หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมคงทนสำหรับพลานต์ที่มีความไม่แน่นอน
นักศึกษา นายเรืองยศ เกตุรักษา
รหัสนักศึกษา 45060410
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ. 2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมคงทนสำหรับพลานต์ที่มีความไม่แน่นอน โดยแบ่งแนวความคิดเป็นสองประการคือ ประการแรกการออกแบบตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Robust Nominal Model Following Control : RNMFC) ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากต้นแบบของ การควบคุมชนิดติดตามแบบจำลองที่ปรับตัวได้ (Adaptive Model Following Control : AMFC) โดยที่โครงสร้างของ RNMFC จะมีความแตกต่างและมีความซับซ้อนน้อยกว่าโครงสร้างของ AMFC โดยวิธีการควบคุมดังกล่าวอาศัยหลักการสามอย่างที่สำคัญคือ การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลานต์เป็นแบบจำลองอ้างอิง การออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Controller) เพื่อบรรลุข้อกำหนดการติดตามสัญญาณอ้างอิง และการรวมกลไกการปรับแก้ชนิดพีไอดี (PID Correction Mechanism) เข้ากับพลานต์เพื่อลดค่าความผิดพลาดทางพลวัตรระหว่างพลานต์จริงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ได้มากที่สุด และประการที่สองการจำลองความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ (Parametric Uncertainty) โดยการติดตั้งโหลดที่แกนเพลาของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้การควบคุมมีผลตอบสนองทางพลวัตรที่ผิดเพี้ยนไป จากนั้นทำการทดลองโดยนำโครงสร้างของ RNMFC มาประยุกต์ใช้กับการจำลองความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ของมอเตอร์ สุดท้ายผลการทดลองของพลานต์จะแสดงให้เห็นถึงความมีประสิทธิภาพ และความคงทนต่อความไม่แน่นอน เมื่อพิจารณากรณีการควบคุมตำแหน่งของดีซีมอเตอร์

Thesis Title	ROBUST CONTROLLER DESIGN UNCERTAINLY PLANT
Student	Mr.Ruangyos Keteruksa
Student ID.	45060410
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2006
Thesis Adviser	Assoc.Prof.Vittaya Tipsuwanporn

ABSTRACT

This Master thesis presents the Robust Controller Design Uncertainly Plant. The procedure can be done in two steps. First, an Robust Nominal Model Following Control (RNMFC) motivated by the Adaptive Model Following Control (AMFC) concept is proposed in this Thesis. The control structure of RNMFC is quite different from and much simpler than that of AMFC schemes. RNMFC has three main features: the use of a nominal model of the plant as a reference model, the design of a model controller which fulfills the reference tracking requirement and the inclusion of a simple PID correction mechanism which copes with all dynamic deviations of the real plant from its nominal model. Second, The Parametric Uncertainty Model. Then, the experimental results illustrate its effectiveness and robustness against plant with uncertainty of a position control of DC motor system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง สำหรับโอกาสที่ดีในชีวิต คำปรึกษาที่ก่อให้เกิดความคิดริเริ่ม ในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คำแนะนำในการแก้ไขปัญหา คำชี้แนะด้านทักษะแนวทางในการวิจัย ตลอดจนความเอาใจใส่สอบถามถึงความก้าวหน้า และปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้วิจัยได้ฝึกฝนด้านการบริหารงานอย่างเป็นระบบและบริหารการใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์ รศ.ดร.สาธิต อินทจักร์ รศ.วิริยะ กองรัตน์ และ ผศ.อาจินต์ น่วมสำราญ ประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์กฤชชัย วิถีพานิช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์) ที่ให้คำแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหา ตลอดจนให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ เอาใจใส่ช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์และสโตร์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อ.ปัญญา มาลีวัตร อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้ยืมอุปกรณ์ ตลอดจนเอาใจใส่ช่วยเหลือ

ขอกราบขอบพระคุณ ทุนงบประมาณประจำปี 2547 และทุนสนับสนุนการทำวิจัยประจำปี 2548 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอกราบขอบพระคุณ เตียจำรัสกับแม่วารี คุณวาณีรัตน์ คุณวารุณี และคุณสมมาตที่ให้การสนับสนุนทั้งกำลังกาย กำลังใจ กำลังทรัพย์ สำหรับโอกาสทางการศึกษาของผู้วิจัยเป็นครั้งที่สอง

ขอขอบคุณ คุณพุฒิชัย เฉื่อยราษฎร์ คุณจิตรี อินทร์พยุง เพื่อนร่วมโครงงานปริญญานิพนธ์ ที่อนุญาตให้ใช้โครงงานมาพัฒนาต่อ คุณชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข คุณวาทการ มูลไชยสุข สำหรับคำแนะนำ คุณศศิธร หาสิน คุณอภิวรรณ เดชสวัสดิ์ คุณฉัตรชัย ไพบูลย์ คุณจักรพงษ์ ศรีรักษาแก้ว คุณสุธี รุกขพันธ์ คุณเชิงชาย สงค์ประชา เพื่อน ๆ ที่ SAU.ทุกคน และพี่ ๆ เพื่อน ๆ ห้องวิจัย INS 301 สำหรับกำลังใจ คำแนะนำเสมอมา จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณสุวัฒน์ ศิริคุโณปการ คุณอนุพงษ์ วัฒนสกุลเกียรติ คุณเกรียงไกร วงษ์พรนิมิตร ที่เป็นแรงผักดันให้เดินหน้าต่อไปได้อย่างมั่นคง

สุดท้ายคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน

เรืองยศ เกตุรักษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย……..I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ……....II
กิตติกรรมประกาศ……....III
สารบัญ……IV
สารบัญตาราง……..VII
สารบัญรูป.....……..VII
คำย่อและสัญลักษณ์……..XI
บทที่ 1 บทนำ……..1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา…….....1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา……2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....……2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย…….....……....3
1.5 ขอบเขตการวิจัย……...3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา……..4

บทที่ 2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมดีซีมอเตอร์……..……....5
2.1 ดีซีเซอร์โวมอเตอร์….……..…….....5
2.1.1 โครงสร้างของดีซีมอเตอร์……5
2.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์……10

บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุมคงทน และการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด……12
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม…….....12
3.1.1 ชุดเปรียบเทียบสัญญาณ……....12
3.1.1.1 การทำงานของชุดเปรียบเทียบสัญญาณ……13
3.1.2 ตัวควบคุมพีไอดี……...13
3.1.2.1 การทำงานของตัวควบคุมพีไอดี……...14
3.1.3 ชุดรวมสัญญาณ……15
3.1.3.1 การทำงานของชุดรวมสัญญาณ……15

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.1.4 ชุดขับ……15

3.1.5 ภาคเพาเวอร์ซับพลาย……17

3.1.6 ชุดตรวจจับสัญญาณ……17

3.2 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุมคงทน……18

3.2.1 การควบคุมที่ปรับตัวได้……19

3.2.2 การควบคุมคงทนชนิดติดตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์……..21

3.2.2.1 เงื่อนไขการติดตามแบบจำลองอย่างสมบูรณ์แบบ……23

3.3 การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด……26

3.3.1 หลักการในการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด……....26

3.3.1.1 การประมาณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด A…….. 27

3.3.1.2 การประมาณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด B……...28

3.3.1.3 ความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด Combined……..31

3.3.1.4 ความไม่แน่นอนชนิด Expanded……..32

3.4 ตัวอย่างการประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด……32

บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมคงทน และการวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนในแบบจำลองพลวัตร……..36

4.1 การออกแบบตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์……36

4.1.1 การทดสอบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์……37

4.1.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์……40

4.1.3 การทดสอบเพื่อหาตัวควบคุมปรับแก้ชนิดพีไอดีภายใต้เงื่อนไขความไม่แน่นอนกรณีเลวที่สุด……45

4.2 โครงสร้างของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ……....48

4.3 บอร์ดวงจรอนาลอกสำหรับใช้ทดลอง……..49

4.4 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนในแบบจำลองพลวัตร……..……...……...50

บทที่ 5 ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง……..……....57

5.1วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้……57

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2 การทดสอบการควบคุมตำแหน่งดีซีมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกรณีการทำงานปกติ.....57
5.2.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 การควบคุมตำแหน่งดีซีมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกรณีการทำงานปกติ.....57
5.3 การทดสอบการควบคุมตำแหน่งดีซีมอเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทดสอบที่มีความไม่แน่นอนกรณีเลวที่สุด.....62
5.3.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 2 การทดสอบการควบคุมแบบดั้งเดิมกับการออกแบบตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความไม่แน่นอนกรณีเลวที่สุด.....62
5.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดัน และช่วงเวลาในการไต่ระดับ (Δx) ของตัวควบคุมในรูปแบบต่างๆ
.....69

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....71
6.1 สรุปผลการทดลอง.....71
6.2 ปัญหาและอุปสรรค.....71
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนา.....71

เอกสารอ้างอิง.....73

ภาคผนวก.....76
ภาคผนวก ก.บอร์ดวงจรอนาลอก,ตารางที่ ก. และรูปโครงงานจริง.....77
ภาคผนวก ข.ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....81

ประวัติผู้เขียน.....95

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 การเลือกค่าระดับความเชื่อมั่น……...…….29

3.2 แสดงตัวอย่างการประมาณค่าการกระจายความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ……...…….30

3.3 การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด…….34

5.1 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม กรณีการทำงานปกติ ……..69

5.2 แสดงการเปรียบเทียบช่วงเวลาในการไต่ระดับ (Δx) ของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกรณีการทำงานปกติ……..69

5.3 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม กรณีที่มีความไม่แน่นอน…..……...69

5.4 แสดงการเปรียบเทียบช่วงเวลาในการไต่ระดับ (Δx) ของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……70

5.5 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……...……...70

5.6 แสดงการเปรียบเทียบช่วงเวลาในการไต่ระดับ (Δx) ของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีที่มีความไม่แน่นอน…….70

ก. แสดงตัวอย่างการคูณจากตาราง t-Distribution…….78

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงวงจรสมมูลของดีซีมอเตอร์.....6

2.2 บล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์.....6

2.3 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมตำแหน่งดีซีมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอดี.....9

2.4 วิธีการหาผลตอบสนองแบบขั้นบันได.....10

3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม.....12

3.2 แสดงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของชุดเปรียบเทียบสัญญาณ.....13

3.3 แสดงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของชุดควบคุมแบบพีไอดี.....14

3.4 แสดงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของชุดรวมสัญญาณ.....15

3.5 แสดงการทำงานของวงจรแอมปลิไฟแบบเต็ม 4 ควอดรันท์.....16

3.6 แสดงวงจรไบไดเรคชันแนลแอมปลิไฟแบบไบโพลาร์แอมปลิไฟ.....16

3.7 แสดงวงจรเพาเวอร์ซับพลาย.....17

3.8 บล็อกไดอะแกรมทั่วไปของการควบคุม.....18

3.9 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบที่ปรับตัวได้.....19

3.10 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนต่างๆ ของหลักการควบคุมแบบที่ปรับตัวได้.....20

3.11 โครงสร้างของการออกแบบตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์.....21

3.12 โครงสร้างอย่างง่ายของการออกแบบตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์.....23

3.13 พลานต์ควบคุมป้อนกลับ.....25

3.14 การกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติ.....29

3.15 การกระจายความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....29

3.16 การกระจายความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม.....30

3.17 การกระจายความน่าจะเป็นแบบยู.....31

4.1 ผลตอบสนองลูปเปิดของพลานต์การควบคุมตำแหน่งของดีซีมอเตอร์.....37

4.2 ผลตอบสนองลูปเปิดของพลานต์จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATHLAB.....38

4.3 วงจรอันดับหนึ่งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....38

4.4 ผลตอบสนองลูปเปิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองด้วยออปแอมป์.....40

4.5 ตำแหน่งของโพลลูปปิดหลัก.....41

4.6 กราฟแสดงผลตอบสนองเมื่อ $K_I = 1$.....43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.7 ผลตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบได้……44

4.8 ผลตอบสนองลูปเปิดของพลานต์ที่มีความไม่แน่นอนกรณีเลวที่สุด……..……..45

4.9 ผลตอบสนองลูปเปิดของพลานต์จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ……...46

4.10 ผลตอบสนองจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เมื่อใช้ตัวปรับแก้ชนิดพีไอดี……...48

4.11 โครงสร้างของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์……..49

4.12 แนวคิดแบบบล็อกไดอะแกรมสำหรับใช้ทดลองจริง……50

4.13 โครงสร้างบอร์ดวงจรอนาลอก……50

4.14 แสดงโครงสร้างการควบคุมคงทนชนิดติดตามแบบจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์……..52

4.15 แสดงการจำลองที่ขอบเขตต่ำสุด $G_p(s)=1.8/0.02s+1$ โดยที่ $K_m=50\%$ ...……...52

4.16 แสดงการจำลองที่ขอบเขตพลานต์ระบุ $G_p(s)=3.6/0.02s+1$……...53

4.17 แสดงการจำลองที่ขอบเขตสูงสุด $G_p(s)=5.2/0.02s+1$ โดยที่ $K_m=50\%$ ……....53

4.18 แสดงการจำลองที่ขอบเขตต่ำสุด $G_p(s)=3.6/0.01s+1$ โดยที่ $\tau_m=50\%$ ……...54

4.19 แสดงการจำลองที่ขอบเขตพลานต์ระบุ $G_p(s)=3.6/0.02s+1$……...54

4.20 แสดงการจำลองที่ขอบเขตสูงสุด $G_p(s)=3.6/0.04s+1$ โดยที่ $\tau_m=50\%$ ……..55

5.1 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 15° (ตามเข็มนาฬิกา) กรณีการทำงานปกติ……58

5.2 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 15° (ทวนเข็มนาฬิกา) กรณีการทำงานปกติ……....59

5.3 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 90° (ตามเข็มนาฬิกา) กรณีการทำงานปกติ……59

5.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 90° (ทวนเข็มนาฬิกา) กรณีการทำงานปกติ……....60

5.5 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 165° (ตามเข็มนาฬิกา) กรณีการทำงานปกติ……....60

5.6 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 165° (ทวนเข็มนาฬิกา) กรณีการทำงานปกติ……....61

5.7 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 15° (ตามเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.8 ผลตอบสนองของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันได ที่ตำแหน่ง 15° (ตามเข็มนาฬิกา) กรณีที่ทีความไม่แน่นอน……...63

5.9 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 15° (ทวนเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……....64

5.10 ผลตอบสนองของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันได ที่ตำแหน่ง 15° (ทวนเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..…..……64

5.11 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 90° (ตามเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……..……65

5.12 ผลตอบสนองของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 90° (ตามเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……65

5.13 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 90° (ทวนเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……..66

5.14 ผลตอบสนองของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 90° (ทวนเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……66

5.15 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 165° (ตามเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……. 67

5.16 ผลตอบสนองของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 165° (ตามเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……67

5.17 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 165° (ทวนเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..……68

5.18 ผลตอบสนองของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดที่ตำแหน่ง 165° (ทวนเข็มนาฬิกา) กรณีที่มีความไม่แน่นอน……..…… ..68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ก.1 แสดงบอร์ดวงจรอนาลอก……..79
ก.2 แสดงภาพถ่ายของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองจริง……..80
ก.3 แสดงภาพถ่ายของชุดทดลองและมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองจริง…….....80
ก.4 แสดงภาพถ่ายการต่อวงจรของชุดทดลองและมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองจริง……...80

คำย่อและสัญลักษณ์

T คือ แรงบิดของเพลามีหน่วยเป็นนิวตัน – เมตร (N-m)

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์ (wb)

I คือ กระแสเป็นแอมแปร์ (A)

K คือ ค่าคงที่

E คือ แรงดันย้อนกลับ เมื่อ emf มีหน่วยเป็นโวลท์ (V)

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์ (wb)

θ คือ ตำแหน่งของมอเตอร์มีหน่วยเป็นเรเดียน / วินาที (rad/sec)

V คือ แรงดันที่ป้อนให้กลับมอเตอร์

K_e คือ ค่าคงที่ของแรงดันย้อนกลับ

L คือ อินดักแตนซ์ของอาร์เมเจอร์

R คือ ความต้านทานที่ขั้วของมอเตอร์

ζ คือ ค่าแดมป์ปิ้งของการหน่วง

K_m คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์

J คือ ความเฉื่อยของระบบ

B คือ ค่าความหนืด

τ_a คือ ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า

τ_m คือ ค่าเวลาคงตัวทางกล

k_{pa} คือ อัตราขยายของตัวปรับแก้ชนิดพีไอดี

T_{ia} คือ ค่าเวลาอินทิกรัลของตัวปรับแก้พีไอดี

T_{da} คือ ค่าเวลาอนุพันธ์ของตัวปรับแก้พีไอดี

$G_m(s)$ คือ อัตราการขยายของแบบจำลองอ้างอิง

$G_p(s,v)$ คือ อัตราการขยายของพลานต์

$G_a(s)$ คือ อัตราการขยายของตัวปรับแก้ชนิดพีไอดี

$E(s)$ คือ ค่าความผิดพลาดของพลานต์ควบคุม

$R(s)$ คือ ตัวแปรอินพุตของพลานต์

$U(s)$ คือ ตัวแปรเอาต์พุตของพลานต์

$Y_m(s)$ คือ สัญญาณออกของแบบจำลองอ้างอิง

$Y_p(s)$ คือ สัญญาณออกของพลานต์

$N_m(s)$ คือ เทอมเศษจากแบบจำลองอ้างอิง

คำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

$N_P(s)$ คือ เทอมเศษจากพลานต์

$N_a(s)$ คือ เทอมเศษจากตัวปรับแก้พีไอดี

$D_m(s)$ คือ เทอมส่วนจากแบบจำลองอ้างอิง

$D_P(s)$ คือ เทอมส่วนจากพลานต์

$D_a(s)$ คือ เทอมส่วนจากตัวปรับแก้ชนิดพีไอดี

V_{input} คือ แรงดันอินพุต

V_{sensor} คือ แรงดันจากตัวตรวจจับสัญญาณ

Δx คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลาในการไต่ระดับ

C_i คือ Sensitivity Coefficient ซึ่งใช้สำหรับการแปลง อินพุตที่มีหน่วยต่างจากเอาต์พุต ให้เป็นหน่วยเดียวกัน

$u(x_i)$ คือ ความไม่แน่นอนที่เกิดจากปริมาณ อินพุตต่างๆ

$u_i(y)$ คือ ความไม่แน่นอนของ เอาต์พุตย่อยๆ แต่ละตัว

U คือ ความไม่แน่นอนชนิด Expanded

k คือ ตัวประกอบครอบคลุม ซึ่งมีค่าเท่ากับ V_{eff}

U_c คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด Combined

R_s คือ ค่าที่ได้จากการสอบเทียบ Standard Resistor

R_d คือ ค่า Drift ของ Standard Resistor

R_t คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของคือ Standard Resistor เนื่องจากอุณหภูมิในอ่างน้ำมัน

V_x คือ แรงดันที่วัดได้ตกคร่อมความต้านทาน R_x

V_s คือ แรงดันที่วัดได้ตกคร่อมความต้านทาน R_s