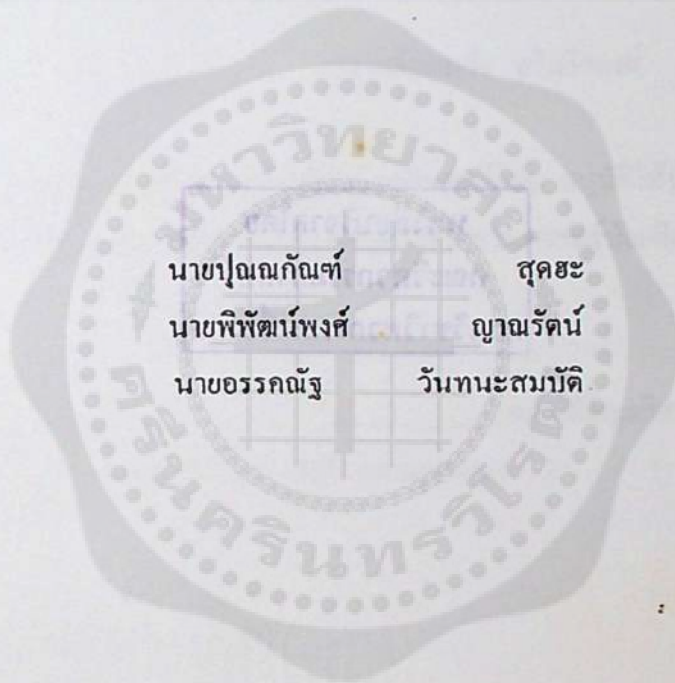


254
2542
1.2

การควบคุมตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง

Control of fixed joint Inverted Pendulum

18 ส.ค. 2544



โครงการวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาด้านหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2542

หัวข้อโครงการวิศวกรรม

การควบคุมลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง

โดย

นายปณณกันท์ สุดชะ

นายพิพัฒน์พงศ์ ญาณรัตน์

นายอรรถณัฐ วันทะสมบัติ

ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สมหวัง อริสริยวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นับโครงการ
วิศวกรรมศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศักดิ์ กองสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมศาสตร์

สมหวัง อริสริยวงศ์

ประธานกรรมการ

(อ. สมหวัง อริสริยวงศ์)

อ. กฤษณะ วัฒนศิริวัฒน์

กรรมการ

(อ. กฤษณะ วัฒนศิริวัฒน์)

ท. ประชาสันติ ไตรยสุทธิ

กรรมการ

(อ. ประชาสันติ ไตรยสุทธิ)

การควบคุมลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง

ปีการศึกษา 2542

โดย

นายปณณกันท์ สุดชะ
นายพิพัฒน์พงศ์ ญาณรัตน์
นายอรรณัฐ วันทนะสมบัติ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สมหวัง อริสริวงค์

บทคัดย่อ

โครงงานวิศวกรรมฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง รวมทั้งระบบควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อควบคุมให้ระบบสามารถกลับสู่ภาวะสมดุลได้เองเมื่อถูกรบกวน โดยใช้ตัวควบคุมแบบอนาลอกในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ขับเคลื่อนลูกตุ้มผกผันให้กลับสู่ภาวะสมดุล

นอกจากนี้ยังมีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบต่าง ๆ และสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบการสอน วิชาวิศวกรรมควบคุม ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลต่อไป

Control of fixed joint Inverted Pendulum

Academic Year 1999

By

Mr. Punnanan Sudha

Mr. Pipatpong Yarnnarat

Mr. Akkanut Wantanasombut

Project Report Adviser

Mr.Somwang Arisariyawong

ABSTRACT

The main objective of this Engineering project is to design and to construct the fixed joint inverted pendulum and the controller that is the feedback control type. By using Analog control system to drive the DC servomotor to keep the stability of the system.

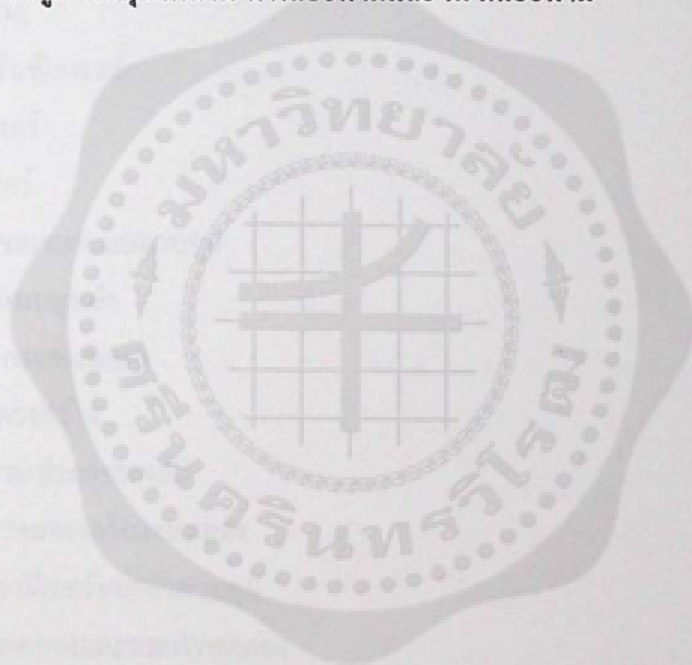
The system can be further used to test the other type of the control system and can be used as a demonstration unit for the Mechanical control course in the Mechanical Engineering department.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอกราบขอพระคุณอาจารย์สมหวัง อริสริยวงศ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ โดยตลอด ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณบุพการี ที่ได้เลี้ยงดู อบรม และ คอยเป็นกำลังใจในยามที่ท้อแท้และสิ้นหวัง ขอขอบคุณช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่อง กลทุกท่าน ตลอดจนเพื่อนๆทุกคน ที่มีส่วนช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยความหวังดีตลอดมา

ข้อบกพร่องทั้งหลายอันอาจเกิดขึ้นผู้จัดทำขอน้อมรับไว้ ส่วนคุณงามความดีทั้งหมดขออุทิศให้ท่านผู้มีพระคุณเหล่านี้ ทั้งที่เอ่ยนามและไม่ได้เอ่ยนาม

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
พารามิเตอร์ด้านไดนามิกส์	14
พารามิเตอร์อื่น ๆ	14
วงจรขยายไม่กลับเฟส	16
วงจรขยายกลับเฟส	18
วงจรตามแรงดัน	20
วงจรขยายการบวก	20
วงจรขยายผลต่าง	22
วงจรดิฟเฟอเรนเชียล	23
วงจรอินทิเกรเตอร์	25
โพเทนชิโอมิเตอร์	26
การใช้อุปกรณ์ชุดเซรแบบควบคุม	29
อุปกรณ์ชุดเซรแบบมุนำ	32
3. การคำนวณและการออกแบบ	35
การออกแบบโครงสร้าง	35
การออกแบบส่วนประกอบหลัก	40
การคำนวณขนาดมอเตอร์กระแสตรง	45
การคำนวณพารามิเตอร์ของตัวควบคุม	47
4. อุปกรณ์ วิธีการทดลองและผลการทดลอง	62
อุปกรณ์การทดลอง	62
วิธีการทดลอง	62
5. สรุปผลการทดลอง	65
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
พารามิเตอร์ด้านไดนามิกส์	14
พารามิเตอร์อื่น ๆ	14
วงจรขยายไม่กลับเฟส	16
วงจรขยายกลับเฟส	18
วงจรตามแรงดัน	20
วงจรขยายการบวก	20
วงจรขยายผลต่าง	22
วงจรดีฟเฟอร์เรนเชียลเอเดอ์	23
วงจรอินทิเกรเตอร์	25
โพเทนชิโอมิเตอร์	26
การใช้อุปกรณ์ชุดเซรระบบควบคุม	29
อุปกรณ์ชุดเซรแบบมูมำ	32
3. การคำนวณและการออกแบบ	35
การออกแบบโครงสร้าง	35
การออกแบบส่วนประกอบหลัก	40
การคำนวณขนาดมอเตอร์กระแสตรง	45
การคำนวณพารามิเตอร์ของตัวควบคุม	47
4. อุปกรณ์ วิธีการทดลองและผลการทดลอง	62
อุปกรณ์การทดลอง	62
วิธีการทดลอง	62
5. สรุปผลการทดลอง	65
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก	67

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงระบบควบคุมแบบเปิด	4
2.2 แสดงระบบควบคุมแบบเปิด	4
2.3 แสดงแผนภาพแสดงการควบคุมขดลวดอาร์เมเจอร์ของเซอร์โวมอเตอร์	6
2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรม จากสมการที่ 2.7 – 2.9	9
2.5 แสดงแผนภาพผลรวมของบล็อกไดอะแกรม	9
2.6 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์	11
2.7 แสดงกราฟอัตราขยายแรงดันขณะวงเปิดของออปแอมป์ 741	15
2.8 แสดงกราฟแบนด์วิดท์ของออปแอมป์เบอร์ 741	15
2.9 แสดงวงจรขยายไม่กลับเฟส	16
2.10 แสดงวงจรขยายกลับเฟส	18
2.11 แสดงการต่อตัวต้านทานป้อนกลับหลาย ๆ ค่าเพื่อเปลี่ยนอัตราขยายแรงดัน	19
2.12 แสดงการต่อโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อกำจัดแรงดันออฟเซตด้านอินพุตวงจรขยายกลับเฟส	20
2.13 แสดงการต่อโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อกำจัดแรงดันออฟเซตด้านอินพุตวงจรขยายไม่กลับเฟส	20
2.14 แสดงการต่อโพเทนชิโอมิเตอร์เข้ากับออปแอมป์เพื่อหักล้างแรงดันออฟเซต	20
2.15 แสดงวงจรตามแรงดัน	21
2.16 แสดงวงจรขยายผลบวก	21
2.17 แสดงวงจรขยายผลต่าง	22
2.18 แสดงวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเออร์เบื่องค์ที่ใช้ออปแอมป์	24
2.19 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์	24
2.20 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์กับตัวต้านทาน เพื่อลดอัตราขยายแรงดัน	25
2.21 แสดงโพเทนชิโอมิเตอร์แบบหมุนได้ 10 รอบ	25
2.22 แสดงโครงสร้างภายในของโพเทนชิโอมิเตอร์แบบเพลาหมุนได้รอบเดียว	27
2.23 แสดงวงจรโพเทนชิโอมิเตอร์แบบลิเนียร์และแบบ โรตารี	27
2.24 แสดงโพเทนชิโอมิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแสดงตำแหน่ง	28
2.25 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่ใช้แทนวงจรโพเทนชิโอมิเตอร์	28
2.26 แสดงการชดเชยแบบอนุกรม	29
2.27 แสดงการชดเชยแบบขนาน	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 แสดงการเพิ่มโพลในระบบการเดิม	30
2.29 แสดงผลการเพิ่มโพลในระบบการเดิม	31
2.30 แสดงผลการเพิ่มซีโรในระบบการเดิม	31
2.31 แสดงวงจรตัวอย่างวงจรทางไฟฟ้าของการควบคุมแบบมูมนำ	32
2.32 วงจรตัวอย่างวงจรทางไฟฟ้าของการควบคุมแบบมูมนำ	33
3.1 แสดงส่วนประกอบของลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง	36
3.2 แสดงแผนภาพวัดอิสระของลูกตุ้มผกผัน	37
3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ	50
3.4 แสดงรูตโลกัสของระบบที่ได้จาก MATLAB	51
3.5 แสดงผลตอบสนองที่ได้จากการ simulation เมื่อยังไม่มีตัวควบคุม	52
3.6 แสดงวงจร compensator ที่คำนวณได้	54
3.7 แสดงผลตอบสนองที่ได้จากการ simulation เมื่อเพิ่มชุดควบคุมในระบบ	55
3.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมตามระบบที่ออกแบบได้	58
3.9 แสดงรูตโลกัสของระบบที่ได้จากการ simulation	58
3.10 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ได้จากการ simulation เมื่อยังไม่มีตัวควบคุม	59
3.11 แสดงวงจร compensator ตามที่คำนวณได้	60
3.12 ผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการ simulation เมื่อเพิ่มชุดควบคุมในระบบ	61
4.1 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่า X ของระบบขณะรบกวนและขณะที่เข้าสู่สมดุล	63
4.2 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่า θ ของระบบขณะรบกวนและขณะที่เข้าสู่สมดุล	64

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
b	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของมอเตอร์	$\frac{N.m}{Rad.s}$
c_a	ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า	V
c_b	ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ	V
c_c	ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าควบคุม	V
i_a	ค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์	A
i_f	ค่าสนามกระแสไฟฟ้า	A
J	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	$kg.m^2$
L_a	ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์	H
R_a	ค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์	Ω
T_m	ค่าแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์	N.m
K_b	ค่าคงที่ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสของมอเตอร์	V.s/rad
K_m	ค่าคงที่ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์	N.m/A
V_a	แรงดันย้อนกลับในอาร์เมเจอร์	V
V_b	แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์	V
θ	ระยะกระจัดเชิงมุม	Rad
ψ	แอร์เก็บฟลักซ์	

บทที่ 1

บทนำ

ลูกตุ้มผกผันเป็นอุปกรณ์ทดสอบระบบควบคุม เพื่อใช้ในการศึกษาและทดสอบระบบควบคุมแบบต่างๆ ในการควบคุมการของระบบที่ไม่เสถียร ตัวลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง ประกอบไปด้วย เพลาโลหะสั้นในแนวนอนมีมวลขนาดเท่ากันดั่งที่ปลายทั้งสองข้างสั้นไกลไปมาอยู่ในรางลูกป็น โดยที่รางลูกป็นนี้ติดอยู่กับปลายข้างหนึ่งของเพลาโลหะแนวดิ่ง ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งของเพลาโลหะแนวดิ่งถูกยึดติดอยู่กับจุดหมุน การทำให้ระบบอยู่ในสถานะที่เสถียรเป็นการทำให้เพลาโลหะแนวดิ่งสามารถตั้งขึ้นได้ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ไปมารอบจุดหมุนเพื่อให้เพลาโลหะในแนวนอนสั้นไกลไปอยู่ที่จุดสมดุล

ความสำคัญและที่มาของโครงการงานวิศวกรรมศาสตร์

ลูกตุ้มผกผันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพระบบควบคุมต่างๆ โดยเฉพาะการควบคุมระบบที่ไม่เสถียร ถ้าวิธีการควบคุมแบบใดที่สามารถควบคุมลูกตุ้มผกผันได้ก็จะเป็นที่ยอมรับกันว่าวิธีการควบคุมแบบนั้นจะสามารถใช้ควบคุมระบบอื่นๆ ได้เช่นกัน

วัตถุประสงค์ของโครงการงานวิศวกรรมศาสตร์

1. การสร้างและประยุกต์ใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ในการควบคุมลูกตุ้มผกผัน
2. การออกแบบสร้างลูกตุ้มผกผัน
3. การทดสอบการควบคุมระบบที่ไม่เสถียร

ขอบเขตของโครงการวิศวกรรมศาสตร์

สามารถควบคุมให้แท่งโลหะในแนวดิ่ง สามารถตั้งอยู่ได้ในช่วง $+10^{\circ} / -10^{\circ}$ เทียบกับแกนแนวดิ่ง โดยอาศัยการควบคุมแบบอนาล็อก (Analog Control)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิศวกรรมศาสตร์

1. สามารถออกแบบและแก้ไขระบบควบคุมที่ใช้กับระบบที่ไม่เสถียรได้
2. สามารถแปลงระบบจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematical Model)เป็นระบบของงานจริงได้
3. สามารถออกแบบและแก้ไขระบบทางจักรกลได้อย่างถูกต้องตามทฤษฎี
4. สามารถแปลงระบบทางเครื่องกลเป็นระบบทางไฟฟ้าและสามารถแปลงกลับได้
5. เข้าใจถึงการทำงานของเครื่องมือวัดและเซนเซอร์ได้
6. ใช้เป็นแบบจำลองเพื่อการศึกษาและเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุม

บทที่ 2

ทฤษฎี

การควบคุมอัตโนมัติ

การควบคุมอัตโนมัติในระบบกายภาพใด ๆ คือ การบังคับให้ระบบนั้นทำงานในลักษณะที่จะนำมาซึ่งผลงาน (Output) ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องหรือเป็นไปตามเป้าหมาย (Input) ด้วยตัวของมันเอง

1. ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุม แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ

- จุดมุ่งหมาย
- ส่วนประกอบของระบบควบคุม
- ผลลัพธ์หรือผลตอบสนอง

2. ประเภทของระบบควบคุม

- ระบบควบคุมแบบเปิด (Open – loop control system หรือ Nonfeedback system)
- ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed – loop control system หรือ feedback control system)

2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open – loop control system)

ลักษณะโดยทั่วไปของระบบควบคุมแบบเปิด คือ การเลือกสัญญาณเข้า (Input) หรือ สัญญาณควบคุม (Control signal) ขึ้นกับเป้าหมายของระบบ และการรู้ลักษณะทั่วไปของระบบ สัญญาณออก (Output signal) ไม่มีอิทธิพลต่อสัญญาณเข้า เนื่องจากไม่มีการป้อนกลับ ถ้ามีสิ่งรบกวน (Disturbance) ในระบบ หรือ ไม่รู้ลักษณะทั่วไปของระบบอย่างสมบูรณ์ สัญญาณออกก็จะไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

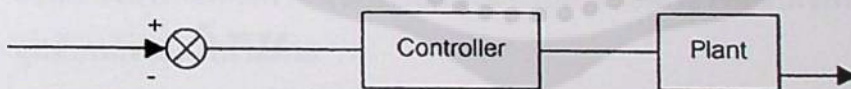
ข้อดีของระบบแบบเปิดคือ ความง่าย ระบบแบบนี้ควรเลือกใช้ในกรณีที่รู้สัญญาณเข้าที่ให้กับระบบ และรู้พารามิเตอร์ของระบบเป็นอย่างดี ตัวอย่างของระบบ เช่น เครื่องปิ้งขนมปัง และพัดลม เป็นต้น

2.2 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system)

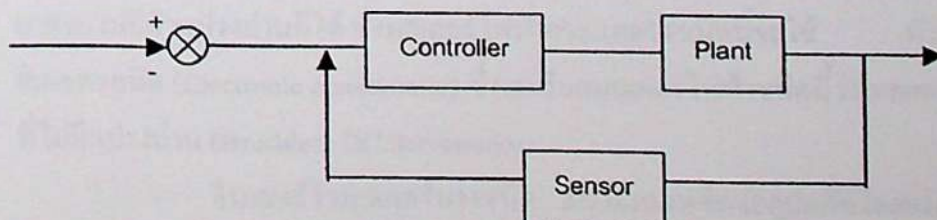
ความแตกต่างระหว่างสัญญาณเข้า และสัญญาณออก คือ ความผิดพลาด (Error) เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 อย่าง คือ สิ่งรบกวนที่กระทำต่อระบบ และการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะมีการป้อนกลับสัญญาณออกเพื่อให้ข้อมูลเพิ่มเติมในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมทำให้ระบบทำงานได้ดีขึ้นในกรณีที่มีสิ่งรบกวน หรือความไม่แน่นอน (Uncertainties) ในระบบตัวอย่างของระบบ เช่น ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา

นอกจากนั้น การป้อนกลับยังช่วยปรับปรุงผลตอบสนองชั่วคราว และความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าผลของการป้อนกลับมีดังนี้

- ลดผลกระทบของการแปรผันของพารามิเตอร์
- ลดผลกระทบของสิ่งรบกวน
- ปรับปรุงผลตอบชั่วคราว
- ลดความคลาดเคลื่อนในภาวะคงตัว



รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมแบบปิด

3. เซนเซอร์ (Sensor) และเอนโคเดอร์ (Encoder) ในระบบควบคุม

เซนเซอร์และเอนโคเดอร์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ในระบบควบคุมแบบเปิดใช้เอนโคเดอร์ เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของระบบ ส่วนระบบควบคุมแบบป้อนกลับใช้เซนเซอร์และเอนโคเดอร์ เพื่อป้อนกลับสัญญาณสำหรับการควบคุมและเพื่อแสดงเอกลักษณ์ของกระบวนการ

ส่วนขับเคลื่อนระบบเซอร์โว (Sero system)

ระบบเซอร์โวเป็นระบบไฟฟ้า ที่สามารถควบคุมได้ทั้งตำแหน่งและความเร็วได้อย่างแม่นยำในระบบเซอร์โวจะใช้ดีซีมอเตอร์ (DC Motor) เป็นตัวขับเคลื่อนมากกว่าเอซีมอเตอร์ (AC Motor) เนื่องจากประสิทธิภาพของดีซีมอเตอร์จะดีกว่า

1. เซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Servo motor)

ถูกใช้เป็นอย่างมากในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร ระบบอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ และระบบควบคุมอัตโนมัติ มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ จะถูกออกแบบให้โมเมนต์ความเฉื่อยของตัวโรเตอร์ (Rotor inertia) มีความเฉื่อยต่ำ ซึ่งจะส่งผลทำให้ได้แรงบิดต่อความเฉื่อยมีค่าสูงมาก และเซอร์โวมอเตอร์จะต้องทำงานในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องตลอดเวลา ค้างไว้ จึงทำให้เกิดอัตราความถี่ที่โรเตอร์สลับไปมาตลอดเวลา ดังนั้นเซอร์โวมอเตอร์จะต้องสามารถดูดซับพลังงานนี้ให้ได้ด้วย

เซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้องการแรงดันกระแสไฟฟ้าสม่ำเสมอและเที่ยงตรง ดังนั้นเซอร์โวมอเตอร์จะประกอบไปด้วย ตัวแปรงถ่าน (Brush), ตัวแปลงกระแสไฟฟ้า (Commutator) และอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเราเรียกมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีแปรงถ่าน (DC brush servomotor) แต่อย่างไรก็ตามมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงบางชนิดที่ใช้ในงานอาจจะไม่มีตัวแปรงถ่านก็ได้ ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดนี้จะใช้ ตัวแปลงกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic commutator) ซึ่งเราเรียกมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Servomotor)

ในเซอร์โวมอเตอร์บางชนิด สนามแม่เหล็กจะถูกผลิตโดยแม่เหล็กถาวร ดังนั้นความเข้มแม่เหล็กภายในสนามแม่เหล็กจึงคงที่ เรียกเซอร์โวมอเตอร์ ชนิดนี้ว่า เซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet DC motor)

ส่วนเซอร์โวมอเตอร์ชนิดที่เร้าด้วยกำลังไฟฟ้าให้เกิดสนามแม่เหล็กนั้นเราสามารถควบคุมความเข้มแข็งสนามแม่เหล็กได้โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ เรียกเซอร์โว มอเตอร์ชนิดนี้ว่า เซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดควบคุมอาร์เมเจอร์ได้ (Armature control of DC servomotor)

2. คุณสมบัติของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

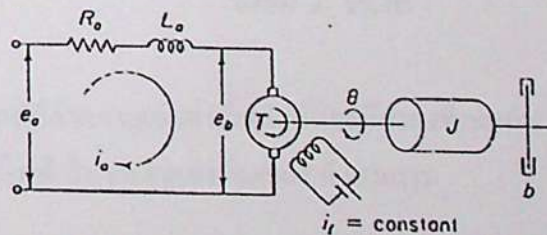
ดีซีมอเตอร์เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลมีด้วยกันหลายแบบขึ้นอยู่กับการผลิตสนามแม่เหล็ก และขดลวดโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- ซีรี่-เอ็กไซค์เตด (Series-Excited)
- ชัน-เอ็กไซค์เตด (Shunt-Excited)
- เสพาเรต-เอ็กไซค์เตด (Separat-Excited)

ซึ่งสองชนิดแรกไม่นิยมใช้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นนอนลิเนียร์ (Nonlinear) จึงนิยมใช้แบบเสพาเรต-เอ็กไซค์เตด ซึ่งชนิดนี้ยังแบ่งการควบคุมได้ 2 แบบ คือการควบคุมขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature control) และการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Field control) ในที่นี้เราจะพิจารณาการควบคุม ขดลวดอาร์เมเจอร์

3. การควบคุมขดลวดอาร์เมเจอร์ของเซอร์โวมอเตอร์ (Armature controlling of DC servomotor)

พิจารณาการควบคุมขดลวดอาร์เมเจอร์ของเซอร์โวมอเตอร์ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 กำหนดให้สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพแสดงการควบคุมขดลวดอาร์เมเจอร์ของเซอร์โวมอเตอร์

- R_s = ค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์, โอห์ม
 L_s = ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์, เฮนรี่
 i_s = ค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์, แอมแปร์
 i_f = ค่าสนามกระแสไฟฟ้า, แอมแปร์
 e_s = ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า, โวลต์
 e_b = ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ, โวลต์
 θ = ค่ามุมที่เปลี่ยนไปของเพลามอเตอร์, เรเดียน
 T = ค่าแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์, นิวตัน-เมตร
 J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และภาระเมื่อเทียบกับเพลามอเตอร์, กิโลกรัม-เมตร²
 b = สัมประสิทธิ์ความหนืด-ความเสียดทาน และภาระเมื่อเทียบกับเพลามอเตอร์, นิวตัน-เมตร/เรเดียน/วินาที

แรงบิด (Torque, T) ของมอเตอร์เกิดจากผลคูณระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์ i_s กับแอร์แก๊ป ฟลักซ์ (air gap flux) ψ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามแม่เหล็ก หรือ

$$\psi = K_f i_s \quad (2.1)$$

โดยที่ K_f มีค่าคงที่ เราจะเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$T = K_f i_s K_t i_s \quad (2.2)$$

โดยที่ K_t มีค่าคงที่

สำหรับสนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มคงที่ ฟลักซ์ก็จะมีค่าคงที่เช่นกัน และแรงบิดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ ดังสมการ

$$T = K i_s \quad (2.3)$$

โดยค่า K ของแรงบิดของมอเตอร์เป็นค่าคงที่ ข้อสังเกต ถ้าเครื่องหมายของกระแสไฟฟ้า i_s มีค่าตรงกันข้ามจะมีผลทำให้ทิศทางการหมุนของโรเตอร์ (rotor) หมุนย้อนกลับ

เมื่อขดลวดเริ่มหมุนแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดจากผลคูณระหว่างฟลักซ์กับความเร็วเชิงมุมในขดลวดอาร์เมเจอร์ สำหรับฟลักซ์คงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า e_a จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วเชิงมุม $\frac{d\theta}{dt}$ หรือ

$$e_a = K_a \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4)$$

โดยที่ e_a เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ และ K_a เป็นค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ

ความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์ จะควบคุมที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์ e_a (แรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ e_a จะแสดงออกที่เครื่องขยายกำลัง แต่ไม่แสดงในแผนภาพ) สมการคิฟเฟอเรนเชียลของขดลวดอาร์เมเจอร์ เป็น

$$e_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b \quad (2.5)$$

กระแสของขดลวดอาร์เมเจอร์ มีผลมาจากแรงบิด ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปอินเทนอร์เซ็ช และแรงเสียดทานได้ดังนี้

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = T = K_t i_a \quad (2.6)$$

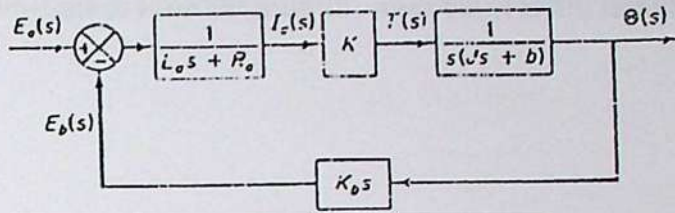
สมมติเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นศูนย์ และแปลงลาปลาซจากสมการที่ (2.4), (2.5) และ (2.6) จะได้สมการ

$$K_a s \Theta(s) = E_a(s) \quad (2.7)$$

$$(L_a s + R_a) I_a(s) + E_a(s) = E_a(s) \quad (2.8)$$

$$(J s^2 + b s) \Theta(s) = T(s) = K_t I_a(s) \quad (2.9)$$

ให้ $E_a(s)$ เป็นสัญญาณเข้า และให้ $\Theta(s)$ เป็นสัญญาณออกจากสมการที่ (2.7), (2.8) และ (2.9) เปลี่ยนให้อยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรม จากสมการที่ 2.7 – 2.9

โดยที่การควบคุมของขดลวดอาร์เมเจอร์ในเซอร์โวมอเตอร์ เป็นระบบแบบป้อนกลับ ผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับทำให้สัญญาณป้อนกลับเป็นสัดส่วนกับความเร็วมอเตอร์ คือแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับจะเพิ่มการหน่วงของระบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) ของเซอร์โวมอเตอร์ ที่พิจารณาเป็น

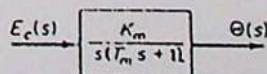
$$\frac{\Theta(s)}{E(s)} = \frac{K}{s[L_o J s^2 + (L_o b + R_o J)s + R_o b + K K_b]} \quad (2.10)$$

การเหนี่ยวนำ L_o ในวงจรขดลวดอาร์เมเจอร์มีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งได้ถ้าตัด L_o ทิ้งจะเขียนทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ของสมการ (2.10) ได้ใหม่เป็น

$$\frac{\Theta(s)}{E(s)} = \frac{K_m}{s[T_m s + 1]} \quad (2.11)$$

โดยที่ $K_m = \frac{K}{(R_o b + K K_b)}$ = ค่าคงที่เกนมอเตอร์

$T_m = \frac{R_o J}{(R_o b + K K_b)}$ = ค่าคงที่เวลาของมอเตอร์



รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพผลรวมของบล็อกไดอะแกรม

จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) ทราฟเฟอร์ฟังก์ชันจะอยู่ในเทอม $\frac{i}{s}$ ถ้าค่าคงที่เวลาของมอเตอร์มีค่าน้อยจะได้ R_L และ J มีค่าน้อยด้วย ที่ J มีค่าน้อย ๆ (ความต้านทาน R_L จะลดลง) ค่าคงที่เวลาของมอเตอร์จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และมอเตอร์จะเป็นอินทิเกรเตอร์ (Ideal integrator)

ออปแอมป์

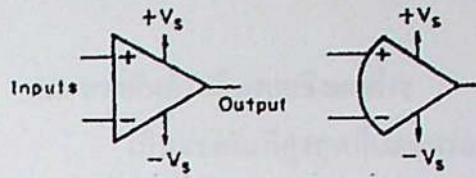
ก่อนการศึกษาออปแอมป์อย่างละเอียด ควรจะศึกษาอย่างกว้าง ๆ ก่อน โดยก่อนหน้านี้ได้เคยกล่าวว่ออปแอมป์มีอัตราการขยายกระแสสูงมาก และเหมาะที่จะนำไปใช้ในวงจรคอมพิวเตอร์แบบอะนาล็อก แต่เสถียรภาพไม่ดี และบัดนี้ได้พัฒนาด้วยการป้อนกลับ และทำให้เสถียรภาพดีขึ้นมาก ถ้าหากออปแอมป์ไม่มีการป้อนกลับ คุณสมบัติจะได้ดังนี้

1. อัตราขยายเท่ากับอนันต์ (Infinity)
2. อัตราความต้านทานอินพุตเท่ากับอนันต์
3. อัตราความต้านทานเอาต์พุตเท่ากับศูนย์
4. แบนด์วิดท์เท่ากับอนันต์
5. เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันเอาต์พุตจะได้เท่ากับศูนย์ด้วย

แต่ถึงอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติไม่มีออปแอมป์ตัวใดมีคุณสมบัติสมบูรณ์ครบทุกอย่างทั้ง 5 ข้อ ถ้าหากยังไม่ได้มีการป้อนกลับ

1. สัญลักษณ์ของออปแอมป์ (The op – Amp Schematic Symbol)

จากหนังสือวารสารและตำรา จะเห็นได้ว่าสัญลักษณ์ของออปแอมป์มี 2 รูปด้วยกัน ดังแสดงในรูป 2.6 โดยแต่ละแบบนั้นจะมีอินพุต 2 ขา คือ ขาอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) หรือ ขาอินพุต – กับขานอนอินเวอร์ตติ้ง (Noninverting) หรือ ขาอินพุต – เอาต์พุต 1 ขา และขาแหล่งจ่ายกำลังด้วยค่าแรงดันเท่ากับ + 5 ถึง + 15 โวลต์ อีก 2 ขา เป็นต้น



รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

2. ข้อมูลต่าง ๆ ของออปแอมป์ (Op – Amp Data Sheet)

ในบางครั้งวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการค้นหาข้อมูลต่าง ๆ ทางไฟฟ้าและอื่น ๆ ของออปแอมป์ก็คือ ค้นจากคู่มือ (Data Sheet) ที่บริษัทผู้ผลิตเป็นกำหนดให้ โดยจะมีอยู่ด้วยกันหลายแผ่น ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

1. ข้อมูลทั่ว ๆ ไป
2. วงจรสมมูลภายใน
3. ขาต่อต่าง ๆ
4. ค่าพิกัดสูงสุด
5. คุณลักษณะ
6. เส้นโค้งความสัมพันธ์ต่าง ๆ

3. ค่าพิกัดสูงสุด (Maximum Rating)

ค่าพิกัดต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในรูป 2.6 เป็นค่าพิกัดสูงสุดที่สามารถทำให้ออปแอมป์มีความปลอดภัยในขณะการทำงาน ดังมีรายการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.1 แรงดันแหล่งจ่ายกำลัง (+V)

เป็นค่าแรงดันแหล่งจ่ายกำลังบวกและลบสูงสุดที่ใช้ป้อนเข้ากับออปแอมป์

3.2 แรงดันด้านอินพุตเชิงผลต่าง

เป็นแรงดันที่สูงสุดที่ป้อนคร่อมระหว่างขาอินพุต - และขาอินพุต + ของออปแอมป์

3.3 แรงดันอินพุต (V_{in})

เป็นแรงดันคินพุตสูงสุด ที่ป้อนเข้าขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ และกราวด์ ในเวลาพร้อม ๆ กัน ซึ่งบางทีเรียกว่า แรงดันแบบวิธีร่วม (Common – Mode) โดยปกติจะมีค่าสูงสุดเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายกำลัง

3.4 อุณหภูมิโดยรอบ (T_m)

เป็นย่านอุณหภูมิบริเวณโดยรอบของออปแอมป์ขณะใช้งาน และถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต ซึ่งถ้าเป็นออปแอมป์ที่ใช้ในด้านการทหาร (741) ย่านอุณหภูมิการใช้งานจะมีค่ามากกว่าย่านอุณหภูมิการใช้งานของออปแอมป์เบอร์เดียวกันที่ถูกนำใช้งานด้านพาณิชย์

3.4 ระยะเวลาการลัดวงจร

เป็นระยะเวลาที่เอาต์พุตของออปแอมป์สามารถลัดวงจรด้วยการลงกราวด์ หรือลัดลงขาใดขาหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลัง โดยที่ออปแอมป์นั้นยังไม่ได้ได้รับความเสียหาย

4. พารามิเตอร์ด้านอินพุต (Input Parameters)

4.1 แรงดันออฟเซตด้านอินพุต (Input Offset Voltage, V_{oi})

ในทางอุดมคติแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ก็ต่อเมื่อแรงดันระหว่างขาอินพุตทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ด้วย แต่ในทางปฏิบัติความสมมูลภายในวงจร มักทำให้เราต้องป้อนแรงดันค่าหนึ่งเพื่อแก้ไขปัญหานี้ และผลสุดท้ายจะได้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับศูนย์ตามต้องการ

4.2 กระแสไบแอสด้านอินพุต (Input Bias Current, I_b)

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ด้านอินพุตของออปแอมป์ในทางปฏิบัติ มีค่าไม่ถึงค่าอนันต์จริงดังนั้นก็จะมีกระแสจำนวนเล็กน้อย (มีหน่วยเป็น นาโนแอมป์ถึงไมโครแอมป์) ไหลผ่านขาอินพุตทั้งสอง ซึ่งค่าเฉลี่ยของกระแสทั้งสองนี้มีชื่อเรียกว่ากระแสไบแอสด้านอินพุต และเป็นกระแสที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลในวงจรภายในและจะเป็นผลกระทบต่อภาคเอาต์พุต ดังนั้น กระแสนี้ควรจำกัดให้มีค่าต่ำสุด (อาจทำได้โดยการใช้ออปแอมป์ที่มีค่าเป็น FET)

4.3 กระแสออฟเซตด้านอินพุต (Input Offset Current, I_{os})

ในการปรับแรงดันออฟเซตด้านเอาต์พุต ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ กระแสเอาต์พุตทั้งสองควรมีเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่าเราต้องจ่ายกระแสให้แก่อินพุตขาหนึ่งมากกว่าอีกขาหนึ่งเสมอ เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งกระแสออฟเซตนี้ อาจมีค่าประมาณ 20 นิลลิแอมป์

4.4 ความต้านทานด้านอินพุต (Input Resistance, Z_i)

ในทางอุดมคติควรมีเท่ากับอนันต์ แต่ทางปฏิบัติค่าด้านทานนี้ จะประมาณ 1 เมกกะโอห์ม ค่าความต้านทานนี้ ถ้ามีค่ามากขึ้น ออปแอมป์ตัวนั้นจะทำงานได้ดี นอกจากนี้เมื่อนำออปแอมป์ไปใช้งานในย่านความถี่สูงควรระวังผลจากความจุด้านอินพุตด้วย ซึ่งจะมีค่าประมาณ 2 พิโกฟาราด เมื่ออินพุตข้างหนึ่งต่อกับกราวด์

5. พารามิเตอร์ด้านเอาต์พุต (Output Parameters)

5.1 ความต้านทานด้านเอาต์พุต (Output Resistance, Z_{o1})

ดังได้กล่าวมาแล้ว ออปแอมป์ในทางอุดมคติ ความต้านทานด้านเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติค่านี้อาจมีค่าได้ตั้งแต่ 25 ถึง หลายพันโอห์มขึ้นไป แต่อย่างไรก็ตามเราสมมติให้ความต้านทานด้านเอาต์พุตในวงจรมีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์ และจากคุณลักษณะของออปแอมป์ ซึ่งมีความต้านทานอินพุตสูง และมีความต้านทานด้านเอาต์พุตต่ำ ดังนั้น ออปแอมป์จึงเปรียบเสมือนเป็นอุปกรณ์ ที่มีคุณลักษณะทางความต้านทานแมตชิ่ง (Resistance Matching)

5.2 กระแสลัดวงจรด้านเอาต์พุต (Output Short-Circuit Current, I_{osc})

คือกระแสเอาต์พุตสูงสุดที่ออปแอมป์สามารถจ่ายให้กับโหลดได้

6. พารามิเตอร์ด้านไดนามิก (Dynamic Parameters)

6.1 อัตราขยายแรงดันขณะวงเปิด (Open – Loop Voltage Gain, A_{ol})

เป็นอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตต่ออินพุตขณะวงเปิดยังไม่ป้อน

กลับ

6.2 อัตราการสลับ (Slew Rate)

คืออัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะของแรงดันเอาต์พุตสูงสุดเทียบกับ

เวลา ดังสมการ

$$\text{อัตราการสลับ} = \Delta V_o / \Delta t \quad (2.12)$$

ในเมื่อ

ΔV_o คือ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต

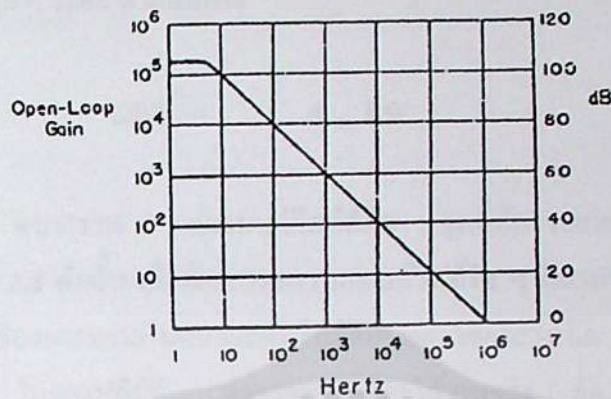
Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่แรงดันเท่ากับ ΔV_o

7. พารามิเตอร์อื่น ๆ (Other Parameters)

7.1 อัตราขยายและความถี่ตอบสนอง (Gain And Frequency Response)

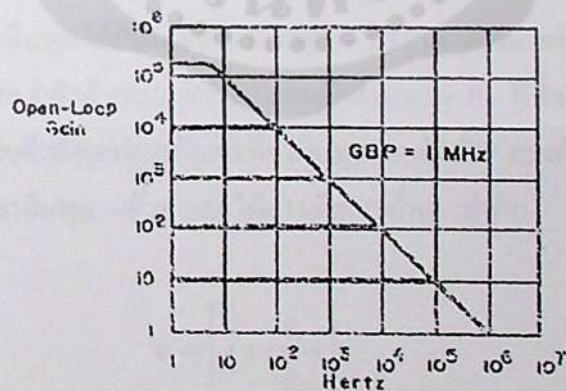
ตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นว่า ออปแอมป์ในทางอุดมคติอัตราขยายและแบนวิดท์ จะมีค่าเท่ากับอนันต์แต่ในทางปฏิบัติ จะไม่เป็นเช่นนั้น ดังกราฟที่แสดงในรูป 2.7 ซึ่งเห็นอัตราขยายขณะวงเปิด (Open – Loop Gain) หรือ A_{ol} ของออปแอมป์เบอร์ 741 โดยขณะความถี่ต่ำ อัตราขยายวงเปิดจะมีค่าคงที่ แต่หลังจากความถี่เท่ากับ 6 เฮิรตซ์ ไปแล้ว อัตราขยายวงเปิด (A_{ol}) จะลดลงด้วยอัตรา - 6 เดซิเบล / Octave หรือ - 20 เดซิเบล / Decade (Octave คือความถี่ทุก ๆ 2 เท่า และ Decade คือความถี่ที่เพิ่มขึ้นทีละ 10) การลดลงของอัตราขยายวงเปิดจะลดลงอย่าง

นี่ต่อเนื่อง จนกระทั่งได้อัตราขยายเท่ากับ 1 หรือ 0 เดซิเบล เรียกความถี่นี้ว่า ความถี่ขณัฒ์อัตราหนึ่ง หรือ F_c



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟอัตราขยายแรงดันขณะวงเปิดของออปแอมป์ เบอร์ 741

ในหัวข้อต่อไป จะได้กล่าวถึงสัญญาณเอ๊าท์พุทที่มีการป้อนกลับเข้าอินพุทของออปแอมป์โดยอัตราส่วนระหว่างแรงดันเอ๊าท์พุทกับอินพุทคืออัตราขยายวงปิด (Close Loop Gain) หรือ A_{cl} ปกติจะน้อยกว่าอัตราขยายวงเปิด (Open - Loop Gain) หรือ A_{ol} สำหรับอัตราส่วนระหว่างอัตราขยายวงปิดและอัตราขยายวงเปิด ก็คือ อัตราขยายวง (Loop - Gain) หรือ A_L ดังนั้น



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟแบนด์วิธของออปแอมป์เบอร์ 741

บางที่เงื่อนไขแรกที่เราพิจารณาในการนำออปแอมป์ไปใช้งานได้แก่อัตราขยายแบนวิดท์โปรดัคซ์ (Gain bandwidth product) หรือ GBP ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟความถี่ที่ 2.7 โดยค่า GBP นี้จะคงที่ทุก ๆ ระยะ ด้วยสมการ

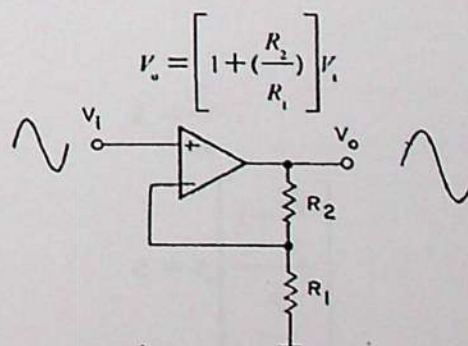
$$GBP = A_{ol} BW \quad (2.13)$$

จากกราฟ ค่าแบนวิดท์ก็คือ จุดที่อัตราขยายวงปิดตัดกับอัตราขยายวงเปิด ดังแสดงในรูป 2.8 ดังนั้น เมื่อต้องการทราบแบนวิดท์ใด ๆ ก็สามารถทำได้โดยลากเส้นจากจุดอัตราขยายที่ต้องการขยายในแนวระดับไปตัดกับอัตราขยายวงเปิด

ในทางปฏิบัติ อัตราขยายที่ต้องใช้งานจริง (อัตราขยายวงปิด) ควรมีค่าขยายวงเปิดเท่ากับ $1/10$ ถึง $1/20$ เท่าเพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และปราศจากความเพี้ยน (Distortion) ตัวอย่างเช่น จากกราฟที่ได้ตามรูป 2.7 เมื่อต้องการความถี่ใช้งาน 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ได้อัตราขยายวงเปิด 100 (40 เดซิเบล) ดังนั้นอัตราขยายวงปิดควรมีค่าเท่ากับ 5 ถึง 10 เท่า

8. วงจรขยายไม่กลับเฟส (The Noninverting Amplifier)

ซึ่งวงจรจะได้ตามรูปที่ 2.9 และมีชื่อเรียกว่าวงจรขยายไม่กลับเฟส เพราะว่าสัญญาณอินพุตได้ไปแอมเข้าที่ขาอินพุต + หรืออนอินเวอร์คิงของออปแอมป์สำหรับตัวต้านทาน R_1 มีชื่อเรียกว่าตัวต้านทานอินพุต และตัวต้านทาน R_2 มีชื่อเรียกว่าตัวต้านทานฟีดแบ็ค เนื่องจากวงจรมีการต่อตัวต้านทานกลับเข้าที่ขาอินพุต - ดังนั้น แรงดันส่วนหนึ่งของเอาต์พุตที่ได้จะไปฟีดแบ็คเข้าที่ขาอินพุต - ด้วย และได้แรงดันเอาต์พุต เท่ากับ

$$V_o = \left[1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right] V_i \quad (2.14)$$


รูปที่ 2.9 แสดงวงจรขยายไม่กลับเฟส

อัตราแรงดัน (Voltage Gain) หรือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต คือ

$$\text{อัตราขยายแรงดัน} = V_o / V_i = \left[1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right] \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.8) อัตราขยายแรงดันของวงจรขยายไม่กลับเฟส จะต้องมีย่านค่ามากกว่า 1 หรือ Unity เสมอ เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตได้ถูกป้อนเข้าที่ขาอินพุต + (นอนอินเวอร์ตติ้ง) ของออปแอมป์ และได้เฟสแรงดันเอาต์พุตกับอินพุตเป็นเฟสเดียวกัน (Inphase)

$$\text{หรืออัตราขยายแรงดันขณะวงปิด} A_v = \left[1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right] \quad (2.16)$$

ถ้าอัตราขยายวงเปิด (Loop Gain) เป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราขยายแรงดันขณะไม่มีการป้อนกลับ (Open Loop Gain) ต่ออัตราขยายแรงดัน ขณะป้อนกลับ (Close Loop Gain) ดังนั้น ค่าอัตราขยาย A_v สำหรับวงจรขยายไม่กลับเฟส จะได้เท่ากับ

$$A_v = \frac{A_{v,ol}}{A_{v,cl}} = \frac{A_{v,ol}}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \quad (2.17)$$

สำหรับอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต ของวงจรขยายไม่กลับเฟส ในทางปฏิบัติ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านอินพุตของออปแอมป์นั่นเอง ซึ่งสูงพอที่จะไม่ทำให้กลายเป็นโหลดของวงจรที่ต่อป้อนเข้ามาทางด้านอินพุตและสำหรับค่าอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุต Z_o ของวงจรตามรูปที่ 2.21 สามารถคำนวณได้จาก สมการ

$$Z_o = \frac{Z_{ol}}{A_v}$$

$$Z_o = Z_o \left[\frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{A_{v,ol}} \right] \quad (2.18)$$

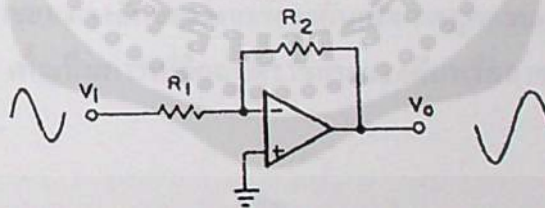
โดยค่า Z_{out} ก็คือ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุตแท้จริงของออปแอมป์ ที่บริษัทผู้ผลิตเป็นผู้กำหนดไว้ในคู่มือ (Data Sheet)

9. วงจรขยายกลับเฟส (Inverting Amplifier)

ดังรูปที่ 2.10 ออปแอมป์ได้ถูกประกอบเป็นวงจรขยายกลับเฟส ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณอินพุตที่ป้อน ได้ป้อนเข้าขาอินพุต - ของออปแอมป์ โดยผ่านตัวต้านป้อนกลับ (feedback Element) ส่วนค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะได้สมการ (2.6)

$$V_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) V_i \quad (2.19)$$

เครื่องหมายลบ (-) ในสมการหมายถึง เมื่อสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงไปทางด้านบวก สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปทางด้านลบ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือสัญญาณอินพุตและ เอาต์พุตที่ได้จะต่างเฟสกัน 180 องศา สำหรับอัตราขยายแรงดันขณะป้อนกลับ A_{CL} จะได้



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรขยายกลับเฟส

จากสมการที่ (2.6) จะเห็นได้ว่าอัตราที่ขยายแรงดันของวงจรขยายกลับเฟส สามารถทำให้มีค่าน้อยกว่าหรือมากกว่า 1 ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของ R_2 และ R_1 สำหรับอัตราขยาย A_{CL} จะได้เท่ากับ

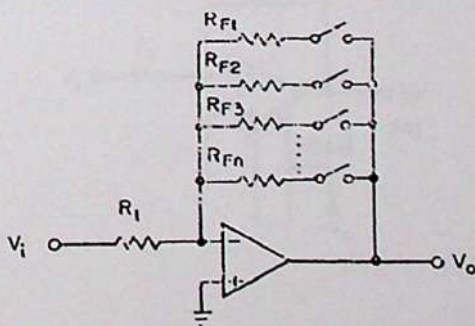
$$\begin{aligned}
 A_L &= \frac{A_{ol}}{A_{cl}} \\
 &= A_{ol} \frac{R_2}{R_1}
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

จะต่างกับอัตราขยาย A_L ของวงจรขยายไม่กลับเฟส สำหรับอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต ของวงจรขยายกลับเฟสมีค่าเท่ากับความต้านทานอินพุต ซึ่งจะน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ด้านอินพุตของวงจรขยายไม่กลับเฟสเสมอ และก่อนหน้านี้นี้ ค่าอิมพีแดนซ์เข้าที่พูดได้กล่าวมาในครั้งหนึ่งในวงจรขยายไม่กลับสัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นอัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุตของออปแอมป์คือ อัตราขยาย A_L (Loop Gain) และสำหรับวงจรขยายกลับเฟสก็เช่นกันจะได้

$$\begin{aligned}
 Z_{in} &= \frac{Z_{in}}{A_L} \\
 &= Z_{in} \frac{R_1}{A_{ol} R_2}
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

สำหรับในกรณีที่ R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากัน อัตราขยายแรงดันจะได้เท่ากับ 1 และมักนิยมนำมาใช้เป็นวงจรกลับสัญญาณ

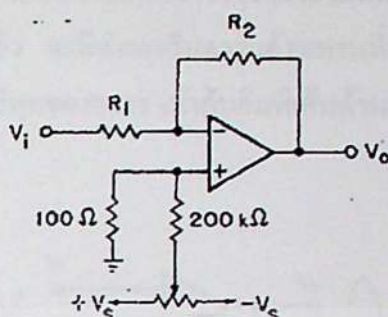
อัตราขยายแรงดันของวงจรขยายกลับเฟสอาจถูกควบคุมด้วยสวิตช์หลาย ๆ ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เพื่อเป็นการเปลี่ยนอัตราขยายแรงดันหรืออาจใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดแอนะล็อก



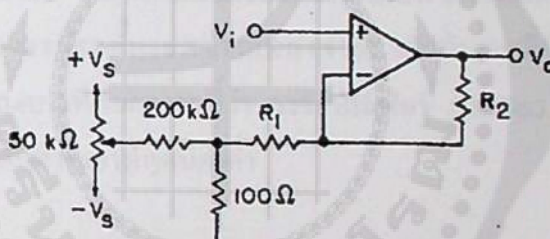
รูปที่ 2.11 แสดงการใช้ตัวต้านทานป้อนกลับหลาย ๆ ค่าเพื่อเปลี่ยนอัตราขยายแรงดัน

10. วงจรตามแรงดัน (The Voltage Follower)

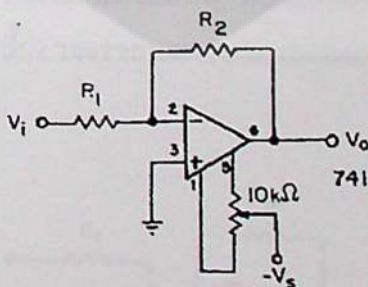
วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) หรือ วงจรตามแหล่งจ่ายกำลัง (Source Follower) ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.15 นี้ อัตราขยายแรงดันเท่ากับยูนิตี (Unity) หรือเท่ากับ



รูปที่ 2.12 แสดงการต่อโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อกำจัดแรงดันออฟเซตด้านอินพุตของวงจรขยายกลับเฟส

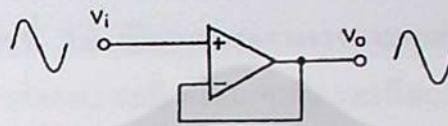


รูปที่ 2.13 แสดงการต่อโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อขจัดแรงดันออฟเซตของวงจรขยายไม่กลับเฟส



รูปที่ 2.14 แสดงการต่อโพเทนชิโอมิเตอร์เข้ากับออปแอมป์เพื่อหักล้างแรงดันออฟเซตด้านเอาต์พุตหมดไป

และเป็นวงจรขยายไม่กลับเฟสที่ป้อนกลับโดยไม่มีตัวต้านทานอินพุตและตัวต้านทานป้อนกลับสำหรับเฟสของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเป็นเฟสเดียวกันกับแรงดันอินพุต สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ของวงจรเหมือนกับอิมพีแดนซ์ของวงจรขยายไม่กลับเฟสโดยอิมพีแดนซ์อินพุตจะมีค่าสูงมาก ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว จะมีค่าเท่ากับความต้านทานที่มองเข้าไปทางด้านอินพุตของออปแอมป์และค่าอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุตของวงจร เท่ากับอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุตของออปแอมป์หารด้วยค่าอัตราขยาย A_L (Loop Gain)

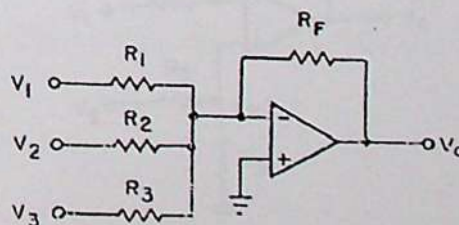


รูปที่ 2.15 แสดงวงจรตามแรงดัน

การนำไปใช้งาน จะเหมาะสำหรับประกอบเป็นวงจรเพิ่มเสถียรภาพให้กับแหล่งจ่ายกำลังที่ใช้ป้อนเข้ากับวงจรนี้จะกั้นระหว่างแหล่งจ่ายกำลังทำงานที่ป้อนแรงดันแล้วทำให้แรงดันแหล่งจ่ายกำลังไม่ตกลงบางที่เรียกว่า วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) ทั้งนี้ เพราะอิมพีแดนซ์อินพุตมีค่าสูงและ อิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุตมีค่าต่ำ

11. วงจรขยายการบวก (Summing Amplifier)

ถ้าหากมีตัวต้านทานอินพุตหลายตัวนำมาพร้อม ๆ การเข้าที่ขาอินพุต - ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เรียกว่า วงจรขยายการบวก (Summing Amplifier)



รูปที่ 2.16 แสดงวงจรขยายการบวก

โดยวงจรนี้ ถ้าหากมีแรงดันป้อนเข้ามาที่ขาอินพุตแต่ละข้างพร้อม ๆ กัน ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตจะได้ตามสมการข้างล่างนี้คือ

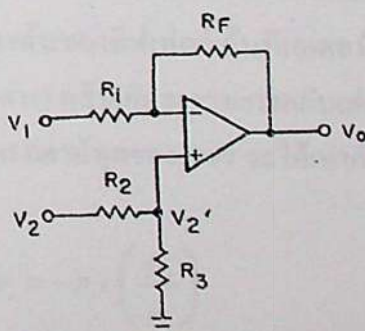
$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right)V_1 + \left(\frac{R_f}{R_2}\right)V_2 \quad (2.22)$$

12. วงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier)

รูปที่ 2.6 เป็นการแสดงวงจรขยายผลต่างที่มีแรงดันอินพุตป้อนเข้าที่ขาอินพุต - และขาอินพุต + ของออปแอมป์ พร้อม ๆ กัน และถึงแม้ว่าวงจรนี้ ดูแล้วยังยาก แต่การทำงานของวงจรมีพื้นฐานจากวงจรขยายกลับเฟส และไม่กลับเฟสเป็นหลัก โดยอันดับแรกสมมติว่า แรงดันอินพุต V_2 มีค่าเป็น 0 และที่จุด V_2 ถูกลัดวงจรให้ลงกราวด์ ดังนั้น วงจรที่จะกลายเป็นวงจรขยายเฟสเหมือนกับที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 และได้แรงดันเอาต์พุตตามสมการข้างล่างนี้

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right)V_1 \quad (2.23)$$

ต่อมาปลดจุด V_2 ที่ได้ลงกราวด์ออกและลัดวงจร V_1 ให้ลงกราวด์บ้าง ดังนั้นวงจรและการทำงานก็จะกลายเป็นวงจรขยายไม่กลับเฟสที่มีแรงดันอินพุต + จริง ๆ เท่ากับ V_2 และมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อม V_1 ซึ่งแปรผันตรงกับแรงดันอินพุต V_2 ด้วยค่าขยาย สมการของตัวแบ่งแรงดันดังนี้



รูปที่ 2.17 แสดงวงจรขยายผลต่าง

รวมสมการ (2.16) และ (2.18) เข้าด้วยกัน ดังนั้น ได้เป็นสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่มีแรงดันอินพุต 2 ค่าพร้อม ๆ กันคือ V_1 และ V_2 ดังนี้

โดยจำนวนแรก ซ้ายมือของแรงดันเอาต์พุตที่ได้ จะเป็นเอาต์พุตของวงจรทำหน้าที่ขยายผลต่างและกลับเฟส และจำนวนที่ 2 ซ้ายมือ แรงดันเอาต์พุตที่ได้ จะเป็นเอาต์พุตของวงจรทำหน้าที่ขยายผลต่างแบบไม่กลับเฟส

ดังนั้นเมื่อนำวงจรตามรูปที่ 2.23 ไปใช้งาน จะได้อัตราขยายแรงดันเท่ากับ G และความสัมพันธ์ระหว่างค่า G กับค่าความต้านทานทั้ง 4 จะเป็นดังนี้

$$R_f = GR_i \quad (2.24)$$

$$R_1 = GR_i \quad (2.25)$$

$$R_2 = R_i \quad (2.26)$$

ถ้าตัวต้านทาน 4 ตัว มีค่าเท่ากัน ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตจากสมการที่ (2.23) สามารถลดลงเหลือเป็น

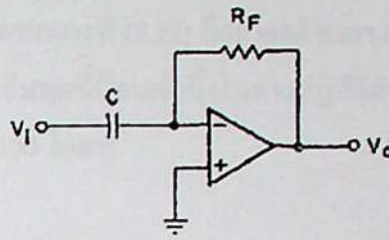
$$V_o = V_2 - V_1 \quad (2.27)$$

เพราะฉะนั้นแรงดันเอาต์พุตคือ ค่าผลต่างระหว่างแรงดันอินพุต V_2 กับ V_1 นั่นเอง บางทีวงจรนี้เรียกว่าแอนะล็อกสับแทรกเตอร์ (Analog Subtractor)

13. วงจรดิฟเฟอเรนซ์ดิฟเฟอเรนเชียล (Differencetiator Circuit)

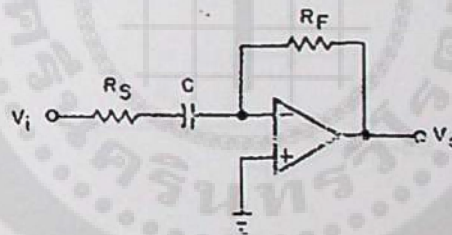
วงจรเบื้องต้นของดิฟเฟอเรนซ์ดิฟเฟอเรนเชียลที่ใช้กับออปแอมป์ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ซึ่งต่างกับวงจรขยายผลต่าง) คล้ายกับวงจรขยายกลับเฟส ยกเว้น ตัวต้านทานด้านอินพุตถูกเปลี่ยนเป็นตัวเก็บประจุสำหรับแรงเอาต์พุตของวงจร จะได้เท่ากับ

$$V_o = -R_f C \left(\frac{dV_1}{dt} \right) \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.18 แสดงวงจรดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์เบื้องต้นที่ใช้โอปแอมป์

ปัญหาหนึ่งที่จะเกิดขึ้นกับวงจรนี้คือ ค่ารีแอคแตนซ์ ชนิดสภาพความจุไฟฟ้า (Capacitive Reactance) ของตัวเก็บประจุ ซึ่งจะแปรผกผันกับความถี่ ดังนั้นทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น (ทั้งนี้เนื่องจากวงจรนี้เป็นวงจรขยายกลับเฟส) ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักนิยมต่อตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุเพื่อลดอัตราขยายแรงดันขณะความถี่มีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.32 และนอกจากนี้ขณะความถี่มีค่าสูงขึ้นให้ทำสัญญาณรบกวน (Noise) สามารถเกิดขึ้นกับวงจรนี้ได้ง่าย



รูปที่ 2.19 แสดงวงจรดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์กับตัวต้านทาน เพื่อลดอัตราขยายแรงดันขณะความถี่มีค่าสูงขึ้น

สำหรับสมการแรงดันเอาต์พุต ขณะของจรมีตัวต้านทาน R_S ต่อร่วมจะไม่เหมือนกับสมการเดิมหรือสมการที่ 3.2 แต่ถึงอย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานวงจรดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์จะเหมาะสมกับความถี่ต่ำกับค่าความถี่

แต่สำหรับความถี่ที่สูงกว่าสมการนี้ การทำงานของวงจรค่อนข้างจะเป็นวงจรขยายกลับเฟส ด้วยอัตราขยายแรงดันเท่ากับ

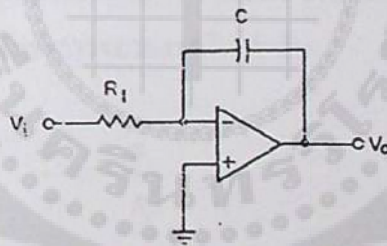
$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (2.29)$$

ค่า $R_f C$ จากสมการที่ (2.29) คือค่าคงตัวเวลา (Time Constant) ควรมีค่าประมาณ 1 คาบ (Period) ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าซึ่งในทางปฏิบัติตัวต้านทาน R_f ที่ใช้ในวงจร จะมีค่าความต้านทานประมาณ 50 – 100 โอห์ม

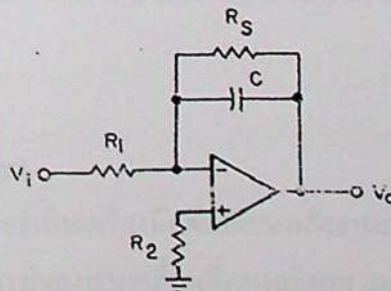
14. วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator Circuit)

จากวงจรคิฟเฟอร์เรนท์เอเตอร์ ตามรูปที่ 2.18 ถ้าหากสลับตำแหน่งตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ก็จะได้วงจรใหม่ คือ วงจรอินทิเกรเตอร์ ที่ใช้ออปแอมป์โดย R_i จะเป็นตัวต้านทานอินพุต และ C จะเป็นตัวเก็บประจุป้อนกลับ สำหรับการทำงานของวงจรจะได้ตรงกันข้ามกับวงจรคิฟเฟอร์เรนท์เอเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีการทำการคำนวณหาพื้นที่บน เคอร์ฟ (Curve) นั้นเอง

ถึงอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ วงจรอินทิเกรเตอร์ นิยมต่อตัวต้านทาน R_f ครอบกับตัวเก็บประจุ C และเรียกตัวต้านทานนี้ว่า ตัวต้านทานชั๊น (Shunt Resistor) ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.20 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์



รูปที่ 2.21 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ต่อกับตัวต้านทาน เพื่อลดอัตราขยายแรงดันขณะความถี่มีค่าต่ำ

ทั้งนี้เพื่อลดอัตราขยายแรงดันขณะความถี่มีค่าต่ำ ๆ และถ้าหากไม่ได้ตัวต้านทาน R เพื่อลดอัตราขยายแรงดันในขณะที่ยังคงอินพุตมีค่าต่ำ ๆ ถูกป้อนเข้ามา ถ้าแม้ว่าจะมีค่าน้อยมาก ๆ แต่ก็ถูกวงจรอินทิเกรเตอร์ขยายจนกระทั่งอาจทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตถึงจุดอิ่มตัวก่อนที่จะครบคาบเวลา แรงดันออฟเซต ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับกระแสอินพุตไบแอส สามารถลดให้น้อยลงได้ด้วยการต่อตัวต้านทาน R เข้าที่อินพุต + และมีค่าเท่ากับผลรวมทางขนานของตัวต้านทานอินพุต R กับตัวต้านทานชั้น R หรือได้สมการ R เท่ากับ

$$R_2 = \left(\frac{R_1 R_s}{R_1 + R_s} \right) \quad (2.30)$$

เนื่องจากตัวต้านทานชั้น R ทำหน้าที่เพื่อลดอัตราขยายแรงดันของวงจรขณะทำงานด้วยความถี่ต่ำ ดังนั้นอินพุตเอาต์พุตจากสมการที่ (2.36) จึงสามารถนำไปใช้กับงานความถี่ที่สูงกว่าสมการความถี่ข้างล่างนี้เท่านั้น คือ

$$f_c = \frac{1}{2R_1 C} \quad (2.31)$$

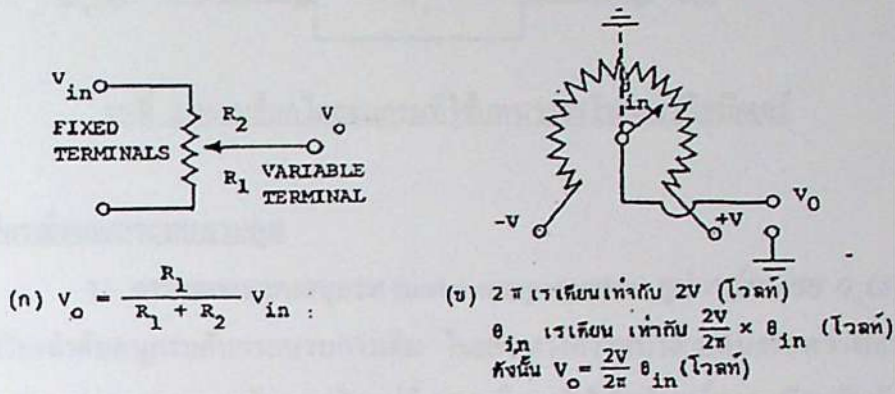
แต่สำหรับความถี่ที่มีค่าต่ำกว่า f_c การทำงานของวงจรตามรูป 2.33 ก่อนข้างที่จะกลายเป็นวงจรขยายกลับเฟสที่อัตราขยายแรงดันเท่ากับ

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_x}{R_1} \quad (2.23)$$

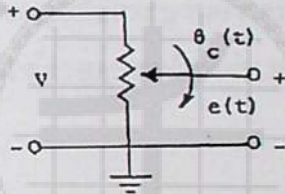
ซึ่งในทางปฏิบัติตัวต้านทาน r จะถูกกำหนดค่าประมาณ 10 เท่าของ R_1 และถ้าเป็นวงจรดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์ ค่าคงตัวเวลา (time constant) จะมีค่าเท่ากับ $R_1 C$ และเท่ากับเวลาของสัญญาณอินพุต 1 คาบ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับวงจรอินทิเกรเตอร์ด้วย

โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer)

โพเทนชิโอมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนเข้าโพเทนชิโอมิเตอร์ อยู่ในรูปของการเคลื่อนที่แบบเชิงกล แบบหมุนหรือเป็นเชิงเส้นก็ได้



รูปที่ 2.24 แสดงถึงวงจรโพเทนชิโอมิเตอร์ (ก) แบบลิเนียร์ (ข) แบบโรตารี



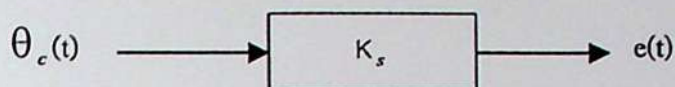
รูปที่ 2.25 โพเทนชิโอมิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแสดงตำแหน่ง

รูปที่ 2.12 แสดงการจัดวงจรเมื่อให้โครงของโพเทนชิโอมิเตอร์เป็นจุดอ้างอิง (กราวด์) เอาท์พุตโวลต์เดจ $e(t)$ จะเป็นสัดส่วนกับตำแหน่งเพลอา $\theta_c(t)$ โรตารี โพเทนชิโอมิเตอร์ $\theta_c(t)$ แสดงถึงค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นเรเดียนหรือองศาตั้งสมการ

$$e(t) = K_\theta \theta_c(t) \quad (2.33)$$

เมื่อ K_θ คือค่าคงที่เมื่อ N คือจำนวนรอบของโพเทนชิโอมิเตอร์ ผลรวมการหมุนเท่ากับ $2\pi N$ เรเดียน ดังนั้น

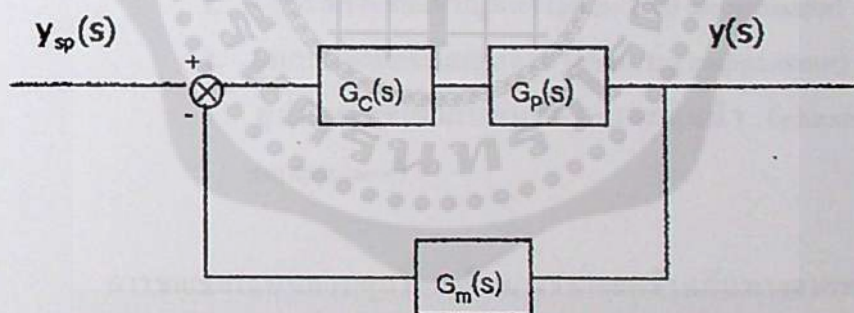
$$K_\theta = \frac{V}{2\pi N} \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.26 บล็อกไดอะแกรมที่ใช้แทนวงจรโพเทนทิโอมิเตอร์

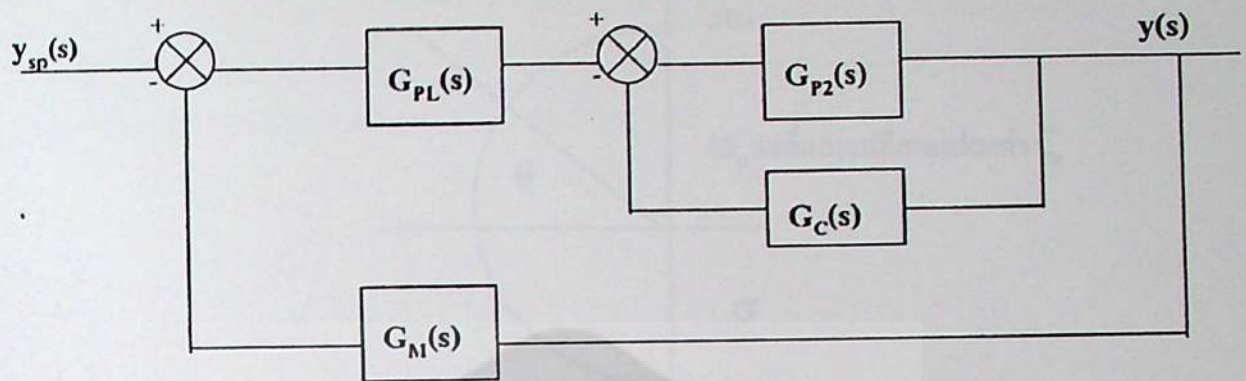
การใช้อุปกรณ์ชดเชยระบบควบคุม

1. การชดเชยแบบอนุกรม (series compensation) อุปกรณ์ชดเชย $G_c(s)$ จะถูกนำมาใช้ต่อเรียงลำดับอนุกรมกับกระบวนการเดิม ในเส้นทางก้ำวหน้าตำแหน่งระหว่างเครื่องวัดกับกระบวนการของระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ชดเชยมีระดับสัญญาณเข้าต่ำกว่าระดับสัญญาณออกเนื่องจากสัญญาณเข้าของอุปกรณ์ชดเชยได้รับจากเครื่องวัดซึ่งมักมีระดับสัญญาณต่ำ และสัญญาณออกของอุปกรณ์ชดเชยจะส่งไปควบคุมกระบวนการจึงต้องมีระดับสัญญาณสูงหรือกำลังของสัญญาณมาก การชดเชยแบบอนุกรมจึงต้องมีอุปกรณ์ปรับสัญญาณเพื่อเพิ่มกำลังสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ชดเชยกับกระบวนการอุปกรณ์ปรับสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการอุตสาหกรรม คือ อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.27 การชดเชยแบบอนุกรม

2. การชดเชยแบบขนาน (parallel compensation) อุปกรณ์ชดเชย $G_c(s)$ จะถูกต่อขนานกับกระบวนการเดิมและทำให้เกิดวงป้อนกลับย่อยในระบบควบคุมเดิมดังแสดงในรูป 2.28 สัญญาณเข้าและสัญญาณออกของอุปกรณ์ชดเชยแบบขนานจะมีระดับใกล้เคียงกับสัญญาณออกและสัญญาณเข้าของกระบวนการเดิม จึงไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ปรับสัญญาณเพิ่มเติมในระบบควบคุมที่มีการชดเชยแบบขนาน

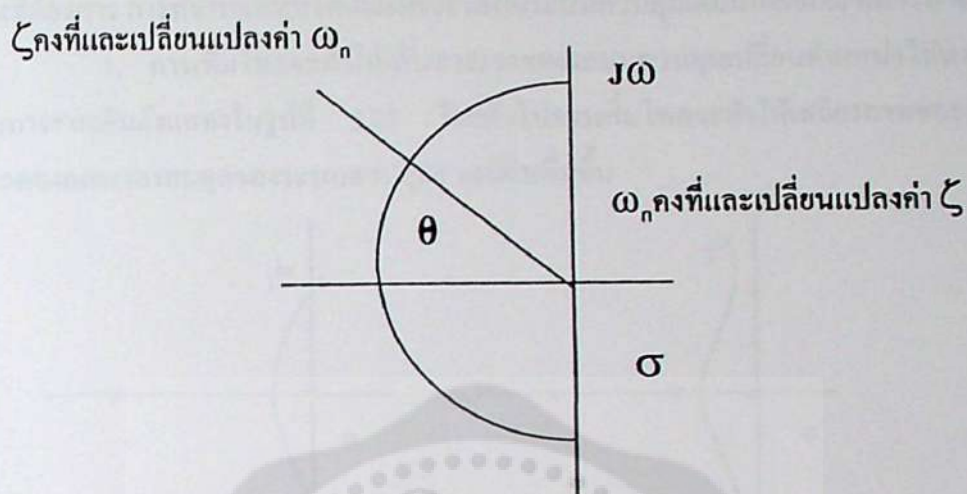


รูปที่ 2.28 การชดเชยแบบขนาน

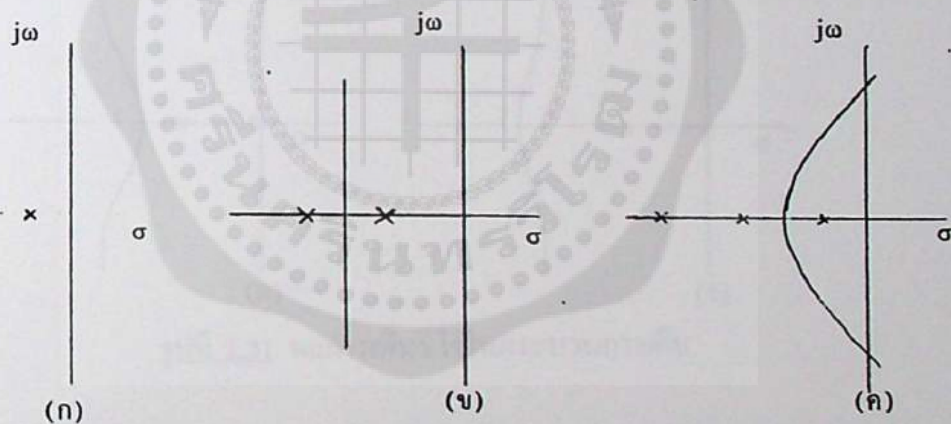
การปรับปรุงคุณสมบัติของระบบควบคุมใช้การชดเชยแบบใดและอุปกรณ์ชดเชยแบบใดขึ้นกับลักษณะของระบบควบคุมและข้อกำหนดและข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติของระบบควบคุมที่ต้องการอุปกรณ์ชดเชยที่ใช้ในระบบควบคุม คือ

1. อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนำ (phase lead compensator)
2. อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตาม (phase lag compensator)
3. อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตามและมูมนำ (phase lag - lead compensator)

การชดเชยระบบควบคุมโดยเส้นทางรากจะสร้างเส้นทางจากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของกระบวนการหรือระบบควบคุมวงเปิดเดิม และพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งรากของสมการคุณลักษณะหรือโพลของระบบควบคุม โดยตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0 ถึง ∞ และพยายามปรับค่าตัวแปรกระบวนการให้โพลของระบบควบคุมอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ โดยที่ระบบควบคุมจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ต้องการมากที่สุด การใช้เส้นทางรากชดเชยระบบควบคุมเหมาะสำหรับควบคุมที่ทราบทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันรวมของกระบวนการทั้งหมดและต้องการกำหนดคุณสมบัติของระบบควบคุมโดยใช้คุณสมบัติของระบบควบคุมที่ต้องการคำนวณค่าอัตราความหน่วง ζ ความเร็วเชิงมุมในการแกว่งแบบมีความหน่วง η หรือความเร็วเชิงมุมในการแกว่งแบบไม่มีความหน่วง η และคำนวณตำแหน่งโพลของระบบควบคุมที่ต้องการโดยใช้ค่า ζ , η และ η ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.25 ผลการเพิ่มโพลในระบบการเดิม



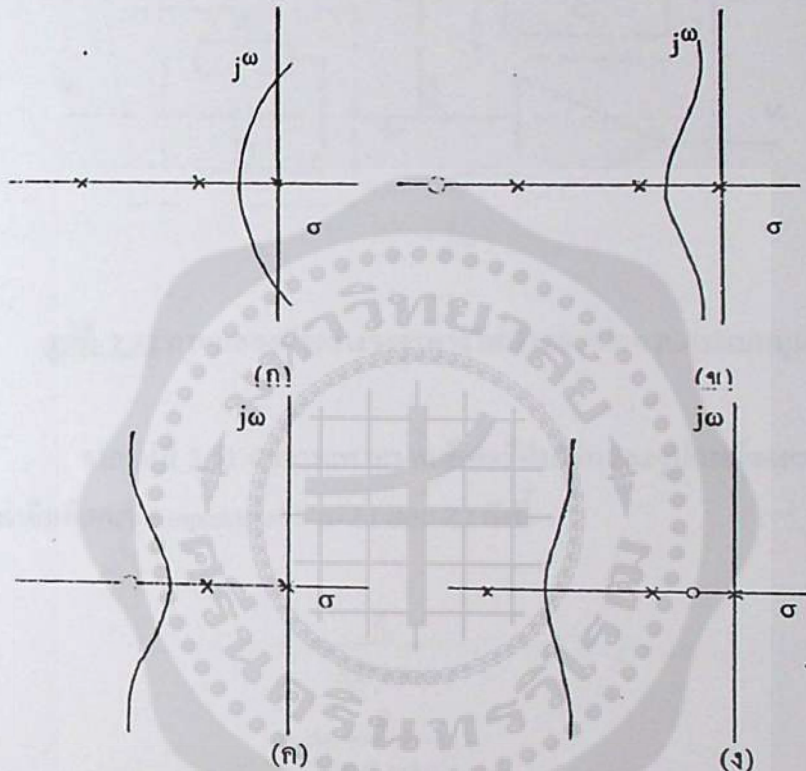
รูปที่ 2.30 ผลการเพิ่มโพลในระบบการเดิม

- (ก) เส้นทางรากเดิม
- (ข) เพิ่มโพล 1 ตำแหน่ง
- (ค) เพิ่มโพล 2 ตำแหน่ง

ถ้าการปรับค่าตัวแปรระบบการเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถที่จะทำให้โพลของระบบควบคุมอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ การปรับปรุงคุณสมบัติของระบบควบคุมโดยใช้เส้นทางรากสามารถทำได้โดยใช้ตัวแปรชดเชยช่วยเพิ่มโพลหรือซีโรให้กับทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบ

ควบคุมวงจรเปิดเดิมและเปลี่ยนทางเดินของเส้นทางรากของระบบควบคุมใหม่ให้ผ่านและอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ การพิจารณาเพิ่มโพลและซีโรให้กับระบบควบคุมเดิมมีหลักเกณฑ์ทั่วไป คือ

1. การเพิ่มโพลจะทำให้เส้นทางรากของระบบควบคุมเปลี่ยนตำแหน่งไปทางขวาของเส้นทางรากเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.27 โดยทั่วไปการเพิ่มโพลจะทำให้เสถียรภาพของระบบควบคุมลดลงและเวลาสมมูลของระบบควบคุมรวมมีค่าเพิ่มขึ้น

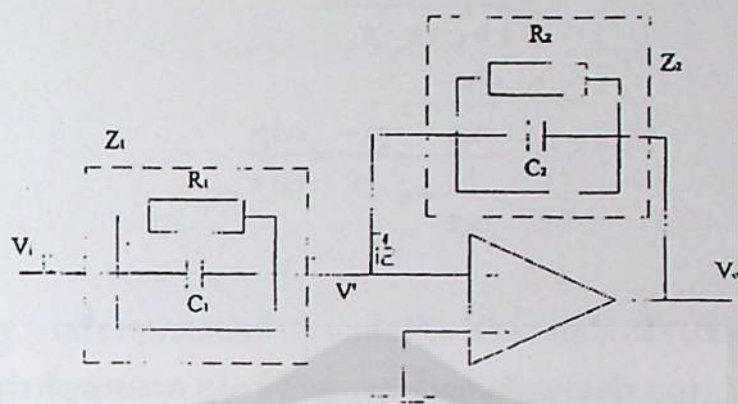


รูปที่ 2.31 ผลการเพิ่มซีโรในกระบวนการเดิม

2. การเพิ่มซีโรจะทำให้เส้นทางของระบบควบคุมเปลี่ยนตำแหน่งไปทางซ้ายของเส้นทางรากดังแสดงในรูป 2.31 โดยทั่วไปจะทำให้เสถียรภาพรวมของระบบควบคุมดีขึ้นและเวลาสมมูลของระบบควบคุมลดลง

อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนำ (Phase lead compensator)

ในการออกแบบชุดได้ใช้ในการควบคุมชดเชยแบบมูมนำ (Phase lead compensator) โดยอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนำจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการตอบสนองชั่วขณะของ



รูปที่ 2.32 ภาพแสดงตัวอย่างวงจรทางไฟฟ้าของการควบคุมแบบมุนำ

จากรูปที่ 2.32 สามารถหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอุปกรณ์ชดเชยแบบมุนำ โดยหาได้จากค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) รวม Z_1 และ Z_2 ดังนี้

$$Z_1 = \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1}$$

และ

$$Z_2 = \frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1}$$

เนื่องจากอิมพีแดนซ์เข้า (input impedance) ของวงจรขยายออปเปอเรชันแนล (operational amplifier) มีค่าสูงมาก กระแส i_1 จึงสามารถประมาณให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแส i_2

$$\frac{V_i(s) - V'(s)}{Z_1} = \frac{V_o(s) - V'(s)}{Z_2} \quad (2.39)$$

เนื่องจาก $V'(s)$ มีค่า 0 จะได้

$$\begin{aligned}\frac{V_o(s)}{V_i(s)} &= \frac{-Z_2}{Z_1} \\ &= \frac{-R_2}{R_1} \frac{R_1 C_1 s + 1}{R_1 C_2 s + 1}\end{aligned}\quad (2.40)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{-C_1}{C_2} \frac{s + \frac{1}{R_1 C_1}}{s + \frac{1}{R_1 C_2}}$$

เครื่องหมายลบหน้าทรานเฟอร์ฟังก์ชันของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมำในสมการ (2.40) แสดงว่า สัญญาณออก $V_o(s)$ มีลักษณะตรงข้ามกับสัญญาณเข้า $V_i(s)$

ถ้าให้

$$T = R_1 C_1$$

$$a = \frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}$$

$$K_c = \frac{R_2}{R_1}$$

จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมำ

$$G_c(s) = K_c \frac{1 + Ts}{1 + aTs} \quad (2.41)$$

โดยอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมำจะต้องมีค่า $R_1 C_1 > R_2 C_2$

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

ลูกตุ้มผกผันเป็นอุปกรณ์ทดสอบระบบควบคุม เพื่อใช้ในการศึกษาและทดสอบระบบควบคุมต่างๆ ในการควบคุมกระบวนการของระบบที่ไม่เสถียร ตัวลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง ประกอบไปด้วย เพลาโลหะสั้นในแนวนอนมีมวลขนาดเท่ากันดั่งที่ปลายทั้งสองข้างสั้นไถลไปมาในรางลูกปืน โดยที่รางลูกปืนนี้ติดอยู่กับปลายข้างหนึ่งของเพลาโลหะแนวดิ่ง ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งของเพลาโลหะแนวดิ่งสามารถตั้งขึ้นได้ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ไปมารอบจุดหมุนเพื่อให้เพลาโลหะในแนวนอนสั้นไถลไปอยู่ในจุดที่ทำให้ระบบสมดุล

การออกแบบโครงสร้าง

ในการออกแบบโครงสร้างของลูกตุ้มผกผันมีส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ เพลาโลหะสั้น (Sliding balance rod) ทำจากเหล็กเจียรในผิว มีมวลถ่วง (Balance Weight) ที่ปลายทั้งสองข้างซึ่งเพลาโลหะสั้น จะเลื่อนไปมาอยู่ภายในรางลูกปืน (Linear Ball Bearing) ติดอยู่กับเพลาโลหะแนวดิ่ง (Pendulum Rod) ที่ปลายอีกข้างของเพลาแนวดิ่งมีมวลถ่วง (Counter weight) โดยเพลาโลหะแนวดิ่งจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เซอร์โว (Servo motor) ให้แกว่งไปมา โดยที่มุมที่แกว่งไปมาจะถูกวัดค่ามุมด้วยเซนเซอร์มุม (Rod Angle Sensor) ส่วนระยะที่เพลาเหล็กโลหะสั้น เลื่อนออกจากตำแหน่งที่สมดุลจะวัดด้วยเซนเซอร์วัดระยะทาง (Shaft Encoder)



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบของลูกตุ้มผกผันสามารถทำได้หลายวิธี ในที่นี้จะเลือกการประยุกต์ใช้หลักการของ สมการลากรานจ์ (Lagrange's Equation) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทางจักรกลที่ซับซ้อน โดยแสดงในรูปของสมการอนุพันธ์

ฟังก์ชันของลากรานจ์เรียกว่า ลากรานเจียน (Lagrangian) เขียนในรูปของ

$$\mathcal{L} = T - P \quad (3.1)$$

เมื่อ

T = ผลรวมของพลังงานจลน์ (Kinetic energy)

P = ผลรวมของพลังงานศักย์ (potential Energy)

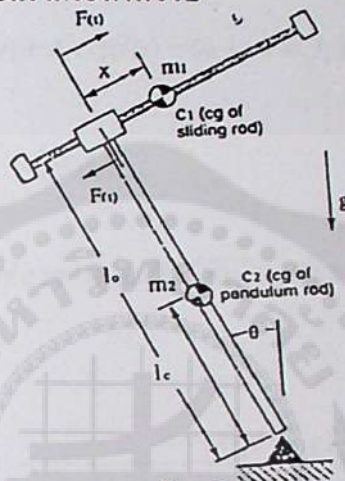
นำไปใช้กับสมการเคลื่อนที่ จะได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \Gamma}{\partial q_i} = Q_i \quad (3.2)$$

เมื่อ

q_i คือตัวแปรที่สนใจที่จะควบคุม

Q_i คือแรงกระทำทั่วไป



รูปที่ 3.2 แผนภาพวัตถุอิสระของลูกตุ้มผกผัน

พิจารณาสมการที่ (x, θ)

จะได้สมการลาการานจ์ของระบบ คือ

$$m_1 \ddot{x}(t) + J_0(x) \ddot{\theta}(t) + m_1 \dot{x}(t) \dot{\theta}^2(t) - m_1 g \sin \theta(t) = F(t) \quad (3.3)$$

$$m_1 \ddot{x}(t) + J_0(x) \ddot{\theta}(t) + 2m_1 \dot{x}(t) \dot{\theta}(t) - (m_1 l_0 + m_2 l_c) g \sin \theta(t) - m_1 g x(t) \cos \theta(t) = 0 \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$J_0(x) = J_1 + m_1 (l_0^2 + x^2) + J_2 + m_2 l_c^2 \quad (3.5)$$

สมการที่ได้เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น มีเทอมของตรีโกณมิติและเทอมของกำลังสอง (quadratic) ถ้าระบบอยู่ในสถานะที่เสถียร θ จะมีขนาดเล็กมาก ดังนั้น $\cos \theta \cong 1$ และ

$\sin \theta \cong \theta$ ซึ่งทำให้ θ และ x มีขนาดเล็กมากเช่นกัน ดังนั้น เทอมกำลังสองจึงไม่ต้องนำมาคิดและให้ใช้การประมาณการเป็นเชิงเส้น (Linearized Dynamic Model) สร้างสมการในรูปของ โดเมนของเวลา ได้

$$m_1 \ddot{x}(t) + m_1 l_0 \ddot{\theta}(t) - mg \theta(t) = F(t) \quad (3.6)$$

$$m_1 l_0 \ddot{x}(t) + J_0^*(x) \ddot{\theta}(t) - (m_1 l_c + m_2 l_0) g \theta(t) - m_2 g x(t) = 0 \quad (3.7)$$

เมื่อ

$$J_0^* = J_0 \big|_{x=0}$$

ใช้การแปลงลาปลาซ แปลงฟังก์ชันในรูปของ โดเมนของเวลาให้ไปอยู่ในรูปของ s-โดเมนได้เป็น

$$\frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{-(l_0 s^2 - g)}{(J_0^* - m_1 l_0^2) s^4 + (m_2 l_0 - m_1 l_c) g s^2 - m_2 g^2} \quad (3.8)$$

แรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มผกผันเป็นแรงที่ได้จาก มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้น ในการหาแบบจำลองที่ถูกต้องจึงต้องรวมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ที่ใช่จะเป็นแบบแม่เหล็กถาวร หรือใช้การควบคุมขดลวดอาร์เมเจอร์

ดังนั้นแรงบิดของมอเตอร์ (T_m) หาได้จาก

$$T_m = K_m i_a \quad (3.9)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์คือ

$$v_a = K_v \omega \quad (3.10)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์

$$V_a - V_b = R_a I \quad (3.11)$$

เมื่อ

 K_m = ค่าแรงที่ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์ (N.m/A) K_b = ค่าคงที่ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความเร็วมอเตอร์ (V.s/rad) T_m = แรงบิดของ DC MOTOR (N.m) V_b = แรงดันย้อนกลับในอาร์เมเจอร์ (V) V_a = แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (V) I_a = กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์และแรงที่ใช้ขับ Pendulum rod คือ

$$T = I_a F \quad (3.12)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นทั้งหมดเราจะได้

$$F = \frac{K_m V_a - K_b K_m \dot{\theta}}{R_a I_a} \quad (3.13)$$

และได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\dot{\theta}$ กับระยะกระจัด x เป็น

$$\dot{\theta} = \frac{\dot{x}}{l_a} \quad (3.14)$$

จากสมการการเคลื่อนที่ทั่วไปของ Inverted pendulum แบบจุดหมุนหยุดนิ่ง

$$m_1 \ddot{x}(t) + m_1 l_a \ddot{\theta}(t) - mg \theta(t) = F(t) \quad (3.6)$$

$$m_1 l_a \ddot{x}(t) + J_a(x) \ddot{\theta}(t) - (m_1 l_a + m_2 l_a) g \theta(t) - m_2 g x(t) = 0 \quad (3.7)$$

แทนค่าสมการแรงที่เกิดจากมอเตอร์ลงไปในสมการการเคลื่อนที่ทั่วไป แล้วจัดรูป

ใหม่ได้

$$\ddot{x}(t) + \frac{K_m K_b}{2m_1 R_a I_a} \dot{x}(t) - \frac{g}{2l_a} x = \frac{K_m}{2m_1 R_a I_a V_a} \quad (3.15)$$

$$\ddot{\theta}_{(1)} + \frac{K_s K_b}{2J^* R_s} \dot{\theta} + g \frac{\left(\frac{m_1 l_o}{2} - m_1 l_c - 2m_2 l_o \right)}{J^*} \theta = -\frac{K_s}{2J^* R_s} v_s \quad (3.16)$$

การออกแบบส่วนประกอบหลัก

ในการออกแบบส่วนประกอบหลักทั้งหมดของลูกคัมผัดแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นทำโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งทำให้ได้รับความสะดวกและได้ค่าต่าง ๆ ดังนั้น

1. เพลาลโลหะแนวตั้ง

ความหนาแน่น :	0.00785	g/mm ³
มวล :	88.781	g
ปริมาตร :	11310	mm ³
พื้นที่ผิว :	7596.4	mm ²
จุดศูนย์กลางถ่วง (มิลลิเมตร) แกน	X = 0	
	Y = 0	
	Z = 200	
โมเมนต์ความเฉื่อย (g*mm ²)	I _{xx} = 1.18395e ⁺⁰⁰⁶	
	I _{yx} = 0	
	I _{zx} = 0	
	I _{xy} = 0	
	I _{yy} = 1.18395 e ⁺⁰⁰⁶	
	I _{zy} = 0	
	I _{zz} = 0	
	I _{yz} = 0	
	I _{zz} = 399.516	

2. เพลาโลหะอื่น

ความหนาแน่น :	0.00785	g/mm^3
มวล :	88.556	g
ปริมาตร :	11281	mm^3
พื้นที่ผิว :	5534.3	mm^2
จุดศูนย์กลางถ่วง (มิลลิเมตร) แกน	$X = 2.6149\text{e}^{-006}$ $Y = -0.0045247$ $Z = 73.919$	
โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{g}\cdot\text{mm}^2$)	$I_{xx} = 168789$	
	$I_{yy} = 0.0198599$	
	$I_{zz} = -0.00211876$	
	$I_{xy} = 0.0198599$	
	$I_{yy} = 168803$	
	$I_{xy} = 29.702$	
	$I_{xz} = -0.00211876$	
	$I_{yz} = 29.702$	
	$I_{zz} = 1133.39$	

3. มวลถ่วง 1

ความหนาแน่น :	0.0082	g/mm^3
มวล :	14.366	g
ปริมาตร :	1751.9	mm^3
พื้นที่ผิว :	1086.3	mm^2
จุดศูนย์กลางถ่วง (มิลลิเมตร) แกน	$X = -0.066184$ $Y = 1.2251\text{e}^{-006}$ $Z = 6$	
โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{g}\cdot\text{mm}^2$)	$I_{xx} = 410.192$ $I_{yx} = -9.44685\text{e}^{-005}$ $I_{xx} = 0.000119$ $I_{xy} = -9.44685\text{e}^{-005}$ $I_{yy} = 404.94$ $I_{zy} = -2.6201\text{e}^{-005}$ $I_{xz} = 0.000119$ $I_{yz} = -2.62014\text{e}^{-005}$ $I_{zz} = 468.744$	

4. มวลถ่วง 2

ความหนาแน่น :	0.0082	g/mm^3
มวล :	14.206	g
ปริมาตร :	1732.5	mm^3
พื้นที่ผิว :	1078.5	mm^2
จุดศูนย์กลางถ่วง (มิลลิเมตร) แกน	$X = 7.0061\text{e}^{-006}$ $Y = 6$ $Z = -0.096715$	
โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{g}\cdot\text{mm}^2$)	$I_{xx} = 398.33$ $I_{yx} = -1.54707\text{e}^{-006}$ $I_{xx} = -0.000457239$ $I_{xy} = -1.54707\text{e}^{-006}$ $I_{yy} = 463.174$ $I_{zy} = -2.52695\text{e}^{-005}$ $I_{xz} = -0.000457239$ $I_{yz} = -2.52695\text{e}^{-005}$ $I_{zz} = 405.896$	

5. ชิ้นประกอบ

ความหนาแน่น : 0.00114 g/mm^3

มวล : 31.265 g

ปริมาตร : 27425 mm^3

พื้นที่ผิว : 9850.5 mm^2

จุดศูนย์กลาง (มิลลิเมตร) แกน $X = -0.031246$

$Y = 0.00072221$

$Z = -7.5477 \times 10^{-5}$

โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{g} \cdot \text{mm}^2$) $I_{xx} = 10152.7$

$I_{yx} = -0.1922$

$I_{zx} = 0.000107876$

$I_{xy} = 0.01922$

$I_{yy} = 10232.7$

$I_{xy} = -0.00275227$

$I_{xz} = 0.000107876$

$I_{yz} = -0.00275277$

$I_{zz} = 3230.99$

การคำนวณขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

กำหนดให้การขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มุม $\pm 10^\circ$ ดังนั้นมีค่า $\theta = 20^\circ$ ภายในเวลา 50 มิลลิวินาที

$$t_r + t_d = 50 \text{ ms.}$$

$$t_r = t_d = 25 \text{ ms.}$$

$$\theta = 20^\circ = 20^\circ \left(\frac{2\pi}{360^\circ} \right) = 0.350 \text{ radians.}$$

$$\left(\frac{1}{2} \right) (t_r + t_d) (\omega_{\max}) = \theta$$

$$(0.025) \omega_{\max} = 0.350$$

$$\omega_{\max} = 13.96 \text{ rad/s}$$

$$= 133.33 \text{ rpm.}$$

$$a = \frac{\omega_{\max}}{t_r} = \frac{13.96}{25 \times 10^{-3}} = 558.4 \text{ rad/s}^2$$

$$d = \frac{\omega_{\max}}{t_d} = \frac{13.96}{25 \times 10^{-3}} = 558.4 \text{ rad/s}^2$$

Ball Bearing ($\mu = 0.003$)

Load = 0.500 g.

$$= 4.905 \text{ N.}$$

$$T_f = 4.905 \times 0.003 \times 0.25 = 3.678 \times 10^{-3} \text{ N.m.}$$

$$T_L = 4.905 \times 0.25 = 1.22625 \text{ N.m.}$$

$$J_f = 1.4163 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$$

$$a = 558.4 \text{ rad/s}^2$$

$$d = 558.4 \text{ rad/s}^2$$

ช่วงเวลาเร่ง = 0.025 s.

ช่วงเวลาหน่วง = 0.025 s.

$$\omega_{\max} = 13.96 \text{ rad/s}$$

$$\text{ระยะกระจัดเชิงมุม} = 0.350 \text{ radian.}$$

$$\text{เวลา 1 รอบ} = t_c = 50 \text{ ms.}$$

สำหรับช่วงเร่ง

$$T_{\text{peak}} = T_L + T_r + T_v + J_s$$

$$\begin{aligned} T_{\text{peak}} &= 1.22625 + 3.678 \times 10^{-3} + 0 + \{(1.416 \times 10^{-3} \times 558.4)\} \\ &= 2.02062 \text{ N.m.} \end{aligned}$$

สำหรับช่วงหน่วง

$$\begin{aligned} T_{\text{peak}} &= 1.22625 + 3.678 \times 10^{-3} \{(1.416 \times 10^{-3} \times 558.4)\} \\ &= 0.439 \text{ N.m.} \end{aligned}$$

เพื่อความผิดพลาด 20%

$$\begin{aligned} T_{\text{peak}} &= 2.02062 \times 1.2 \\ &= 2.424744 \text{ N.m. (acc.)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{peak}} &= 0.439 \times 1.2 \\ &= 0.5268 \text{ N.m. (dec.)} \end{aligned}$$

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{(2.424744)^2 (0.025) + (0.5268)^2 (0.025)}{0.5}}$$

$$T_{\text{rms}} = 0.55483 \text{ N.m.}$$

ดังนั้นเราจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีค่า $T_{\text{peak}} > 2.424744 \text{ N.m.}$

$$T_{\text{cont}} > 0.5268 \text{ N.m.}$$

การคำนวณพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ในการสร้าง วัฏภูมิที่เที่ยงแทนไปเมื่ออุกรากวนเราจะใช้ potentiometer 10 turn โดยวงจรไฟฟ้า มีศักย์ไฟฟ้า ± 15 Volts

เราคิด Maximum gain จาก

$$15V \rightarrow 1800^\circ (5\text{turn})$$

$$1^\circ \rightarrow \frac{15}{1800} = 0.0083\text{volts}$$

$$\text{ช่วงองศาในการเลี้ยว } 5^\circ = 5 \times 0.0083 = 0.041$$

แต่ gain สามารถขยายได้ไม่เกิน 15 V เนื่องจากวงจรของเรากำหนดให้มีไฟอยู่ใน

ช่วง $\pm 15V$

$$\therefore \text{maximum gain} = \frac{15}{0.041} = 365$$

ค่าเกณฑ์เราจะใช้จะต้องไม่เกินค่านี้

การออกแบบ controller

จากสมการ (3.5)

$$F(t) = m_1 \ddot{x}_{(t)} + m_1 l_0 \ddot{\theta}_{(t)} - mg \theta_{(t)}$$

และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชิงมุมและปริมาณเชิงเส้น

$$\theta = \frac{x}{l_0}, \ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}}{l_0}$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\therefore F(t) = m_1 \ddot{x}(t) + m_1 l_0 \frac{\ddot{x}}{l_0}(t) - mg \frac{x(t)}{l_0}$$

Take Laplace ได้

$$m_1 s^2 x(s) + m_1 s^2 x(s) - \frac{mg}{l_0} x(s) = F(s)$$

$$X(s) \left\{ 2m_1 s^2 - \frac{mg}{l_0} \right\} = F(s)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \left(2m_1 s^2 - \frac{mg}{l_0} \right)$$

(3.17)

แทนค่าตัวแปรที่ทราบค่าลงไป

$$m_1 = 0.153 \text{ kg.}$$

$$m_2 = 0.785 \text{ kg.}$$

$$m = 0.953 + 0.0785 = 0.2315 \text{ kg.}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$l = 0.2 \text{ m}$$

สมการ (3.17) จะเป็น

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{\left(2(0.153)s^2 - \frac{(0.2315)(9.81)}{0.2} \right)}$$

$$= \frac{1}{0.306s^2 - 11.355}$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{(s - 6.09)(s + 60.09)}$$

∴ Transfer function ได้

$$Gp(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{(s - 6.09)(s + 60.09)}$$

พิจารณาสมการ Lead Compensator จากสมการ (2.42)

$$Gc(s) = \frac{1 + aTs}{1 + Ts}, \tau = \frac{d}{a}$$

โดย $d = \frac{1}{x} = \frac{1}{6.09} = 0.1640$ (ค่า X คือ โพลของระบบ)

a จะพิจารณาหาได้โดยทำการ simulation ด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยวิธี Trial & Error โดยกำหนด $\zeta = 0.7$ และ Settling Time ไม่เกิน $\pm 2\%$ พบว่าค่า a ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ a = 4 แทนค่า

$$Gc(s) = \frac{(1 + ds)}{d} \left[1 + \frac{d}{4}s \right]$$

$$Gs(s) = \frac{4(s + 6.09)}{(s + 24.36)}$$

∴ พิจารณา transfer function รวมทั้งระบบ

$$G_p G_c(s) = \left[\frac{1}{(s-6.09)} \right] \left[\frac{4}{(s+24.36)} \right]$$

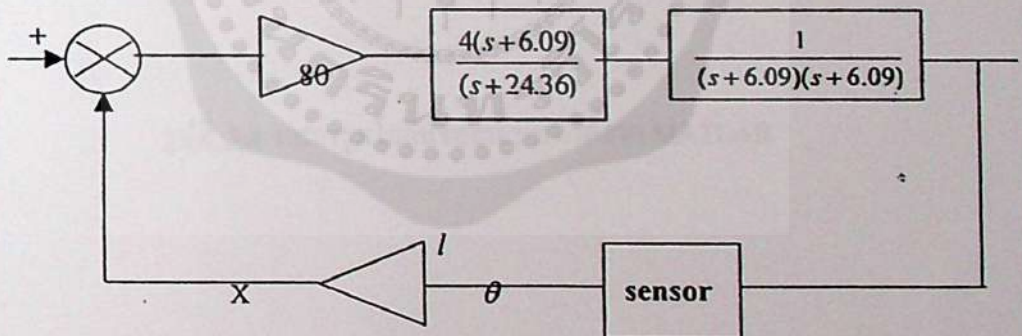
$$= \frac{4}{(s-6.09)(s+24.36)}$$

นำ Transfer function รวมทั้งระบบ Simulation ใน MATLAB โดยพิจารณาทางเดินของราก ตัดกับเส้น $\zeta = 0.7$ จะได้ค่าเกนรวมของระบบ = 316.7 แต่ถ้าเราพิจารณาค่า gain ใน transfer function ของ Plant และ Compensator พบว่ามีค่า = 4 นั้นหมายความว่าค่าเกนที่ได้จากการ Simulation เกิดจากผลคูณของค่าเกนของ plant และ controller ดังนั้นค่า gain จริง ๆ ที่ควรใส่เข้าระบบเป็น

$$\frac{316.7}{4} = 79.175$$

$$\approx 80$$

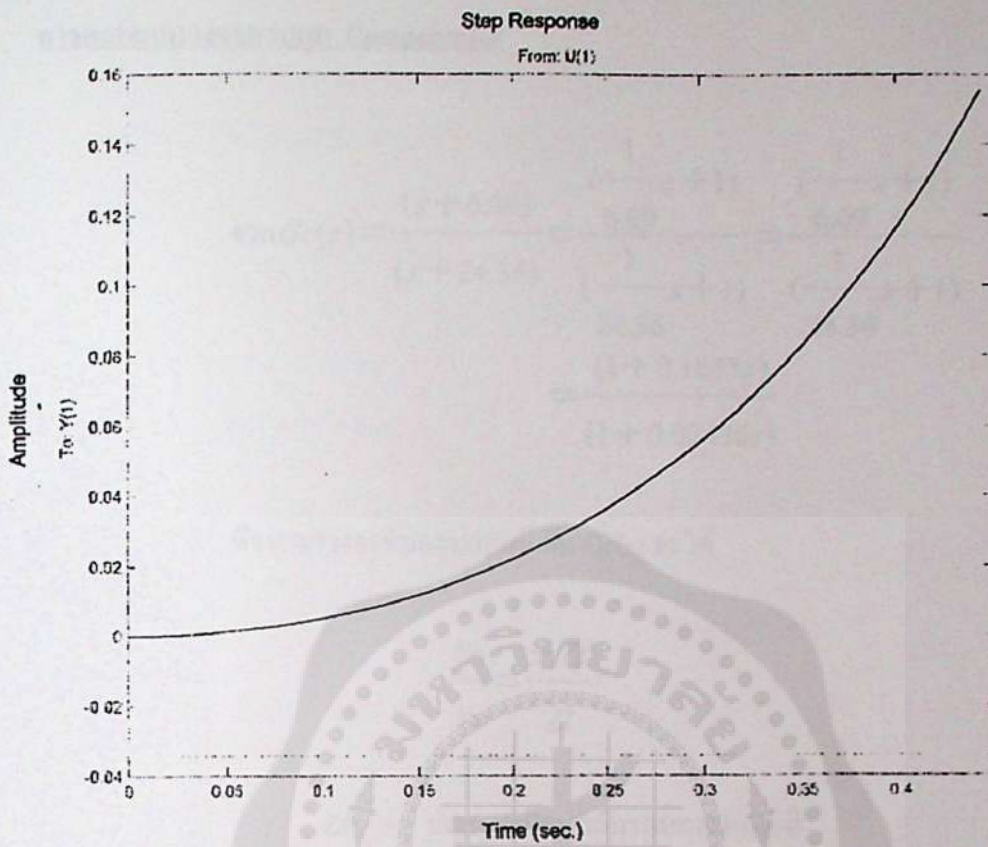
เราสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมดังนี้



รูปที่ 3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ



รูปที่ 3.4 แสดงรูตโลกซ์ของระบบที่ได้จาก MATLAB



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองที่ได้จากการ simulation เมื่อยังไม่มีตัวควบคุม

การออกแบบวงจรรักษา Compensator

$$\begin{aligned} \text{จาก } G_c(s) &= \frac{(s + 6.09)}{(s + 24.36)} = \frac{\left(\frac{1}{6.09}s + 1\right)}{\left(\frac{1}{24.36}s + 1\right)} = \frac{\left(\frac{1}{6.09}s + 1\right)}{\left(\frac{1}{24.36}s + 1\right)} \\ &= \frac{(1 + 0.1645s)}{(1 + 0.02436s)} \end{aligned} \quad (3.18)$$

พิจารณาวงจรรักษาแบบป้อนกลับกับ $G_c(s)$ จะได้

$$\frac{V_o}{V_c} = \frac{-Z_f}{Z_i} \quad (3.19)$$

Z_f = สัญญาณป้อนกลับรอบออปแอมป์

Z_i = สัญญาณระหว่างโวลท์หน้า V_c กับจุด i ,

ดังนั้นการต่อขนาดตัวต้านทาน R กับตัวเก็บประจุ C จะได้

$$\frac{1}{Z_i} = \frac{1}{R} + C_i s = \frac{1 + R C_i s}{R}$$

$$\frac{1}{Z_f} = \frac{1}{R} C_f s = \frac{1 + R C_f s}{R}$$

แทนค่าในสมการ (3.18) จะได้

$$\frac{V_o}{V_c} = \frac{1 + R C_i s}{1 + R C_f s} \quad (3.20)$$

หาตัวต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C แทนในสมการ (3.20)

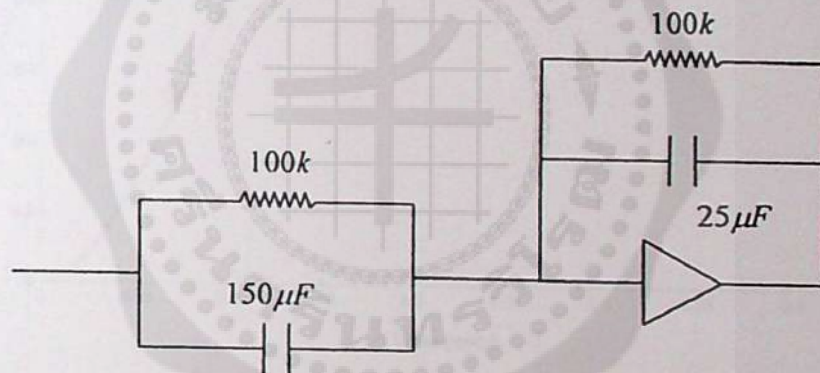
ให้มีค่าเท่ากับสมการ (3.18) ในที่นี้ให้

$$R_{c_1} = 100 \times 10^3 \times 164 \times 10^{-6} = 0.16 \text{ วินาที}$$

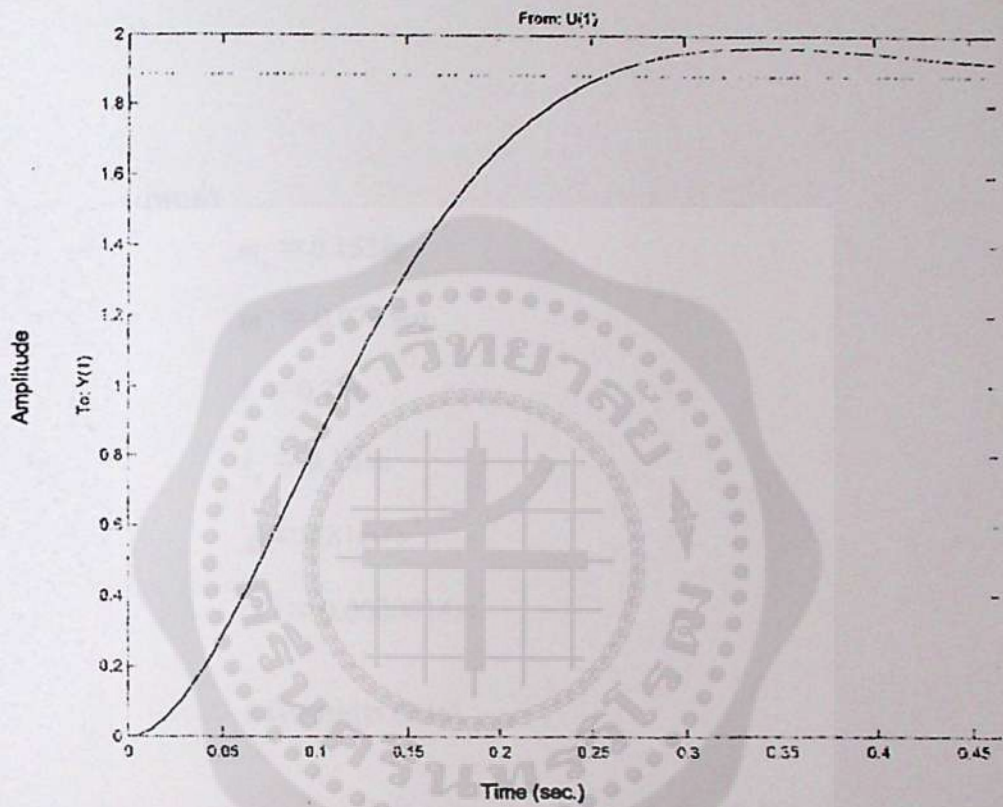
$$R_{c_2} = 100 \times 6 \times 0.24 \times 10^{-6} = 0.024 \text{ วินาที}$$

ดังสมการ (3.20)

$$\frac{V_o}{V_c} = \frac{1 + 0.164}{1 + 0.024s} \quad (\text{แต่เนื่องจากค่า } C \text{ ในทางปฏิบัติไม่มีจึงใช้ค่าดังนี้})$$



รูปที่ 3.6 แสดงวงจร compensator ที่คำนวณได้



รูปที่ 3.7 แสดงการตอบสนองจากการ simulation เมื่อเพิ่มชุดควบคุมในระบบ

จากสมการ (3.16)

$$\frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{-(ls^2 - g)}{(J_o - ml_o^2)s^4 + (m_1l_o - m_1l_c)gs^2 - m_1g^2}$$

แทนค่า

$$m_1 = 0.153 \text{ kg.}$$

$$m_2 = 0.0785 \text{ kg.}$$

$$l_o = 0.2 \text{ m.}$$

$$l_c = 0.15 \text{ m.}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$J' = 0.0000014 \text{ m}^4$$

ลงในสมการ (3.16)

$$\frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{-(0.2s^2 - 9.81)}{(-0.00611s^4 + 0.184s^2 - 7.5545)}$$

$$= \frac{(s-7)(s+7)}{(-0.00611s^4 + 0.184s^2 - 7.5545)}$$

ทำการแยก factor $(-0.00611s^4 + 0.184s^2 - 7.5545)$ ด้วย $(s-7)(s+7)$

ได้ $(-0.00611s^4 + 0.184s^2 - 7.5545) = (s-7)(s+7)(-0.00611s^2 + 0.184)$

$$\therefore \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{(s-7)(s+7)}{(s-7)(s+7)(-0.00611s^2 + 0.184)}$$

$$\therefore \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{1}{(s - 5.48)(s + 5.48)}$$

$\therefore$ Transfer function ได้

$$G_p(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{1}{(s - 5.48)(s + 5.48)}$$

พิจารณาสมการ Load Compensater

$$G_c(s) = \frac{1 + aTs}{1 + Ts}; T = \frac{d}{a}$$

ทำการ สมมติค่า a โดยใช้ Matlab โดยหาจาก Maximum gain = 360

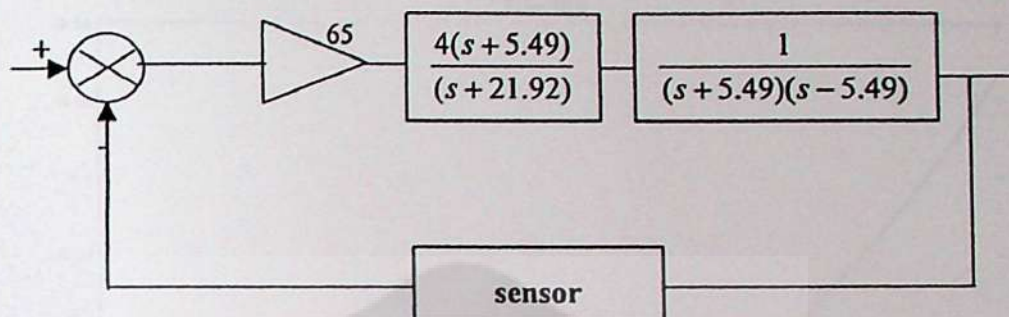
$$d = \frac{1}{5.48} = 0.1824$$

แทนค่า

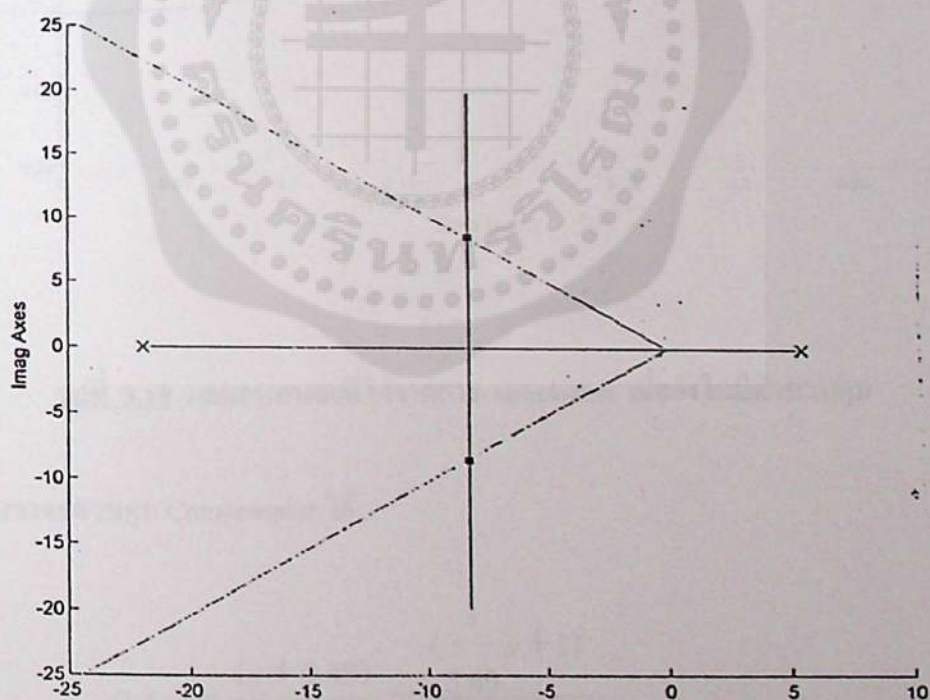
$$G_c(s) = \frac{10(s + 5.48)}{(s + 21.92)}$$

นำ transfer function รวมทั้งระบบ Simulation ในโดยพิจารณาทางเดินของราก ตัดกับเส้น $\zeta = 0.7$ จะได้ $k=260$ แต่ถ้าพิจารณาค่า gain ใน transfer function ของ plant และ Compensator พบว่ามีค่า = 4 ดังนั้นค่า gain จริง ๆ มีค่าเท่ากับ

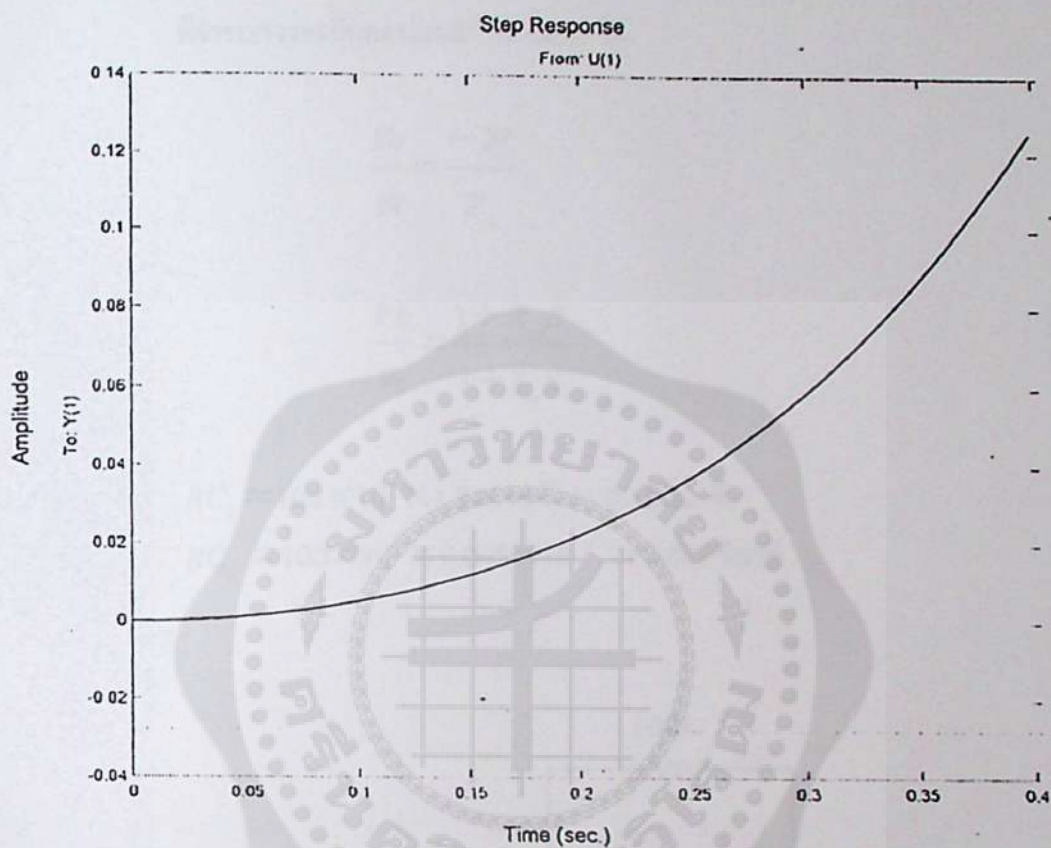
$$k = \frac{260}{4} = 65$$



รูปที่ 3.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ออกแบบได้



รูปที่ 3.9 แสดงรูตโกล์ทักซ์ของระบบที่ได้จากการ simulation



รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองที่ได้จากการ simulation เมื่อยังไม่มีตัวควบคุม

ออกแบบวงจรควบคุม Compensator ได้

จาก

$$G_c(s) = \frac{(s + 5.49)}{(s + 21.92)} = \frac{\frac{1}{5.49}(-s + 1)}{\frac{1}{21.92}(-s + 1)}$$

$$= \frac{(1 + 0.1821s)}{(1 + 0.04565s)}$$

$$= 57$$

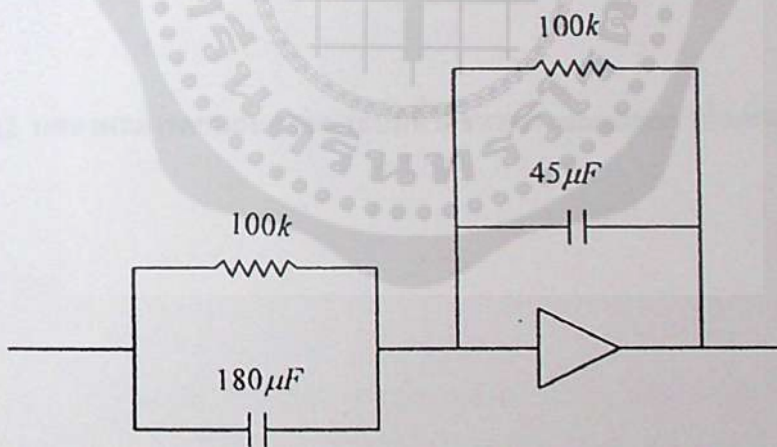
พิจารณาวงจรเข้าเอาต์พุตกับ $G_c(s)$ ได้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-Z_f}{Z_i}$$

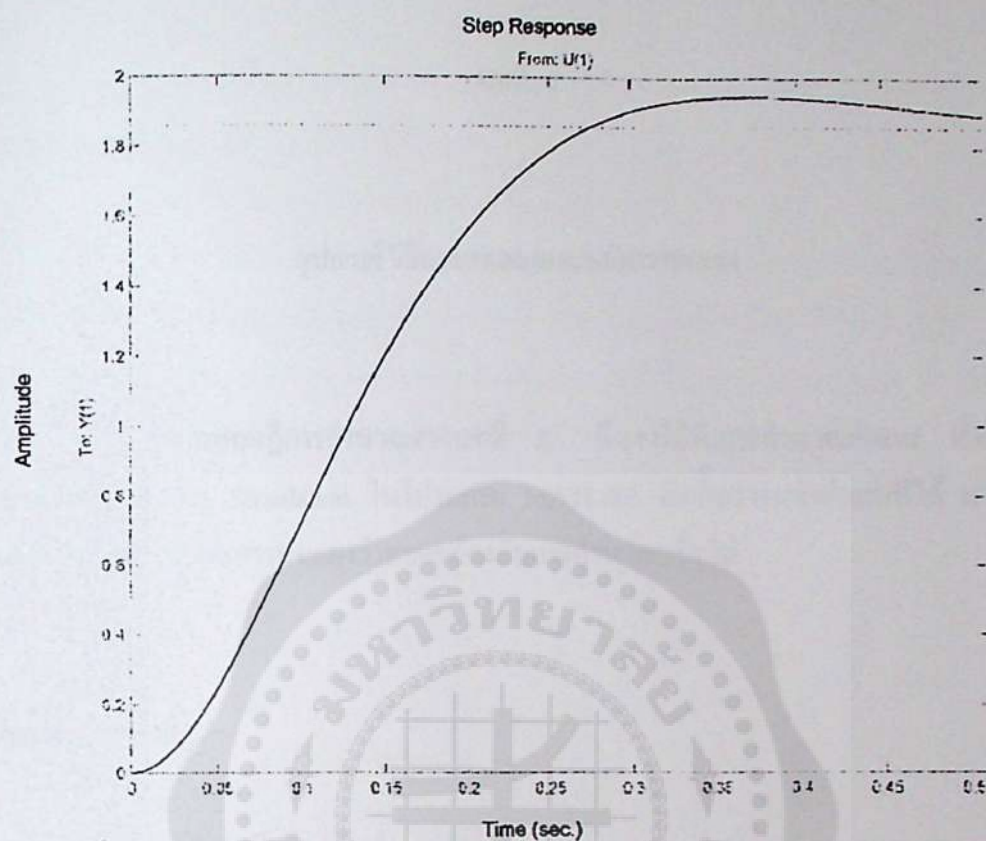
$$\frac{V_o}{V_c} = \frac{1 + R_{ci}S}{1 + T_{ci}S}$$

$$RC_i = 100 \times 10^3 \times 1.8 \times 10^{-6} = 0.18 \text{ วินาที}$$

$$RC_f = 100 \times 10^3 \times 0.045 \times 10^{-6} = 0.045 \text{ วินาที}$$



รูปที่ 3.11 แสดงวงจร compensator ตามที่คำนวณได้



รูปที่ 3.12 แสดงผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการ simulation เมื่อเพิ่มชุดควบคุมในระบบ

บทที่ 4

อุปกรณ์ วิธีการทดลองและผลการทดลอง

จากทฤษฎีการคำนวณจากบทที่ 3 ซึ่งเราได้ทำการคำนวณค่าเกณฑ์ที่จะทำให้ระบบเสถียร โดยการ Simulation ในโปรแกรม MATLAB ดังนั้นเราจะนำค่าเกณฑ์ที่ได้ มาทำการทดลองเพื่อพิจารณาผลการทดลองว่าสอดคล้องกับการคำนวณหรือไม่

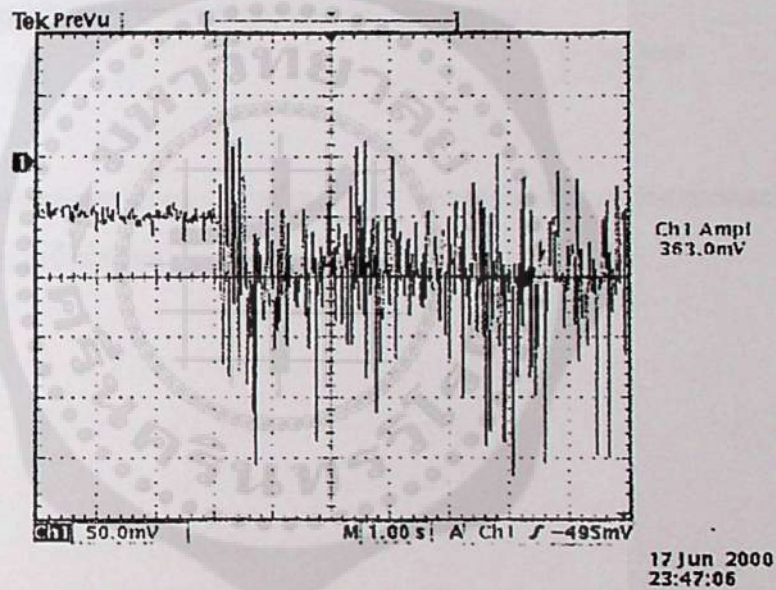
อุปกรณ์การทดลอง

1. ออสซิลโลสโคป
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 2 ชุด
3. มัลติมิเตอร์
4. ชุดทดลองถูกดัดแปลงแบบจุดหมุนหยุดนึ่ง

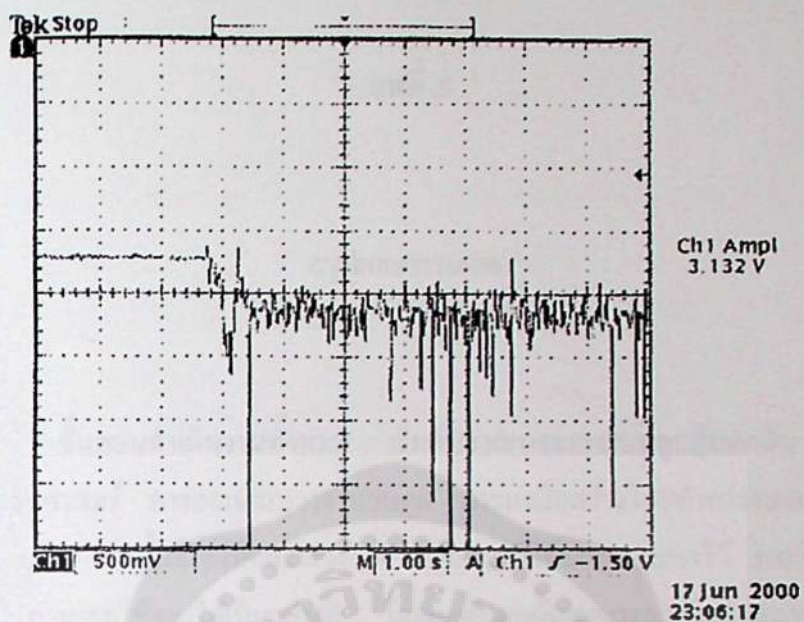
วิธีการทดลอง

1. ต่อไฟเลี้ยงจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่โพเทนชิโอมิเตอร์ โดยให้สายสีแดงต่อเข้าขั้วบวก สายดำต่อเข้าขั้วลบ สายสีขาวเป็นสายสัญญาณ ต่อเข้ากับช่อง Input ที่วงจรควบคุม
2. ต่ออุปกรณ์ชดเชยที่แสงวงจรควบคุม compensator
3. ต่อสายไฟจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเข้าสู่ชุดควบคุม โดยให้แหล่งจ่ายไฟทั้งสองเป็นชุดอนุกรมโดยใช้กราวด์ร่วมกัน โดยทั้งไฟเลี้ยงวงจรและชุดขับเคลื่อนต่อที่ ± 15 โวลต์ เท่ากัน
4. ต่อสายสัญญาณจากชุดควบคุมเข้าสู่อินพุทของวงจรขับเคลื่อน
5. ต่อไฟเลี้ยงมอเตอร์จากวงจรขับเคลื่อน

6. เปิดแหล่งจ่ายไฟ ปรับค่า a ให้มีค่าเป็น 4 เท่าของอินพุต X ปรับค่าเกนให้มีค่า 80 แต่สำหรับอินพุต θ เราใช้ค่าเกนเป็น 65
7. ปรับ set point โดยตั้งแกนลูกคัมผกผันให้อยู่ตรงกลาง
8. ใช้ฮอสซิลโลสโคป จับสัญญาณโดยเริ่มจากการรบกวนระบบก่อน จากนั้นจึงปล่อยให้ระบบกลับสู่สถานะสมดุลด้วยตัวเอง ได้ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยการทดลองอินพุต X ที่ค่าเกนของระบบ 80 และอินพุต θ ที่ค่าเกนของระบบเป็น 65 ตามลำดับ โดยใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบและสร้างไว้สำหรับอินพุตแต่ละอย่าง



รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่า X ของระบบขณะรบกวนและขณะที่ระบบเข้าสู่สมดุล



รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่า θ ของระบบขณะรบกวนและขณะที่ระบบเข้าสู่สมดุล

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ขั้นตอนดำเนินงานทั้งหมด เริ่มต้นจากการออกแบบลูกตุ้มผกผัน การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบวงจรควบคุม การลงมือสร้างโดยทำการทดลอง simulation บนคอมพิวเตอร์ จากนั้นจึงลงมือสร้างวงจรควบคุมตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ พบว่าการออกแบบพารามิเตอร์ สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยลูกตุ้มผกผันสามารถกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เองเมื่อมีการรบกวน จากผลการทดลองในบทที่ 4 เราจะเห็นว่า ระยะ X สามารถทำให้กลับสู่จุด set point ได้ดีในระดับหนึ่ง ระบบตอบสนองด้วยการพยายามจะเลี้ยง Sliding rod ให้อยู่กึ่งกลางให้ได้ แต่ก็ยังไม่อยู่กึ่งกลางเสียทีเดียวได้ จึงไม่มีการตัดไฟของเพาเวอร์ซัพพลาย สันนิษฐานว่าสาเหตุอาจเนื่องมาจาก ความเสียดทาน ที่มีอยู่ใน Sliding rod ซึ่งเริ่มมีสั่นเกิดขึ้นเล็กน้อย ส่วนอินพุตที่เป็น θ นั้น สามารถเลี้ยงให้ Pendulum rod ตั้งตรงอยู่ได้โดยไม่สนใจว่า Sliding rod จะถูกเลี้ยงให้อยู่จุดกึ่งกลางหรือไม่ ซึ่งเป็นไปตามจุดประสงค์ของการออกแบบ อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น คณะผู้จัดทำสรุปว่าอาจเกิดจาก

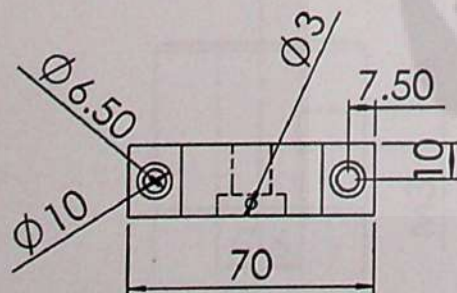
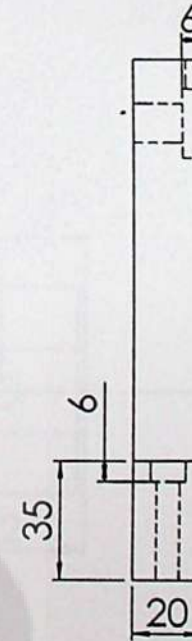
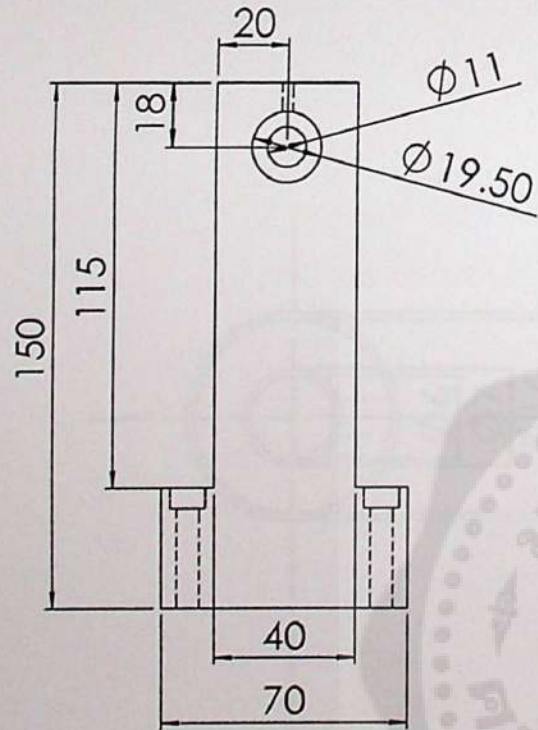
1. การสมมติให้ระบบมีแรงเสียดทานน้อยมาก
2. ระบบควบคุมมีสัญญาณรบกวนมาก
3. อุปกรณ์วัดมุมมีค่าละเอียดมากเกินไป
4. ขาดความชำนาญในการต่อวงจรไฟฟ้า

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลอง ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีโดยให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน ขั้นตอนที่ยากและละเอียดอ่อนที่สุดก็คือการต่อวงจร op-amp ให้ได้ตรงตาม ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบตามที่ต้องการ

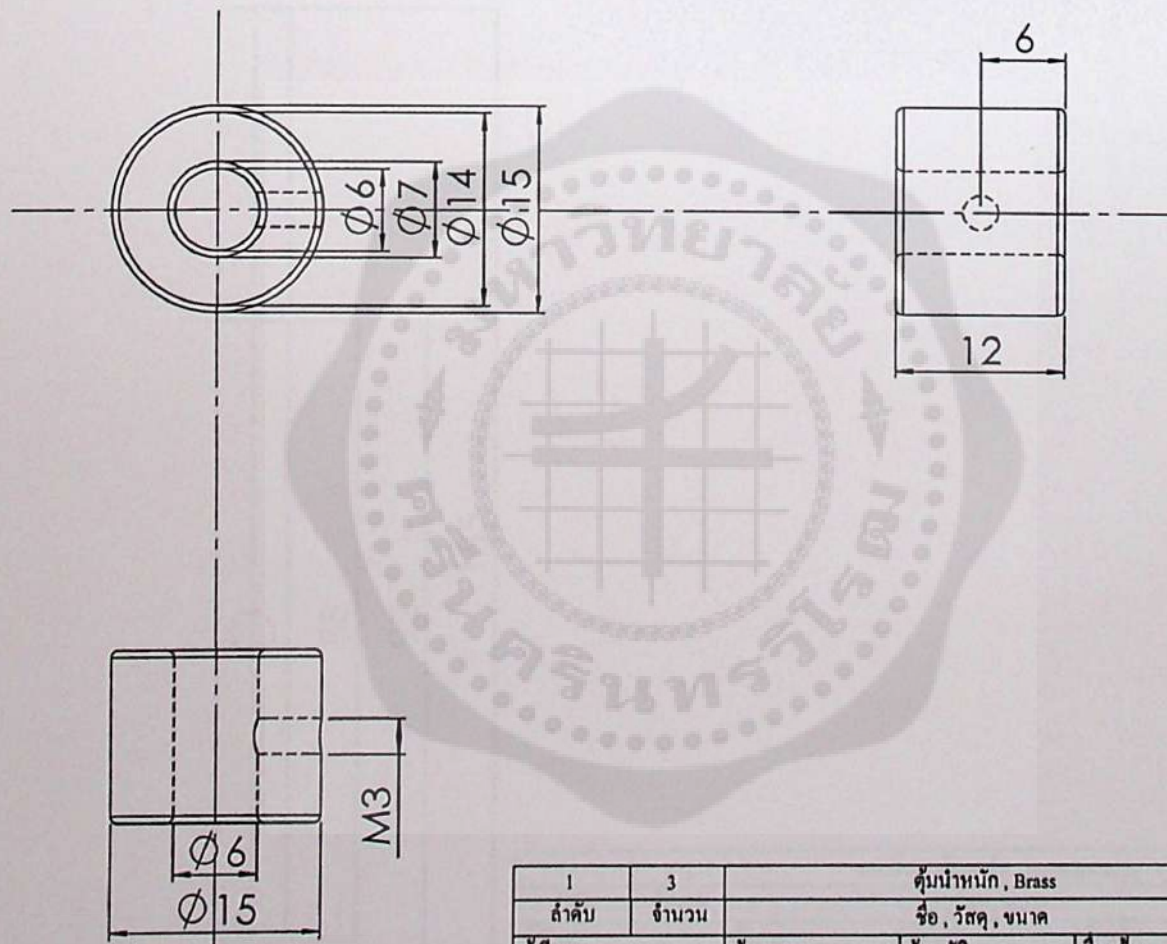
บรรณานุกรม

1. ชวพงศ์ สิงห์แพทย์, เป็รื่องบุญ จักกะพาก และ วุฒิชัย กปิลกาญจน์, การควบคุมอัตโนมัติ, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2531
2. ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, คู่มืออิเล็กทรอนิกส์, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ซีเอ็ดเซ็นเตอร์, 2538
3. สถาพร อุดมสิน และ ศราวุธ โพธิยา, การควบคุมลูกตุ้มผกผัน, วิศวกรรมสาร มข ปีที่ 25 ฉบับที่ 3, ขอนแก่น : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2541
4. สุวลัย กลั่นความดี, ระบบควบคุม, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
5. American Precision Industries, Precision Motor Control, American Precision Industries Inc.
6. Donald R. Arkeland, The Science and Engineering of Material, Great Britain, Chapman & Hall, 1996
7. Glentek, Servo Amplifier and Servo Motor Products, Glentek Inc.
8. M.J. Neale, Bearing, Butterworth-Heinemann Ltd., Scotland, 1993
9. M.J. Neale, Lubrication, Butterworth-Heinemann Ltd., Scotland, 1993
10. Robert C. Juvinall, Kurt M. Marshek, Fundamental of Machine Component Design, Canada, John Wiley & Son, 1993

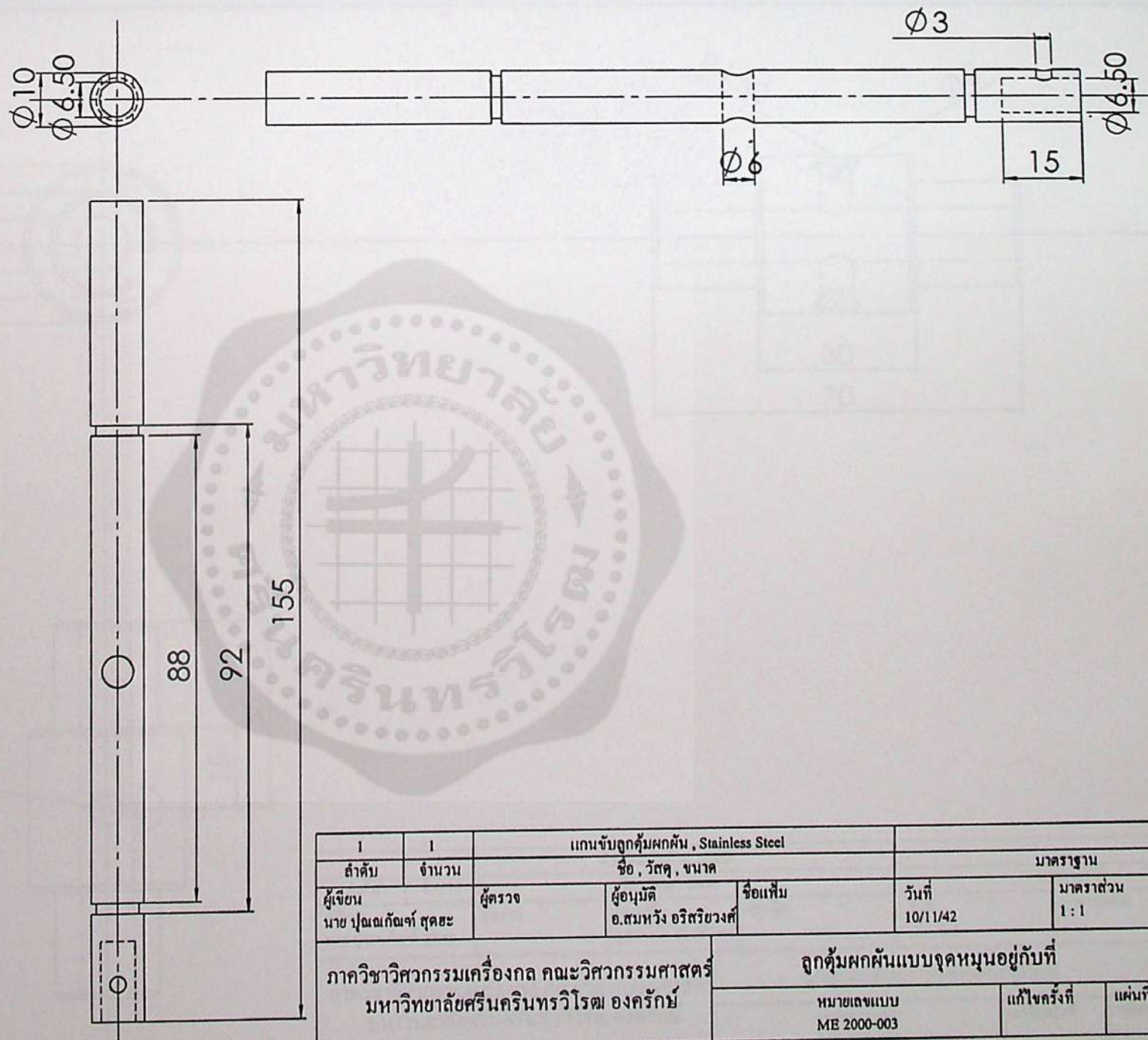




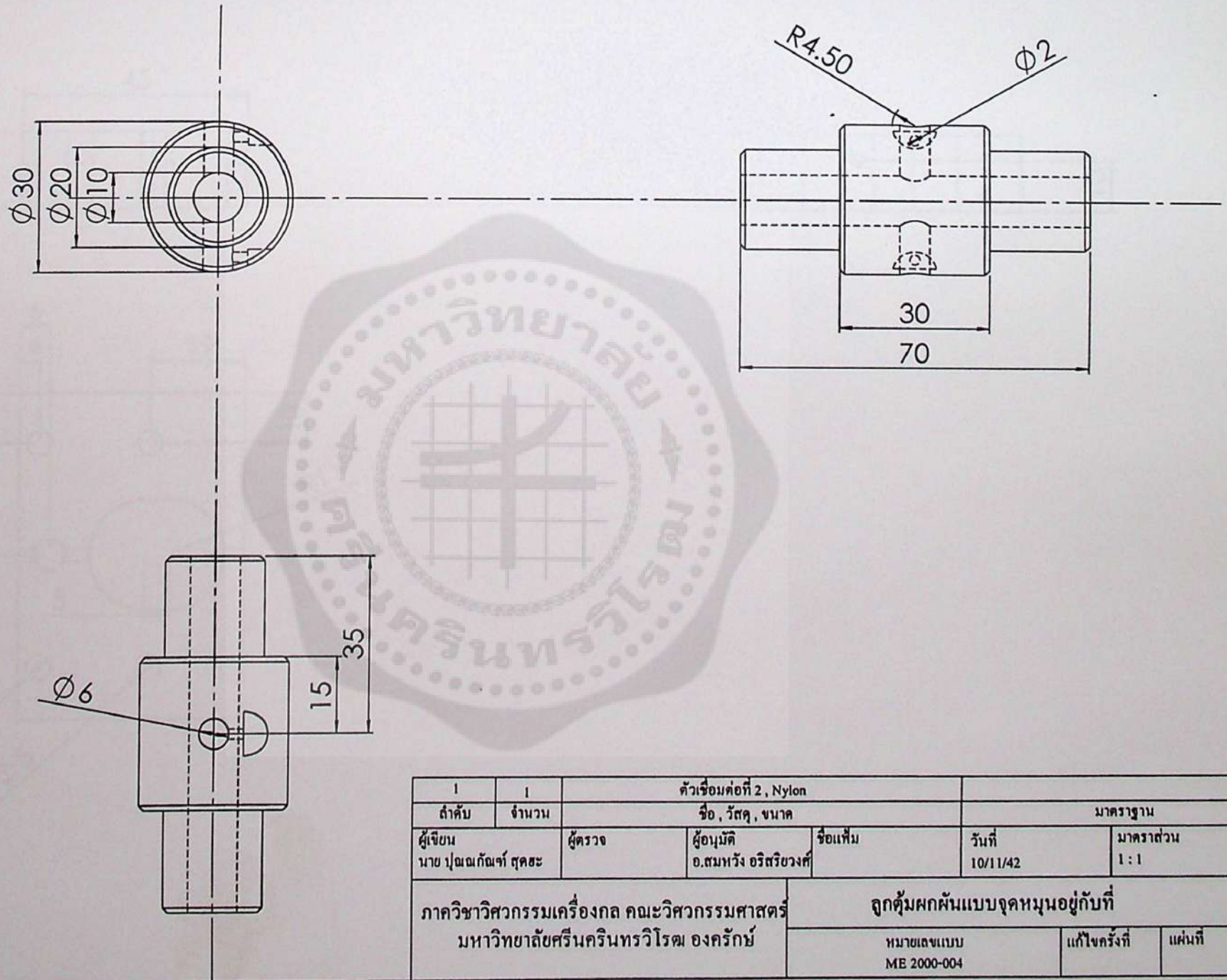
1	2	ฐานยึดลูกตุ้มผกผัน, Aluminium		มาตรฐาน	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด		มาตราส่วน	
ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	ชื่อเพิ่ม	วันที่	มาตราส่วน
นาย ปุณณกันต์ ฤทธะ		อ.สมหวัง อริสริวงค์		10/11/42	1 : 2
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			ลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนอยู่กับที่		
			หมายเลขแบบ ME 2000-001	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



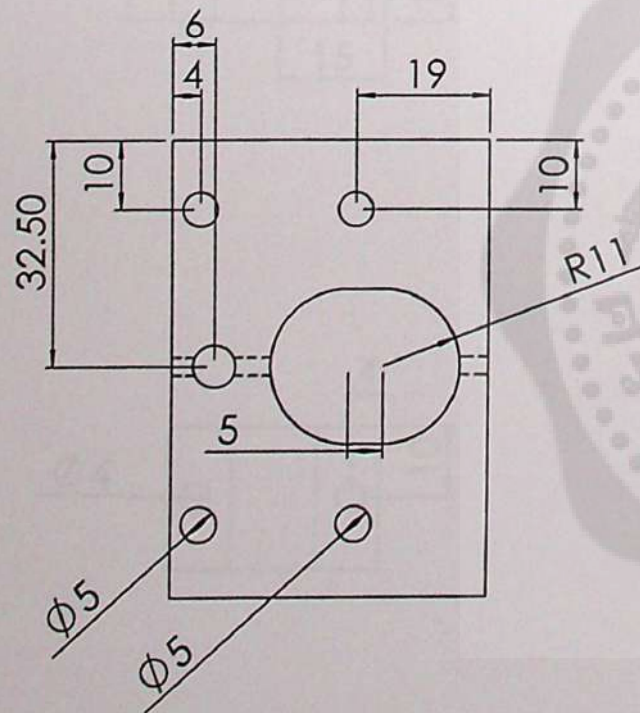
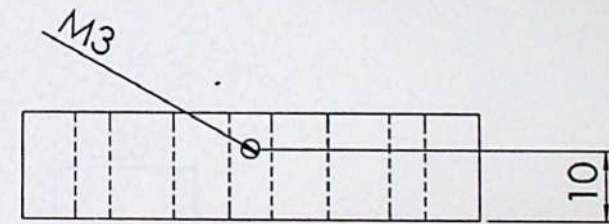
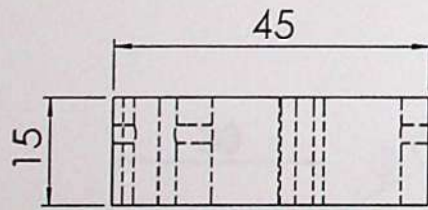
1	3	ตึมน้ำหนัก, Brass		มาตรฐาน	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด		มาตราส่วน	
ผู้เขียน นาย ปุณณกันต์ สุคตะ	ผู้ตรวจ	ผู้อบรม อ.สมหวัง อริสริวงค์	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 10/11/42	มาตราส่วน 2 : 1
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			ลูกตึมน้ำหนักแบบจุดหมุนอยู่กับที่		
			หมายเลขแบบ ME 2000-002	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



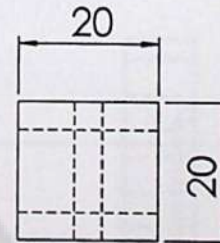
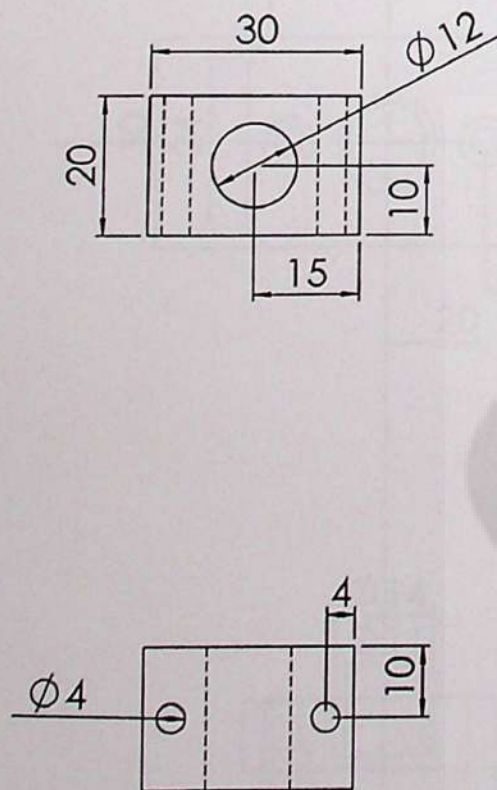
1	1	แกนจับลูกตุ้มผกผัน , Stainless Steel			
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด			
ผู้เขียน นาย ปุณณกัณฑ์ สุตชะ	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ อ.สมหวัง อริสริยวงศ์	ชื่อแท็บ	วันที่ 10/11/42	มาตราส่วน 1 : 1
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์			ลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนอยู่กับที่		
			หมายเลขแบบ ME 2000-003	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



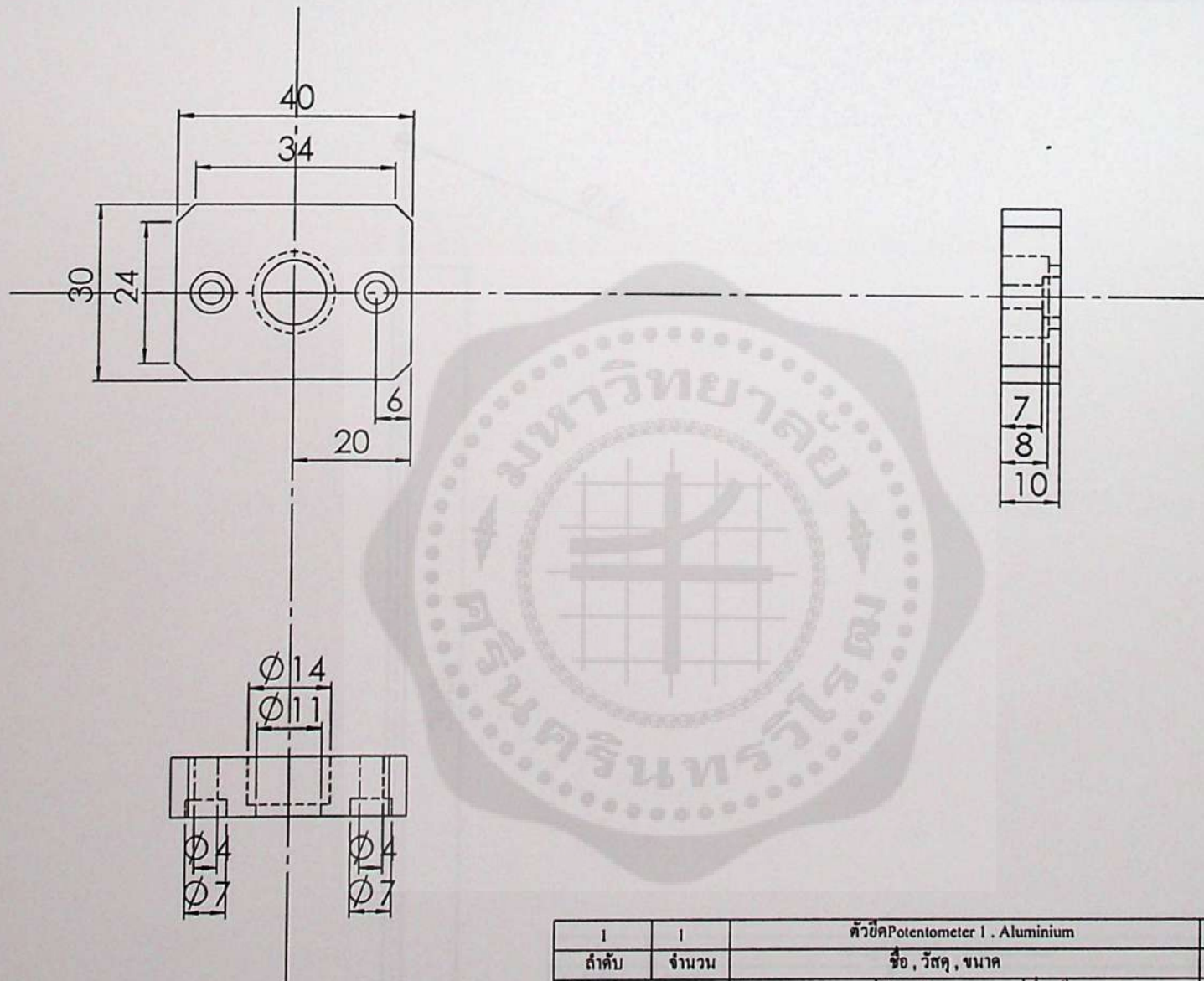
1	1	ตัวเชื่อมต่อที่ 2, Nylon				
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นาย ปุณณกันต์ สุคตะ		ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ อ.สมหวัง อริสริวงค์	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 10/11/42	มาตราส่วน 1 : 1
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				ลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนอยู่กับที่		
				หมายเลขแบบ ME 2000-004		



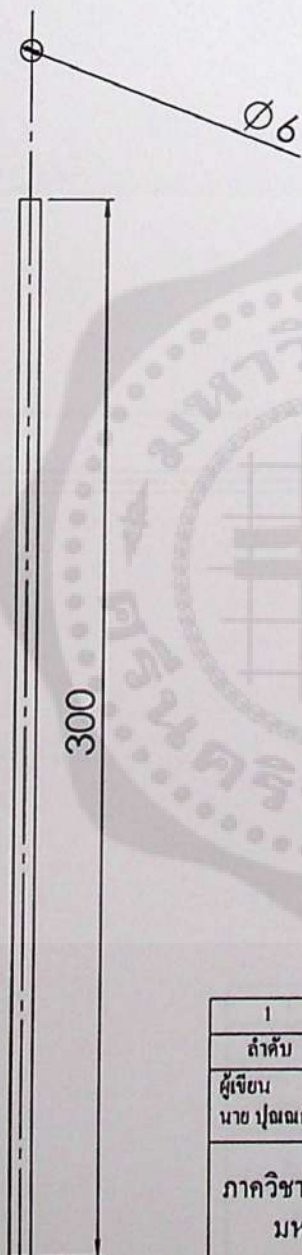
1	1	ตัวเชื่อมต่อที่ 1, Nylon				
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นาย ปุณณกัณฑ์ สุดชะ		ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ อ.สมหวัง อริสริวงค์	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 10/11/42	มาตราส่วน 1 : 1
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				ลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนอยู่กับที่		
				หมายเลขแบบ ME 2000-005		แก้ไขครั้งที่



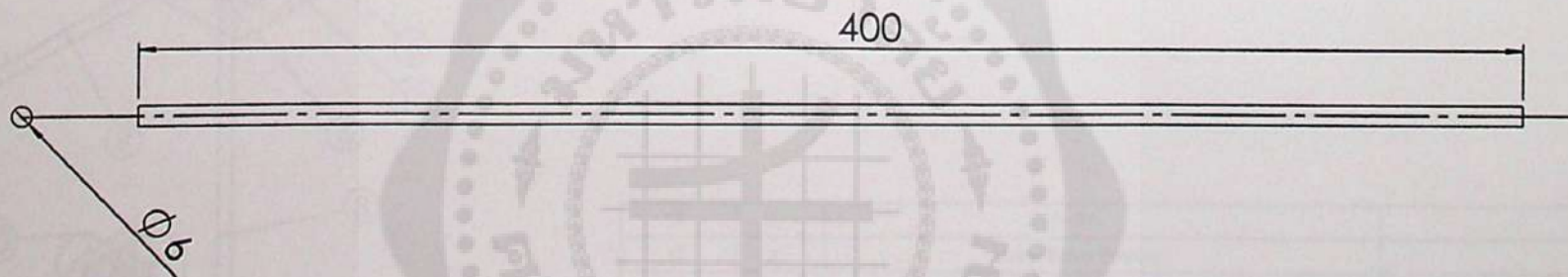
1	2	ตัวชี้คแกนสั้น, Nylon			
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			
ผู้เขียน นาย วัฒนกันต์ ฤทธะ		ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ อ.สมหวัง ธีรวิวงศ์	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 10/11/42
					มาตราส่วน 1 : 1
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				ลูกตู้หมักแบบจุดหมุนอยู่กับที่	
				หมายเลขแบบ ME 2000-006	แก้ไขครั้งที่ แผ่นที่



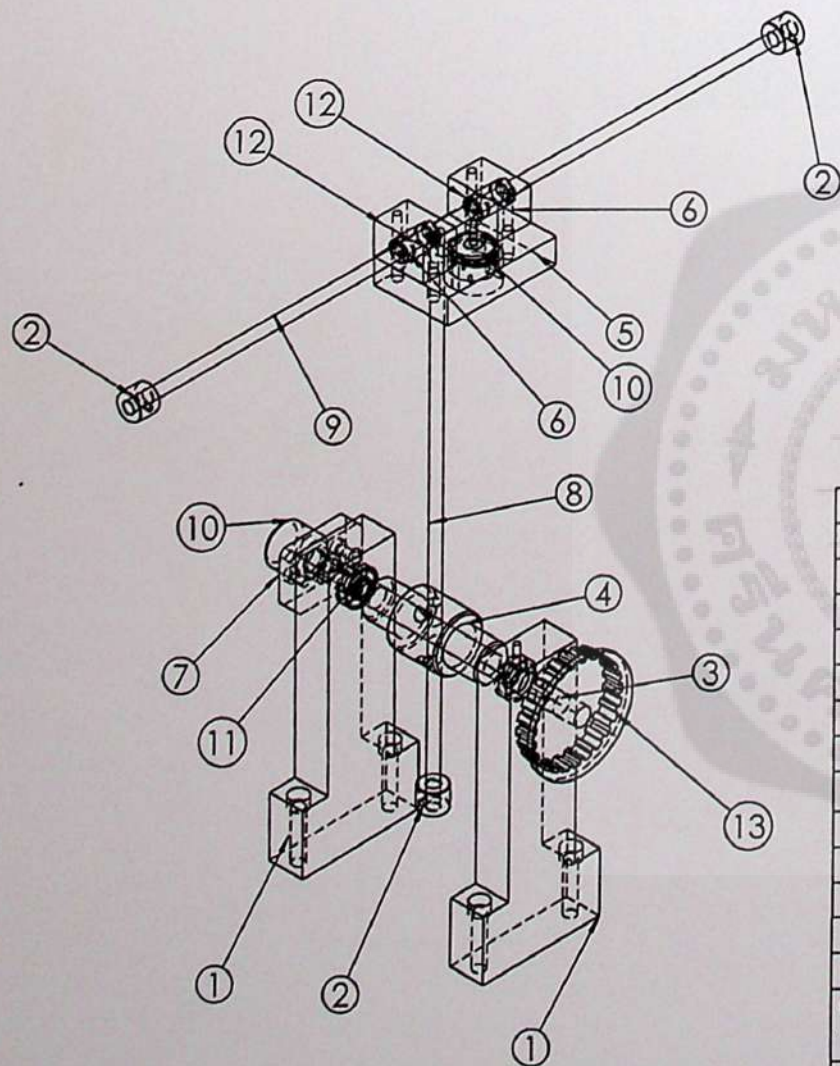
1		ตัวชี้วัด Potentiometer 1 . Aluminium			
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด			มาตรฐาน
ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	ชื่อเพิ่ม	วันที่	มาตรฐาน
นาย ปุณณกัณฑ์ สุดอะ		อ.สมหวัง อริสริวงค์		10/11/42	1 : 1
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			ลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนอยู่กับที่		
			หมายเลขแบบ MB 2000-007	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



I		แกนลูกตุ้มผกผัน , Stainless Steel			
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด			
ผู้เขียน นาย ปุณณกัณฑ์ สุดชะ		ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ อ.สมหวัง อริสริวงค์	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 10/11/42
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				ลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนอยู่กับที่	
				หมายเลขแบบ ME 2000-008	แก้ไขครั้งที่ แผ่นที่



1	1	แกนกลึง , Stainless Steel				
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นาย ปุณณกัณฑ์ ฤทธะ		ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ อ.สมหวัง อริสริยวงศ์	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 10/11/42	มาตราส่วน
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				ถูกดัดแปลงแบบจุดหมุนอยู่กับที่		
				หมายเลขแบบ ME 2000-009		แก้ไขครั้งที่

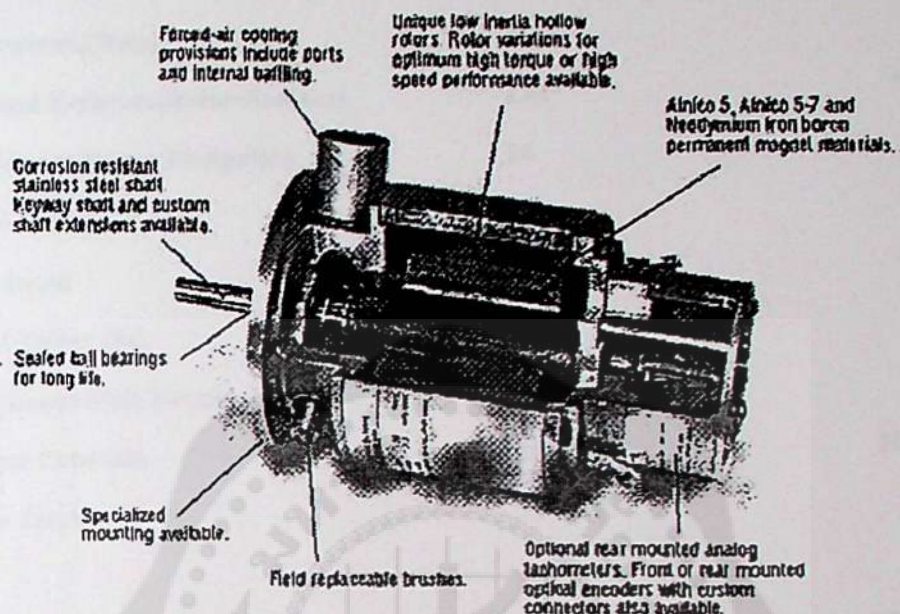


13	1	Pulley	
12	2	Linear Roller Bearing	
11	2	Ball Bearing	
10	2	Potentiometer	
9	1	แกนลิ้น , Stainless Steel	
8	1	แกนลูกตุ้มผกผัน , Stainless Steel	
7	1	ตัวยึด Potentiometer 1 . Aluminium	
6	2	ตัวยึดแกนลิ้น , Nylon	
5	1	ตัวเชื่อมต่อที่ 1 , Nylon	
4	1	ตัวเชื่อมต่อที่ 2 , Nylon	
3	1	แกนจับลูกตุ้มผกผัน , Stainless Steel	
2	3	ค้อนนำหนัก , Brass	
1	2	ฐานยึดลูกตุ้มผกผัน , Aluminium	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด	มาตรฐาน
ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	ชื่อเพิ่ม
นาย ปณณกันต์ สุทธะ		อ.สมหวัง อริสริวงค์	
		วันที่	มาตราส่วน
		10/11/42	1 : 2
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์		ลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนอยู่กับที่	
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์		หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่
		ME 2000-010	แผ่นที่

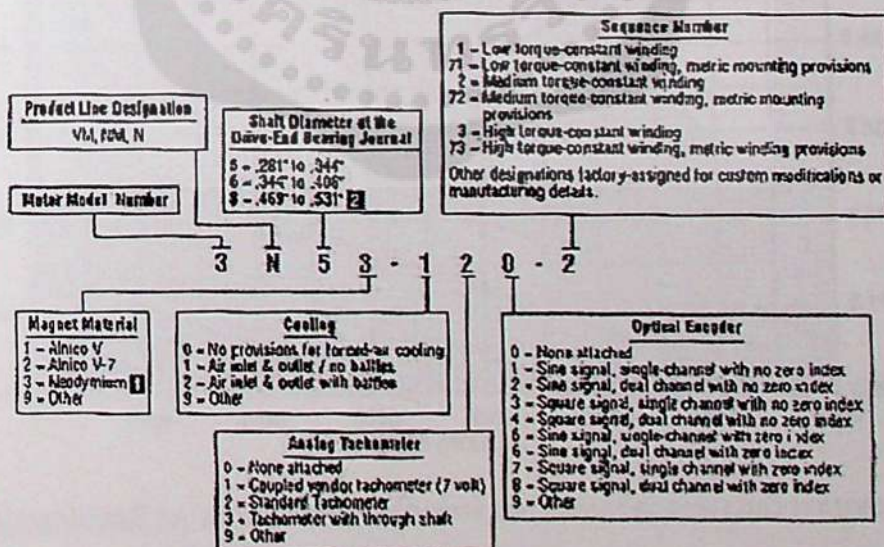


ภาคผนวกที่ 2

ข้อมูลของมอเตอร์



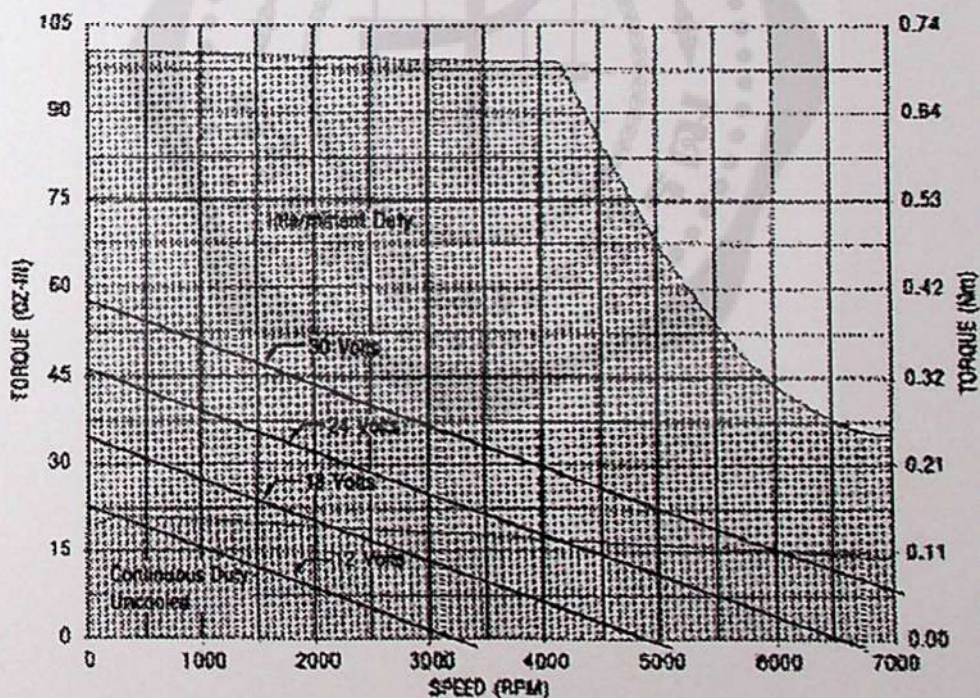
รูปภาคผนวกที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของมอเตอร์



รูปภาคผนวกที่ 2.2 แสดงการตั้งนัมเบอร์โค้ดของมอเตอร์

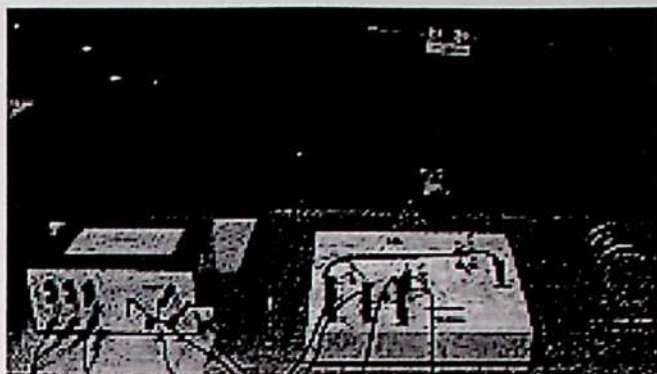
คุณสมบัติของมอเตอร์รุ่น 22VM51-020-6

Rated Torque	0.03672	Nm.
Rate current(Rms)	3	amps
Thermal Resistant(Rotor-Ambien)	2.41	$^{\circ}\text{C} / \text{Watt}$
Continuous Power Dissipation	54	watts
Rated Voltage	24	volts
Rate Speed	4050	RPM.
Rated Power Out	54	watts
Continuous Stall Torque	0.039	Nm.
Torque Constant	0.03744	Nm. / amps
Rotor Inertia	3.66×10^{-6}	kg-m^2



รูปภาคผนวกที่ 2.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กและความเร็วรอบของมอเตอร์

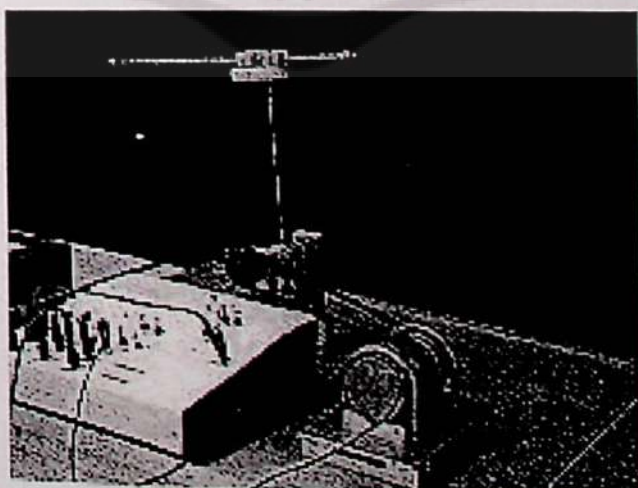




รูปภาคผนวกที่ 3.1 แสดงลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง



รูปภาคผนวกที่ 3.2 แสดงชุดควบคุมลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่ง



รูปภาคผนวกที่ 3.3 แสดงการควบคุมลูกตุ้มผกผันแบบจุดหมุนหยุดนิ่งขณะทำการทดลอง