002Z552, IN3 = U3H03, IN4 = U3H03, DIAG = 5, WT1 = 1.000000, WT2 = 0.000000, WT3 = 1.000000, WT4 = 0.000000, OUT = 0002Z555

TRANSF/632, IH1 = U3B07, IH2 = 0002Z555, FLAG = U3007, OUT = U3H03
 DIVIDE68/556, (TUNABLE), IH1 = 0002Z534, IH2 = 0002Z543, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z556
 DIVIDE68/557, (TUNABLE), IH1 = 0002Z535, IH2 = 0002Z543, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z557
 DIVIDE68/558, (TUNABLE), IH1 = 0002Z536, IH2 = 0002Z543, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z558
 MULT68/560, (TUNABLE), IH1 = 0002Z519, IH2 = 0002Z556, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z560
 MULT68/561, (TUNABLE), IH1 = 0002Z520, IH2 = 0002Z556, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z561
 MULT68/562, (TUNABLE), IH1 = 0002Z521, IH2 = 0002Z556, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z562
 MULT68/563, (TUNABLE), IH1 = 0002Z519, IH2 = 0002Z557, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z563
 MULT68/564, (TUNABLE), IH1 = 0002Z520, IH2 = 0002Z557, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z564
 MULT68/565, (TUNABLE), IH1 = 0002Z521, IH2 = 0002Z557, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z565
 MULT68/566, (TUNABLE), IH1 = 0002Z519, IH2 = 0002Z558, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z566
 MULT68/567, (TUNABLE), IH1 = 0002Z520, IH2 = 0002Z558, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z567
 MULT68/568, (TUNABLE), IH1 = 0002Z521, IH2 = 0002Z558, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z568
 DIVIDE68/569, (TUNABLE), IH1 = U3B01, IH2 = U3B03, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z569
 DELTAN/570, (TUNABLE), IH1 = U3P11, IH2 = 0002Z560, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 7.000000, --
 OUT = 0002Z570
 DELTAN/571, (TUNABLE), IH1 = U3P12, IH2 = 0002Z563, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z571
 DELTAN/572, (TUNABLE), IH1 = U3P13, IH2 = 0002Z566, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z572
 DELTAN/573, (TUNABLE), IH1 = U3P21, IH2 = 0002Z561, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z573
 DELTAN/574, (TUNABLE), IH1 = U3P22, IH2 = 0002Z564, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z574
 DELTAN/575, (TUNABLE), IH1 = U3P23, IH2 = 0002Z567, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z575
 DELTAN/576, (TUNABLE), IH1 = U3P31, IH2 = 0002Z562, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z576
 DELTAN/577, (TUNABLE), IH1 = U3P32, IH2 = 0002Z565, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z577
 DELTAN/578, (TUNABLE), IH1 = U3P33, IH2 = 0002Z568, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z578
 MULT68/579, (TUNABLE), IH1 = 0002Z570, IH2 = 0002Z569, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z579
 TRANSF/583, IH1 = U3B07, IH2 = 0002Z579, FLAG = U3007, OUT = U3P11
 MULT68/580, (TUNABLE), IH1 = 0002Z571, IH2 = 0002Z569, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z580
 TRANSF/634, IH1 = U3B07, IH2 = 0002Z580, FLAG = U3007, OUT = U3P12
 MULT68/581, (TUNABLE), IH1 = 0002Z572, IH2 = 0002Z569, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z581
 TRANSF/635, IH1 = U3B07, IH2 = 0002Z581, FLAG = U3007, OUT = U3P13
 MULT68/582, (TUNABLE), IH1 = 0002Z573, IH2 = 0002Z569, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z582

```

TRANSF/636, IN1 = U3B07 , IN2 = 0002Z582, FLAG = U3D07 , OUT = U3P21
<TUNABLE>, IN1 = 0002Z574, IN2 = 0002Z569, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z583
TRANSF/637, IN1 = U3B07 , IN2 = 0002Z583, FLAG = U3D07 , OUT = U3P22
<TUNABLE>, IN1 = 0002Z575, IN2 = 0002Z569, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z584
TRANSF/638, IN1 = U3B07 , IN2 = 0002Z584, FLAG = U3D07 , OUT = U3P23
<TUNABLE>, IN1 = 0002Z576, IN2 = 0002Z569, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z585
TRANSF/639, IN1 = U3B07 , IN2 = 0002Z585, FLAG = U3D07 , OUT = U3P31
<TUNABLE>, IN1 = 0002Z577, IN2 = 0002Z569, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z586
TRANSF/643, IN1 = U3B07 , IN2 = 0002Z586, FLAG = U3D07 , OUT = U3P32
<TUNABLE>, IN1 = 0002Z578, IN2 = 0002Z569, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = -0.000000,
OUT = 0002Z587
TRANSF/644, IN1 = U3B07 , IN2 = 0002Z587, FLAG = U3D07 , OUT = U3P33
<TUNABLE>, IN1 = U3H01 , DIAG = 8, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z590
NLOG/590, <TUNABLE>, IN1 = U3S01 , IN2 = U3H01 , DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
DELTA/591, OUT = 0002Z591
DIVIDE/592, <TUNABLE>, IN1 = U3H02 , IN2 = 0002Z591, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z592
TRANSF/645, IN1 = U3B07 , IN2 = 0002Z592, FLAG = U3D07 , OUT = U3P601
DIVIDE/593, <TUNABLE>, IN1 = U3R01 , IN2 = 0002Z590, DIAG = 3, GAIN = -1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z593
TRANSF/646, IN1 = U3B07 , IN2 = 0002Z593, FLAG = U3D07 , OUT = U3TC01
<TUNABLE>, IN1 = U3X01 , IN2 = U3B14 , DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
DELTA/595, OUT = 0002Z595
MULT/6/596, <TUNABLE>, IN1 = 0002Z595, IN2 = 0002Z606, DIAG = 3, GAIN = 100.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z596
INTEG/6/597, <TUNABLE>, IN1 = 0002Z596, GAIN = U3B01 , RSET = U3B13 , TRIN = U3B09
TMOD = U3D09 , DIAG = 22, HILM = 10.000000, LOIM = -10.000000, OUT = 0002Z597
MULT/6/598, <TUNABLE>, IN1 = 0002Z606, IN2 = 0002Z606, DIAG = 3, GAIN = 100.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z598
INTEG/6/599, <TUNABLE>, IN1 = 0002Z598, GAIN = U3B01 , RSET = U3B13 , TRIN = U3B09
TMOD = U3C09 , DIAG = 22, HILM = 10.000000, LOIM = -10.000000, OUT = 0002Z599
DIVIDE/6/600, <TUNABLE>, IN1 = 0002Z597, IN2 = 0002Z599, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z600
SUM/4/601, <TUNABLE>, IN1 = U3100 , IN2 = 0002Z600, IN3 = 0002Z600, IN4 = 0002Z600, DIAG = 5,
WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000, WT3 = 0.000000, WT4 = 0.000000, OUT = U3TD01
DELTA/602, <TUNABLE>, IN1 = 0002X391, IN2 = 0002Z640, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
DELTA/603, <TUNABLE>, IN1 = U3100 , IN2 = 0002Z641, DIAG = 3, WT1 = 1.000000, WT2 = 1.000000,
HILOMTR/604, <TUNABLE>, IN1 = 0002Z603, DIAG = 5, HISP = 0.100000, HIDE = 0.000000, LO5P = -0.100000,
LOG6 = 0.000000, OUT = U3D01
DIVIDE/6/605, <TUNABLE>, IN1 = 0002Z602, IN2 = 0002Z603, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z605
TRANSF/606, IN1 = 0002Z605, IN2 = 0002Z606, FLAG = U3D01 , OUT = 0002Z606
GAIN/1/640, <TUNABLE>, IN1 = 0002X391, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z640
GAIN/1/641, <TUNABLE>, IN1 = U3100 , DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z641
DIVIDE/6/607, <TUNABLE>, IN1 = U3B01 , IN2 = U3TC01 , DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z607
MULT/6/608, <TUNABLE>, IN1 = U3X02 , IN2 = 0002Z607, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z608
MULT/6/609, <TUNABLE>, IN1 = 0002Z608, IN2 = U3P601 , DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
OUT = 0002Z609

```

DELTA/610, (TUNABLE), IN1 = 0002Z609, IN2 = 0002Z612, DIAG = 3, WTI = 1.000000, MT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z610
 INTEGVR/611, (TUNABLE), IN1 = 0002Z610, GAIN = U3801, RSET = U3801, TRIN = U3809
 , DIAG = 22, HILM = 100.000000, LOLM = 0.000000, OUT = U3815
 , TMOD = U3D09
 MULT6E/612, (TUNABLE), IN1 = U3815, IN2 = 0002Z607, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z612
 PIDVGR/613, (TUNABLE), IN1 = U3815, GAIN = U3800, RSET = U3800, DEBG = U3804, RATE = U3806
 , TRIN = U3809, TMOD = U3D09, DIAG = 22, HILM = 100.000000, LOLM = -100.000000,
 OUT = 0002Z613
 GAJNSI/647, (TUNABLE), IN1 = 0002Z613, DIAG = 3, GAIN = 0.001000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z647
 PIDVGR/614, (TUNABLE), IN1 = 0002Z647, GAIN = U3801, RSET = U3800, DEBG = U3TDC1, RATE = U3802
 , TRIN = U3809, TMOD = U3D09, DIAG = 22, HILM = 100.000000, LOLM = -100.000000,
 OUT = 0002Z614
 GAJNSI/648, (TUNABLE), IN1 = 0002Z614, DIAG = 3, GAIN = 0.001000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z648
 PIDVGR/615, (TUNABLE), IN1 = 0002Z648, GAIN = U3801, RSET = U3800, DEBG = U3TDC1, RATE = U3802
 , TRIN = U3809, TMOD = U3D09, DIAG = 22, HILM = 100.000000, LOLM = -100.000000,
 OUT = 0002Z615
 SUM4K/616, (TUNABLE), IN1 = U3815, IN2 = 0002Z613, IN3 = 0002Z614, IN4 = 0002Z615, DIAG = 5,
 WTI = 1.000000, MT2 = 0.050000, MT3 = 0.050000, MT4 = 0.017000, OUT = U3814
 GAJNSI/619, (TUNABLE), IN1 = U3P601, DIAG = 3, GAIN = 45.000000, BIAS = 0.000000, OUT = 0002Z619
 DELTA/617, (TUNABLE), IN1 = U3815, IN2 = 0002Z616, DIAG = 3, WTI = 1.000000, MT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z617
 GAJNSI/620, (TUNABLE), IN1 = U3TDC1, DIAG = 3, GAIN = 100.000000, BIAS = 0.000000, OUT = U3T101
 MULT6E/621, (TUNABLE), IN1 = U3P601, IN2 = U3DH01, DIAG = -3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = 0002Z621
 DIVIDE6B/622, (TUNABLE), IN1 = U3T101, IN2 = 0002Z619, DIAG = 3, GAIN = 1.000000, BIAS = 0.000000,
 OUT = U3KP01
 GAJNSI/623, (TUNABLE), IN1 = U3T101, DIAG = 3, GAIN = 0.500000, BIAS = 0.000000, OUT = U3TR01
 DELTA/625, (TUNABLE), IN1 = 0002X396, IN2 = 0002X391, DIAG = 3, WTI = 0.500000, MT2 = 0.500000,
 OUT = 0002Z625
 DELTA/626, (TUNABLE), IN1 = 0002Z625, IN2 = 0002Z617, DIAG = 3, WTI = 1.000000, MT2 = 1.000000,
 OUT = 0002Z626
 PIDVGR/627, (TUNABLE), IN1 = 0002Z625, GAIN = U3KP01, RSET = U3T101, DEBG = U3TR01, RATE = U3810
 , TRIN = 1002X397, TMOD = U3A3R1M, DIAG = 22, HILM = 100.000000, LOLM = 0.000000,
 OUT = 0002Z627