

วิธีการหาลักษณะสมบัติในระบบวงรอบปิดสำหรับระบบกลที่มีความยืดหยุ่น



นาย ภาณุวัฒน์ วรวงศ์ทัต

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539


ISBN 974-636-389-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 1738 0650

**A CLOSED-LOOP IDENTIFICATION METHOD
FOR FLEXIBLE MECHANICAL SYSTEMS**

MR. PANUWAT WORAWONGTAD



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-636-389-1

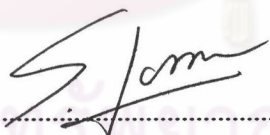
หัวข้อวิทยานิพนธ์ : วิธีการหาลักษณะสมบัติในระบบวงรอบปิดสำหรับระบบกลที่มีความยืดหยุ่น
โดย : นาย ภาณุวัฒน์ วรวงศ์ทัต
ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

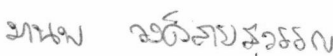

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ภาณุวัฒน์ วรวงศ์ทัต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. โคทม อารียา)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ)



พิมพ์ต้นฉบับบทความวิจัยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า : วิธีการหาลักษณะสมบัติในระบบวงรอบปิดสำหรับระบบกลที่มีความยืดหยุ่น
(A CLOSED-LOOP IDENTIFICATION METHOD FOR FLEXIBLE MECHANICAL SYSTEMS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 143 หน้า. ISBN 974-636-389-1

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงวิธีการหาลักษณะสมบัติของระบบ 2 มวล ที่เหมาะสมในระบบวงรอบปิดเปรียบเทียบกับวิธีการในระบบวงรอบเปิดเพื่อที่จะทราบถึงแบบจำลองของระบบ วิธีการที่นำเสนอเป็นการบูรณาการกระบวนการหาลักษณะสมบัติและกระบวนการควบคุมเข้าด้วยกันโดยไม่ต้องตัดแปรตัวควบคุมของระบบ รวมทั้งได้ศึกษาถึงเงื่อนไขสำคัญสำหรับสัญญาณค่าน้ำที่ใช้ในการประมวลผลที่ให้ความแม่นยำในการหาแบบจำลองที่ดีของระบบ เราสามารถยืนยันผลการศึกษาเชิงวิเคราะห์และข้อสรุปในการหาลักษณะสมบัติของระบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้โดยอาศัยผลการจำลองและผลการทดสอบกับระบบจริงที่สร้างขึ้นโดยใช้การจำลองโหนด ผลของการจำลองการทำงานและผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่ากราฟอัตราขยายและมุมเฟสของฟังก์ชัน โอนย้ายของระบบที่หาได้มีค่าใกล้เคียงกับระบบจริงโดยเฉพาะในย่านความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิผลของการหาลักษณะสมบัติของระบบที่ได้นำเสนอ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C815578 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD: 2-MASS SYSTEM / CLOSED-LOOP IDENTIFICATION / PI CONTROLLER / LOAD SIMULATOR
PANUWAT WORAWONGTAD : A CLOSED-LOOP IDENTIFICATION METHOD FOR FLEXIBLE
MECHANICAL SYSTEMS.

THESIS ADVISOR : DR. SOMBOON SANGWONGWANICH 143 pp. ISBN 974-636-389-1

In this thesis, a closed-loop identification method for a 2-mass system has been proposed and studied in comparison with an open loop identification method. Using the proposed method, we can blend identification and control processes together without any modification of the controller. We have investigated and pointed out several conditions for input signal design which are important to achieve a good model of the 2-mass system. Analytical discussion and conclusion made in this thesis are confirmed not only by simulation but also by experiments which are carried out on a real system using a load simulator. From simulation and experimental results, we can conclude that the proposed identification method is feasible and Bode plots of the identified transfer function fit well with those of the real 2-mass system, especially in the vicinity of the resonant frequency.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2539.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการศิษย์ก้นกุฏิ โดยมีอาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและดูแลเอาใจใส่อย่างดียิ่ง รวมทั้ง ท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้วิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน ตลอดจนบุคลากรในห้องวิจัย ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่าน ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษา และเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญเรื่อง	ช
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
2 แบบจำลองของระบบ 2 มวล	4
3 โครงสร้างของระบบที่มีตัวควบคุมแบบมีความอิสระอันดับ 2	7
4 การหาลักษณะสมบัติของระบบ	14
5 การจำลองระบบ 2 มวล โดยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์	20
6 เงื่อนไขสำคัญในการหาลักษณะสมบัติของระบบและผลการทดสอบ	37
7 การหาลักษณะสมบัติของระบบวงรอบปิดและผลการทดสอบ	79
8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	107
รายการอ้างอิง	110
ภาคผนวก	112
ประวัติผู้เขียน	127

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก.1 ผลการหาลักษณะสมบัติของมอเตอร์แบบเซอร์โวในการทดสอบแบบที่ ก.1	115
ก.2 ผลการหาลักษณะสมบัติของมอเตอร์แบบเซอร์โวในการทดสอบแบบที่ ก.2	116
ก.3 ผลการหาลักษณะสมบัติของมอเตอร์แบบเซอร์โวในการทดสอบแบบที่ ก.3	117
ก.4 ผลการหาลักษณะสมบัติของมอเตอร์แบบเซอร์โวในการทดสอบแบบที่ ก.4	118
ข.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบและการจำลองการทำงานของระบบ 2 มวลที่มี ความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz	121
ข.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบและการจำลองการทำงานของระบบ 2 มวลที่มี ความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz	121
ค.1 ลำดับการสร้างสัญญาณ PRBS ของรีจิสเตอร์เลื่อนข้อมูลแบบ 4 เซลล์ เมื่อมีการป้อน กลับจากเซลล์ที่ 3 และ 4	123
ค.2 โครงสร้างการป้อนกลับสำหรับการสร้างสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 2$ ถึง $n = 10$	124


 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบ 2 มวล	4
2.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบ 2 มวล	5
2.3 กราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบ $P(s)$ เมื่อ $J_m = 8 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$, $D_m = 8 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2/\text{s}$, $J_L = 1.2 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$, $D_L = 2 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2/\text{s}$ และ $K_{sh} = 0.02 \text{ Nm/rad}$	6
3.1 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมแบบมีความอิสระอันดับ 2 แบบที่ 1	7
3.2 แผนภาพแสดงคุณสมบัติด้านเสถียรภาพของระบบควบคุม	8
3.3 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมแบบมีความอิสระอันดับ 2 แบบที่ 2	9
3.4 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมแบบมีความอิสระอันดับ 2 แบบที่ 3	9
3.5 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมแบบมีความอิสระอันดับ 2 แบบที่ 4	10
3.6 บล็อกไดอะแกรมรวมของระบบกับตัวควบคุมแบบมีความอิสระอันดับ 2	10
3.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงค่า $R(s)$	11
3.8 บล็อกไดอะแกรมแสดงค่า $R(s)$ ในกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ PI.....	11
3.9 กราฟอัตราขยายและมุมเฟสของค่าพารามิเตอร์ $R(s)$ เมื่อ $J_m = 8 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$, $D_m = 8 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2/\text{s}$, $J_L = 1.2 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$, $D_L = 2 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2/\text{s}$ $K_{sh} = 0.02 \text{ Nm/rad}$, $K_p = 0.05$ และ $T_I = 1/8$	13
4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการหาลักษณะสมบัติของระบบวงรอบเปิด	15
4.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการหาลักษณะสมบัติของระบบ $P(s)$ โดยตรงในระบบที่มี โครงสร้างแบบวงรอบปิด.....	15
4.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการหาลักษณะสมบัติของระบบวงรอบปิด	16
4.4 โครงสร้างของแบบจำลอง 'ARX'	17
5.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานขององค์ประกอบหลักในการหาลักษณะสมบัติของ ระบบ 2 มวล	21
5.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบ 2 มวลแบบวงรอบเปิด	23
5.3 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูลของระบบ 2 มวล	25
5.4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz ที่ได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และผลการจำลอง (เส้นประ) เมื่อคำสั่งแรงบิด ของมอเตอร์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 1 Hz	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz ที่ได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และผลการจำลอง (เส้นประ) เมื่อคำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{prbs} = 0.1$ s	27
5.6 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz ที่ได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และผลการจำลอง (เส้นประ) เมื่อคำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 2.5 Hz	27
5.7 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz ที่ได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และผลการจำลอง (เส้นประ) เมื่อคำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{prbs} = 0.05$ s	28
5.8 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบ 2 มวลที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI	29
5.9 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูลของระบบ 2 มวลที่มีตัวควบคุมแบบ PI	31
5.10 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์, ความเร็วของโหลด และแรงบิดของเพลาของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ได้จากการทดสอบและผลการจำลอง เมื่อคำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได.	32
5.11 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์, ความเร็วของโหลด และแรงบิดของเพลาของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ได้จากการทดสอบและผลการจำลอง เมื่อคำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได.	33
5.12 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์, ความเร็วของโหลด และแรงบิดของเพลาของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ได้จากการทดสอบและผลการจำลอง เมื่อคำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{prbs} = 0.1$ s	34
5.13 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์, ความเร็วของโหลด และแรงบิดของเพลาของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ได้จากการทดสอบและผลการจำลอง เมื่อคำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{prbs} = 0.05$ s	35
5.14 โครงสร้างของการหาลักษณะสมบัติของระบบ	36
6.1 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.1	39
6.2 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.1	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.1	40
6.4 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.1	40
6.5 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.2	42
6.6 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.2	43
6.7 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.2	43
6.8 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.2	44
6.9 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.3	45
6.10 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.3	46
6.11 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.3	46
6.12 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.3.....	47
6.13 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.4	50
6.14 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.4	50
6.15 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4	51
6.15 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4	52
6.16 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4	53
6.17 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.4	54
6.18 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.5	57
6.19 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.5	57
6.20 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.5	58
6.21 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.5	58
6.22 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.5	59
6.23 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.6	61
6.24 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.6	61
6.25 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.6	62
6.26 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.6	62
6.27 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.6	63
6.28 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และระบบจริง (เส้นประ) ในการจำลองโดยป้อนแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 7$ และ $t_{prbs} = 0.5$ s ขนาด ± 0.5 N.m เพื่อกระตุ้นระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 1.03 Hz และ $T_d = 0.05$ s โดยใช้ $T_s = 0.1$ s	65
6.29 การเลือกสัญญาณ PRBS โดยพิจารณาจากความกว้างพัลส์ที่สูงที่สุด	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.30 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.7	67
6.31 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ 6.7	67
6.32 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการ จำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบ แบบที่ 6.7	68
6.33 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการ ทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.7	68
6.34 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.7	69
6.35 กราฟมุมเฟสล่าช้าที่เกิดจากการประวิงเวลา 5 ms	72
6.36 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการ จำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบ แบบที่ 6.8	72
6.36 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการ จำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบ แบบที่ 6.8	73
6.36 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการ จำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบ แบบที่ 6.8	74
6.37 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการ ทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8	74
6.37 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการ ทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8	75
6.38 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8	76
6.39 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 6.8 เมื่อรวมเวลาประวิงที่มีอยู่ในระบบในการหาลักษณะสมบัติ	

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ของระบบ.....	77
7.1 คำสั่งความเร็วในการทดสอบแบบที่ 7.1	80
7.2 สเปกตรัมของคำสั่งความเร็วในการทดสอบแบบที่ 7.1	81
7.3 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณ β จำนวนจาก $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และสัญญาณ β จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.1	81
7.3 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณ β จำนวนจาก $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และสัญญาณ β จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.1	82
7.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณ β จำนวนจาก $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และสัญญาณ β จริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.1	83
7.4 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณ β จำนวนจาก $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการ ทดสอบ (เส้นทึบ) และสัญญาณ β จริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.1	84
7.5 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของ $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) , $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และ $R(s)$ จริง (เส้น ประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.1	84
7.6 แรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองตามเงื่อนไขในการทดสอบแบบที่ 7.1.....	85
7.7 แรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบตามเงื่อนไขในการทดสอบแบบที่ 7.1	86
7.8 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในรูปที่ 7.7	86
7.9 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์จำนวนจากระบบที่ประมาณได้จากการ จำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบ แบบที่ 7.1	87
7.9 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์จำนวนจากระบบที่ประมาณได้จากการ จำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบ แบบที่ 7.1	88
7.10 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์จำนวนจากระบบที่ประมาณได้จากการ ทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.1 .	88
7.10 (ต่อ) กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์จำนวนจากระบบที่ประมาณได้จาก การทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.1	89
7.11 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ)	

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ในการทดสอบแบบที่ 7.1	90
7.12 สเปกตรัมของ $\hat{A}(z)\omega_m^*(t)$ ในการทดสอบแบบที่ 7.1	91
7.13 คำสั่งความเร็วในการทดสอบแบบที่ 7.2	92
7.14 สเปกตรัมของคำสั่งความเร็วในการทดสอบแบบที่ 7.2	93
7.15 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณ β จำนวนจาก $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และสัญญาณ β จริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.2	93
7.16 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของ $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) , $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และ $R(s)$ จริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.2	94
7.17 แรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองตามเงื่อนไขในการทดสอบแบบที่ 7.2.....	95
7.18 แรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบตามเงื่อนไขในการทดสอบแบบที่ 7.2	95
7.19 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในรูปที่ 7.18	96
7.20 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์จำนวนจากระบบที่ประมาณได้จากการ จำลอง (เส้นทึบ) และความเร็วของมอเตอร์จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบ แบบที่ 7.2	96
7.21 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์จำนวนจากระบบที่ประมาณได้จากการ ทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.2 .	97
7.22 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.2	97
7.23 คำสั่งความเร็วในการทดสอบแบบที่ 7.3	99
7.24 สเปกตรัมของคำสั่งความเร็วในการทดสอบแบบที่ 7.3	100
7.25 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณ β จำนวนจาก $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นทึบ) และสัญญาณ β จากการจำลอง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.3	100
7.26 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณ β จำนวนจาก $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และสัญญาณ β จริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.3	101
7.27 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของ $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) , $R(s)$ ที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และ $R(s)$ จริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.3	101
7.28 แรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองตามเงื่อนไขในการทดสอบแบบที่ 7.3	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.29 แรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบตามเงื่อนไขในการทดสอบแบบที่ 7.3	103
7.30 สเปกตรัมของแรงบิดของมอเตอร์ในรูปที่ 7.29	103
7.31 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์คำนวณจากระบบที่ประมาณได้จากการ ทดสอบ (เส้นทึบ) และความเร็วจริงของมอเตอร์ (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.3	104
7.32 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ประมาณได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) ระบบที่ประมาณได้จากการจำลอง (เส้นประ-จุด) และระบบจริง (เส้นประ) ในการทดสอบแบบที่ 7.3	104
7.33 สเปกตรัมของ $\hat{A}(z)\omega_m^*(t)$ ในการทดสอบแบบที่ 7.3	106
ก.1 เวลาประวิงภายในระบบควบคุมของมอเตอร์แบบเซอร์โว	114
ก.2 แรงบิดของมอเตอร์และความเร็วของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ ก.1	115
ก.3 แรงบิดของมอเตอร์และความเร็วของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ ก.2	116
ก.4 แรงบิดของมอเตอร์และความเร็วของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ ก.3	117
ก.5 แรงบิดของมอเตอร์และความเร็วของมอเตอร์ในการทดสอบแบบที่ ก.4	118
รูปที่ ก.1 วงจรรีจิสเตอร์เลื่อนข้อมูลในการสร้างสัญญาณ PRBS ที่มี $n = 4$	122
รูปที่ ก.2 สัญญาณ PRBS ที่มี $n = 4$	123
รูปที่ ก.3 ความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของพลังงานของสัญญาณ PRBS	125