

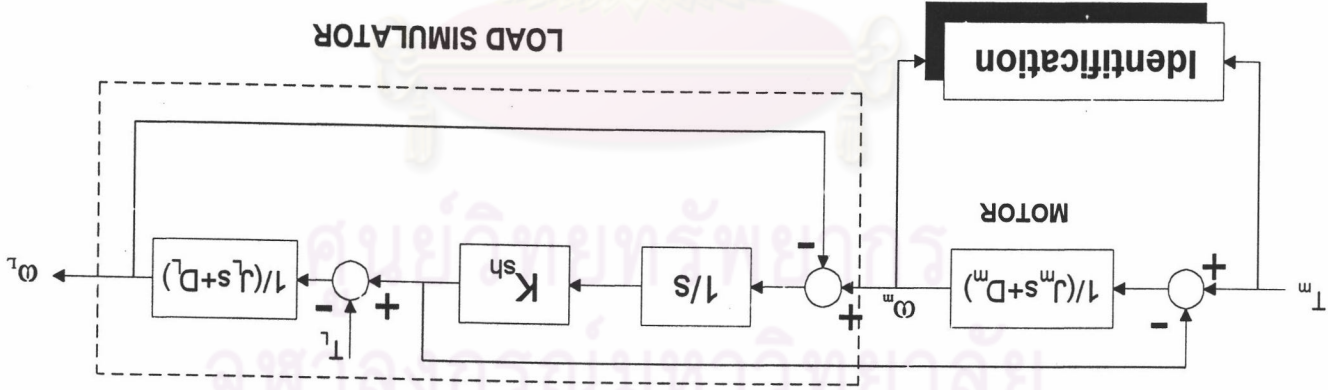
## บทที่ 5

### การจำลองระบบ 2 มวลโดยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

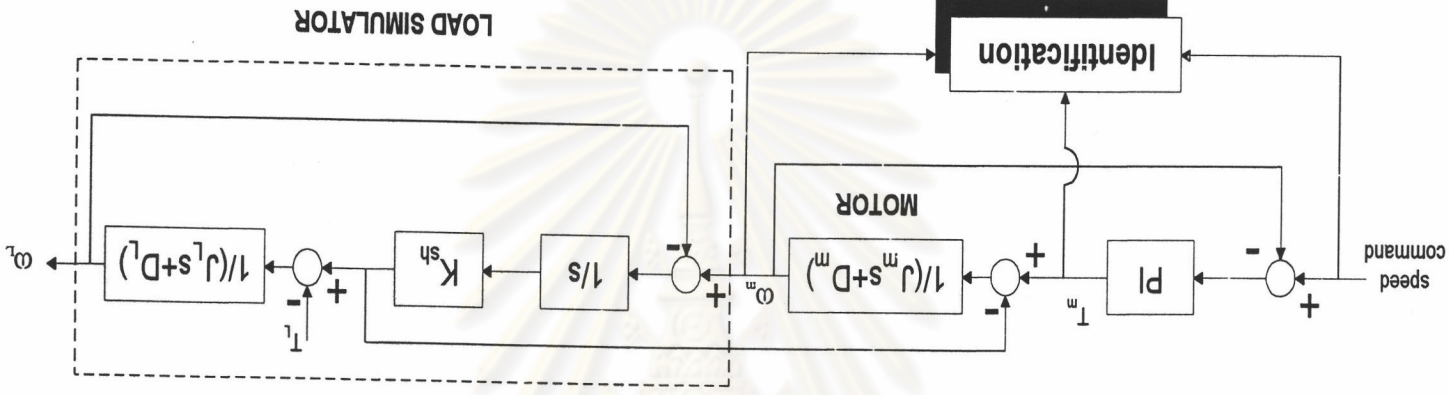
เพื่อทำการทดสอบหลักการทางทฤษฎีที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 และบทที่ 4 และหาเงื่อนไขสำคัญในการหาลักษณะสมบัติของระบบในทางปฏิบัติ เราจะทำการสร้างระบบจริงแบบ 2 มวลขึ้นมา ในบทนี้เราจะกล่าวถึงรายละเอียดของลักษณะโครงสร้างในทางปฏิบัติโดยรวมของระบบที่ได้พัฒนาขึ้นรวมทั้งแสดงผลการทดสอบการทำงานของระบบด้วย องค์ประกอบหลักในการหาลักษณะสมบัติของระบบ 2 มวลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเราสามารถแบ่งโครงสร้างเป็น 3 ส่วนดังนี้คือ

#### 5.1 ส่วนมอเตอร์ในระบบ 2 มวล

ในส่วนนี้เราจะใช้มอเตอร์แบบเซอร์โวในการศึกษา มอเตอร์แบบเซอร์โวที่ใช้ในการทดสอบระบบนั้นมีค่าของเวลาประวิง (delay time) ในการตอบสนองของตัวควบคุมกระแสภายในตัวควบคุมเซอร์โวเอง โดยที่ค่าของเวลาประวิงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามจุดทำงานและมีค่าประมาณ 5 ms (ภาคผนวก ก) นอกจากนี้มอเตอร์แบบเซอร์โวมี่ความไม่แน่นอน (uncertainty) เนื่องจากความต้านทานทางลมที่มีค่าไม่คงที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความต้านทานสถิตทางลมและความต้านทานจลน์ทางลมมีค่าไม่เท่ากันรวมทั้งผลกระทบข้างเคียง อาทิเช่น แรงต้านทานทางลมที่เกิดขึ้นในขณะที่มอเตอร์หมุนซึ่งมีค่าไม่คงที่เช่นเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้ระบบ 2 มวลที่สร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในการหาลักษณะสมบัติของระบบดังจะกล่าวในบทที่ 6 ต่อไป แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถสรุปค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยได้เป็น  $8 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$  และความต้านทานทางลมเป็น  $8 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2/\text{s}$  (ภาคผนวก ก)



ก) การหาลักษณะสมบัติของระบบวงปิด



ข) การหาลักษณะสมบัติของระบบวงปิด

รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการแสดงผลการทำงานของโปรแกรมแสดงการทำงานของโปรแกรมในลักษณะสมบัติของระบบ 2 ขั้ว

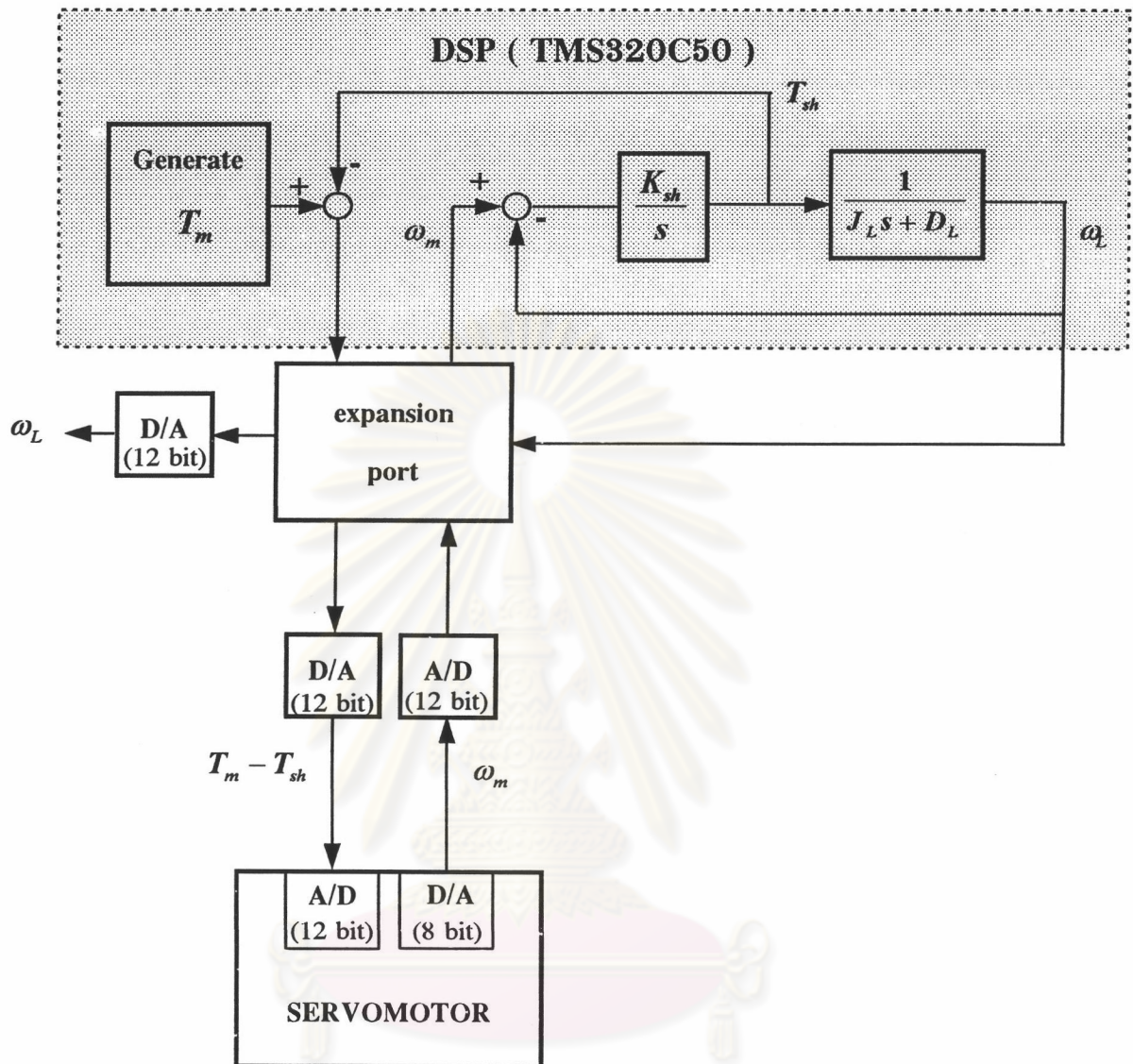
## 5.2 ส่วน โหลดและเพลาแบบยึดหยุ่นในระบบ 2 มวล

ในส่วนนี้เราจะสร้างเป็นโหลดจำลอง (load simulator) แทนการใช้โหลดและเพลาจริง โดยเขียนเป็นซอฟต์แวร์ของตัวประมวลผลทางดิจิทัล (digital signal processing; DSP) ในวิทยานิพนธ์นี้เราเลือกใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัล เบอร์ TMS320C50 ซึ่งมีความเร็วในการประมวลผลเป็น 20 MHz ในการทำงาน ทั้งนี้เพื่อให้เราสามารถที่จะทราบถึงค่าของระบบที่แท้จริงที่ใช้ทดสอบในการหาลักษณะสมบัติของระบบ และสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบทดสอบได้ง่าย

### 5.2.1 ระบบ 2 มวลแบบวงรอบเปิด

ในส่วนทางด้านฮาร์ดแวร์ของระบบ 2 มวลจะมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยจะทำการรับสัญญาณแอมพลิจูดของความเร็วมอเตอร์จากมอเตอร์แบบเซอร์โวมาแปลงให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลแบบขนานเพื่อส่งเข้าตัวประมวลผลทางดิจิทัล จากนั้นตัวประมวลผลทางดิจิทัลจะทำการประมวลผลในส่วนของโหลดและเพลาแบบยึดหยุ่นในระบบ 2 มวล กล่าวคือทำหน้าที่เป็นโหลดจำลองในระบบนั่นเอง ซึ่งจะให้สัญญาณดิจิทัลเป็นค่าของผลต่างระหว่างแรงบิด  $T_m$  กับแรงบิดของเพลา  $T_{sh}$  ที่ได้จากการประมวลผล จากนั้นจึงนำสัญญาณดิจิทัลนี้มาแปลงให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณแอมพลิจูดเพื่อส่งเข้ามอเตอร์แบบเซอร์โวต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบ 2 มวลแบบวงรอบเปิด

สำหรับซอฟต์แวร์ที่เขียนขึ้นเพื่อจำลองการทำงานของโหลด การกำเนิดสัญญาณคำสั่งแรงบิดของมอเตอร์ และการเก็บข้อมูลของสัญญาณแรงบิดของมอเตอร์และสัญญาณความเร็วของมอเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการหาลักษณะสมบัติของระบบวงรอบเปิดนั้น เราจะใช้วิธี backward difference ในการคำนวณส่วนที่เป็นสมการอนุพันธ์ และสามารถแสดงด้วย PDL (program development language) ได้ดังต่อไปนี้คือ

\*\*\*\*\*

## 2-MASS SYSTEM (2MS) PROGRAM

\*\*\*\*\*

### Module : 2MS

#### Initialize

Initialize all variables

Initialize and enable timer interrupt

Loop here forever (wait for interrupt)

#### Interrupt Service Routine (TIMER ISR)

Generate motor torque (  $T_m$  )

Get shaft torque from previous interrupt service routine

Output torque to servomotor

Calculate motor torque - shaft torque (  $T_m - T_{sh}$  )

Output  $T_m - T_{sh}$  to D/A

Input motor speed from A/D

Load simulator

Get load speed from previous interrupt service routine

Calculate motor speed - load speed (  $\omega_m - \omega_L$  )

Calculate shaft torque (  $T_{sh}$  )

$$T_{sh} = \frac{K_{sh}}{S} * (\omega_m - \omega_L)$$

Calculate load speed (  $\omega_L$  )

$$\omega_L = \left( \frac{1}{J_L S + D_L} \right) T_{sh}$$

Save data for open loop identification

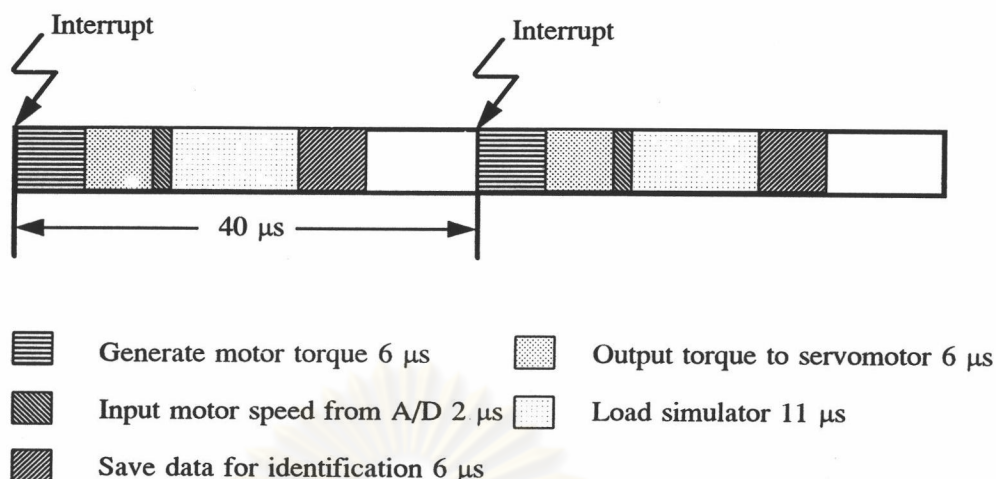
Save motor torque to RAM

Save motor speed to RAM

Return

END 2MS

\*\*\*\*\*



รูปที่ 5.3 ไคอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูลของระบบ 2 มวล

#### ผลการทดสอบการทำงานของระบบ 2 มวล

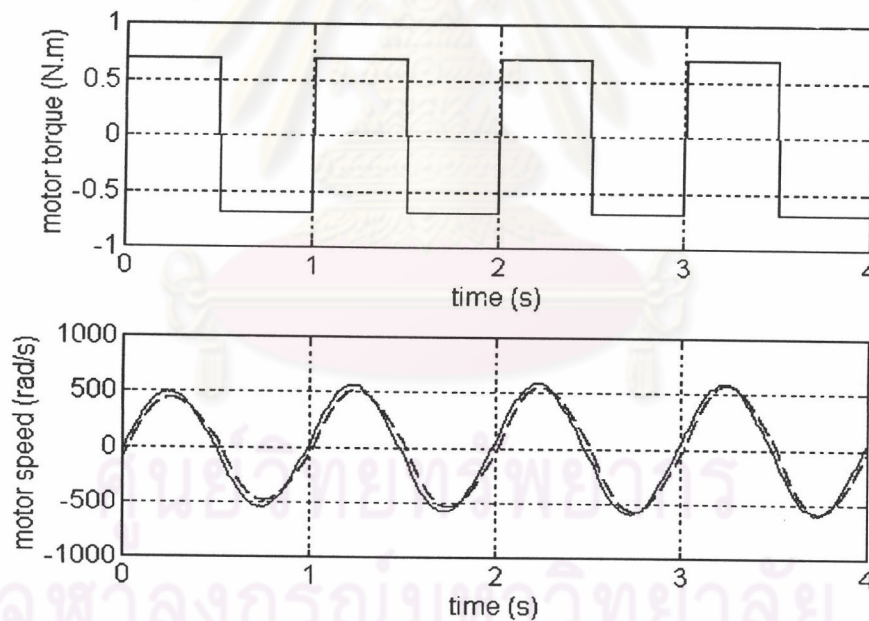
ในการทดสอบระบบ 2 มวลที่พัฒนาขึ้นนี้ เราจะจำลองการทำงานของระบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จริง เพื่อตรวจสอบในเบื้องต้นว่าระบบทำงานได้ตามต้องการหรือไม่ โดยเราจะทดสอบการทำงานของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1.03 Hz และ 5.34 Hz เพื่อแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของโพลจำลองที่เราสามารถที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโมเมนต์ความเฉื่อยของโพล ความต้านทานทางลมของโพล และค่าคงที่ความยืดหยุ่นของระบบ 2 มวล ได้จากการเขียนโปรแกรมในตัวประมวลผลทางดิจิทัล ดังนั้นเราจึงสามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบในการทดสอบได้ง่าย และสามารถทราบถึงค่าของระบบจริงที่ใช้ทดสอบในการหาลักษณะสมบัติของระบบ

ผลการทดสอบระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz (ค่าพารามิเตอร์แสดงในภาคผนวก ข) เมื่อให้คำสั่งแรงบิด  $T_m$  ของมอเตอร์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 1 Hz ขนาด  $\pm 0.7$  N.m แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 จากผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วย MATLAB/SIMULINK พบว่าความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จะใกล้เคียงกันมาก และพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ในความเร็วของมอเตอร์มีค่าประมาณ 1 Hz ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบ 2 มวลที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ถูกต้องตามต้องการ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ให้คำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS (ดูภาคผนวก ค) ที่มี  $n = 7$  และ  $t_{prbs} = 0.1$  s ขนาด  $\pm 0.7$  N.m แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 พบว่าความเร็วของมอเตอร์ที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างจากผลการจำลองมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าคำสั่งแรงบิดของมอเตอร์ที่จ่ายเข้าระบบนั้นมีองค์ประกอบความถี่สูงมากขึ้นและเนื่องจากผลกระทบที่เกิด

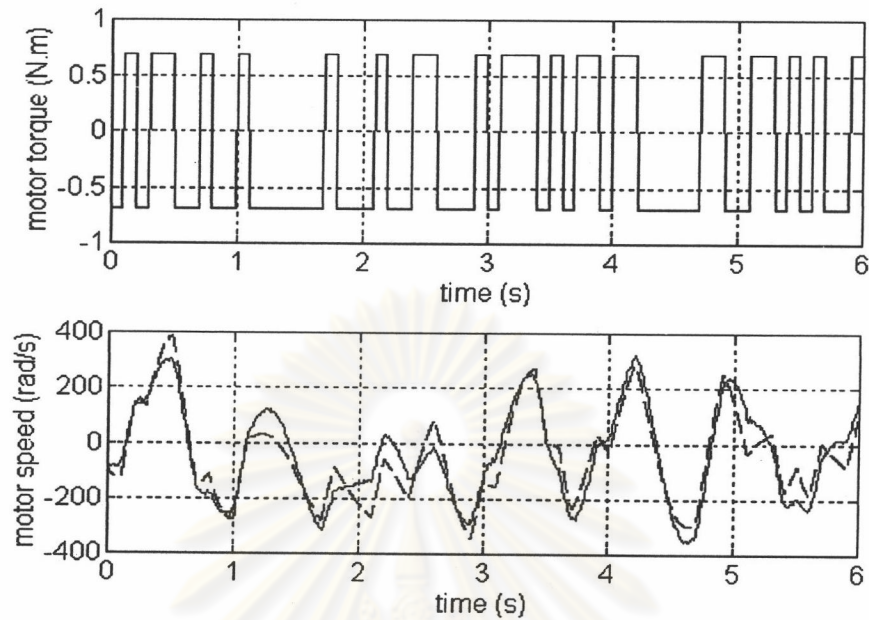
จากเวลาประวิงที่มีอยู่ในมอเตอร์แบบเซอร์โวในย่านความถี่สูงนั้นจะมากกว่าในย่านความถี่ต่ำ ดังนั้นค่าความผิดพลาดจึงมีมากขึ้น

สำหรับผลการทดสอบระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz (ค่าพารามิเตอร์แสดงในภาคผนวก ข) มีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับผลการทดสอบระบบ 2 มวลที่มีความถี่ 1.03 Hz กล่าวคือจากผลการทดสอบเมื่อให้คำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 2.5 Hz ขนาด  $\pm 1.5$  N.m ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่าความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จะใกล้เคียงกันมาก และในกรณีที่ให้คำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี  $n = 7$  และ  $t_{prbs} = 0.05$  s ขนาด  $\pm 1$  N.m ดังแสดงในรูปที่ 5.7 พบว่าความเร็วของมอเตอร์ที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างจากผลการจำลองมากขึ้นเช่นกัน

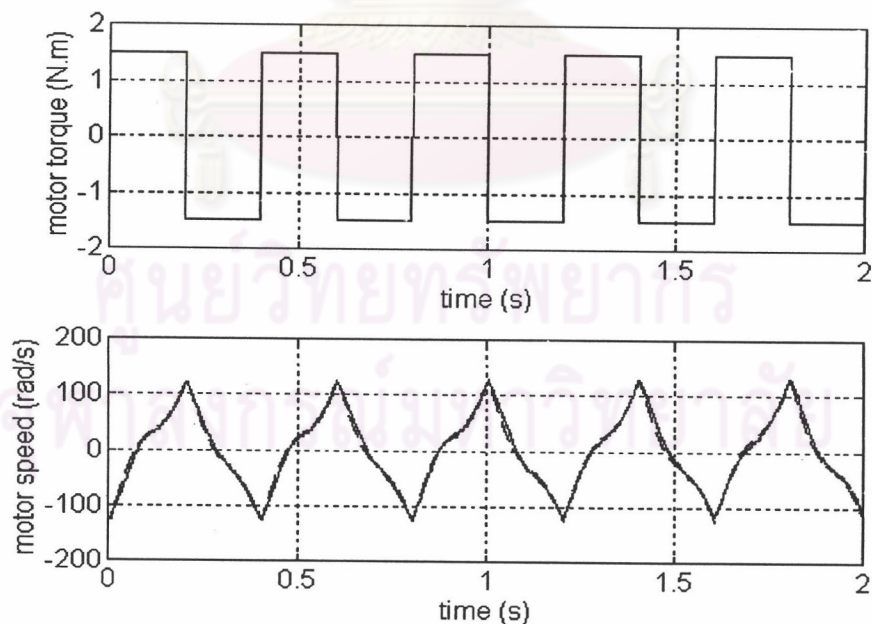
ดังนั้นจะเห็นว่าระบบ 2 มวลที่จำลองขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับที่เราต้องการ แต่จะมีค่าผิดพลาดในย่านความถี่สูงซึ่งต้องนำไปพิจารณาประกอบในการหาลักษณะสมบัติของระบบต่อไป



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz ที่ได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และผลการจำลอง (เส้นประ) เมื่อคำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 1 Hz

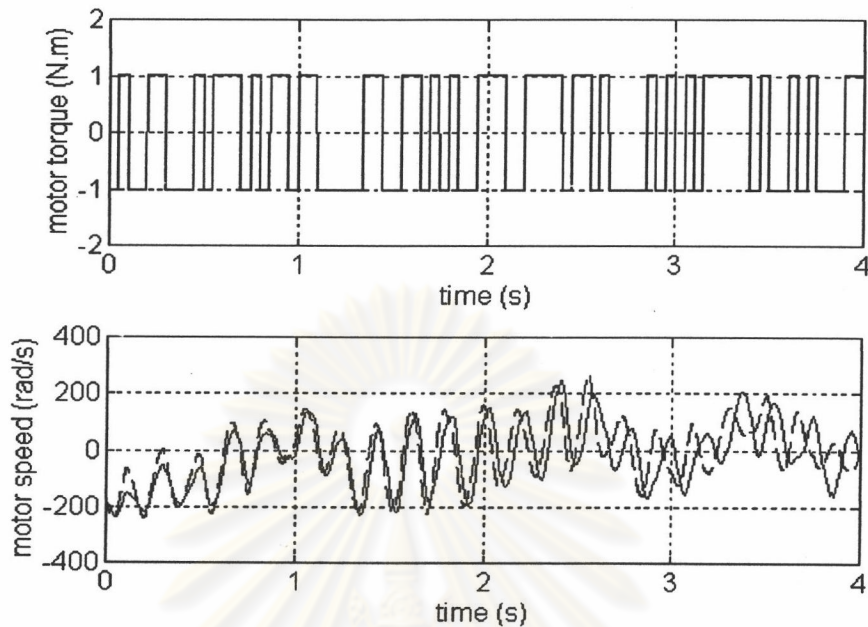


รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz ที่ได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และผลการจำลอง (เส้นประ) เมื่อคำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี  $n = 7$  และ  $t_{prbs} = 0.1$  s



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz ที่ได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และผลการจำลอง (เส้นประ) เมื่อคำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 2.5 Hz



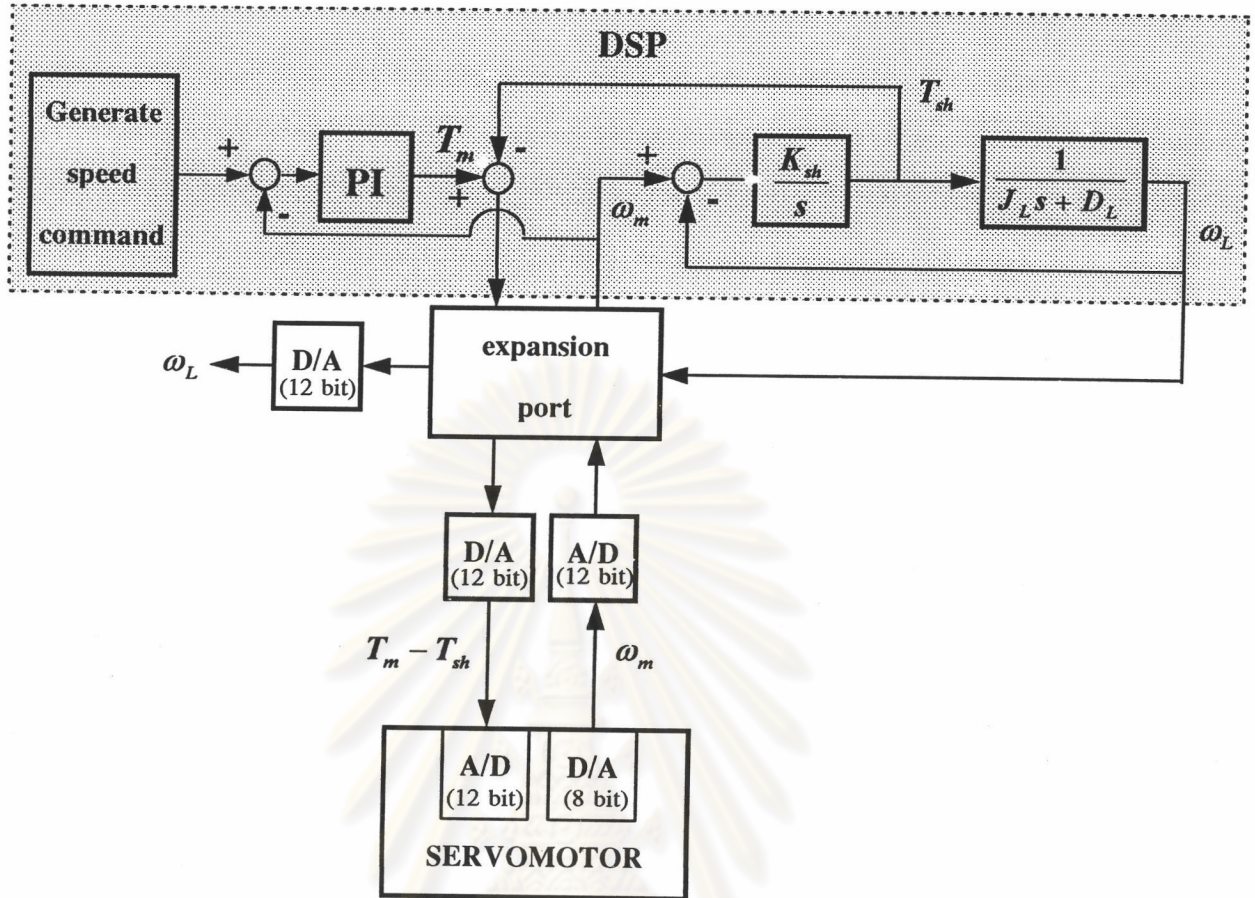


รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz ที่ได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) และผลการจำลอง (เส้นประ) เมื่อคำสั่งแรงบิดของมอเตอร์เป็นสัญญาณ PRBS ที่มี  $n = 7$  และ  $t_{prbs} = 0.05$  s

### 5.2.2 โครงสร้างของระบบ 2 มวลที่มีตัวควบคุมแบบ PI

ในส่วนทางด้านฮาร์ดแวร์ของระบบ 2 มวลที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI จะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของระบบ 2 มวลแบบวงรอบเปิด แต่จะแตกต่างกันในส่วนของการทำงานของตัวประมวลผลทางดิจิทัล

สำหรับการทำงานของตัวประมวลผลทางดิจิทัลนั้นจะเพิ่มส่วนของตัวควบคุมแบบ PI เข้าไป และจะทำการสร้างสัญญาณของคำสั่งความเร็วแทนการสร้างคำสั่งแรงบิด นอกจากนี้ยังเพิ่มส่วนของการรับแรงบิดของมอเตอร์มาคำนวณหาค่าของความเร็วในระบบ 1 มวล เพื่อคำนวณหาค่าของผลต่างระหว่างความเร็วของมอเตอร์ในระบบ 2 มวลและความเร็วของมอเตอร์ในระบบ 1 มวล ซึ่งเราจะนำไปใช้ในการหาลักษณะสมบัติของระบบวงรอบปิด ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 5.8 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบ 2 มวลที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI

สำหรับซอฟต์แวร์ที่แสดงด้วย PDL ดังแสดงข้างล่างนี้ เขียนตามการทำงานขององค์ประกอบต่าง ๆ คือ (1) ตัวควบคุมแบบ PI (2) การทำงานของโหนดจำลอง (3) การทำงานของระบบ 1 มวล (4) การกำเนิดสัญญาณคำสั่งความเร็วของมอเตอร์ และ(5) การเก็บข้อมูลของสัญญาณแรงบิดของมอเตอร์ สัญญาณคำสั่งความเร็ว สัญญาณความเร็วของมอเตอร์ในระบบ 2 มวล และสัญญาณของผลต่างระหว่างความเร็วของมอเตอร์ในระบบ 2 มวลและความเร็วของมอเตอร์ในระบบ 1 มวล เพื่อนำไปใช้ในการหาลักษณะสมบัติของระบบวงรอบปิด

\*\*\*\*\*

**2-MASS SYSTEM WITH PI CONTROLLER (2MSPI) PROGRAM**

\*\*\*\*\*

**Module : 2MSPI**

**Initialize**

Initialize all variables

Initialize and enable timer interrupt

Loop here forever (wait for interrupt)

Interrupt Service Routine (TIMER ISR)

Generate speed command (  $\omega_m^*$  )

Input motor speed (  $\omega_m$  ) from A/D

PI controller

Calculate speed error (  $\omega_m^* - \omega_m$  )

Calculate Speed Controller output (motor torque,  $T_m$ )

Get shaft torque from previous interrupt service routine

Output torque to servomotor

Calculate motor torque - shaft torque (  $T_m - T_{sh}$  )

Output  $T_m - T_{sh}$  to D/A

Input motor speed from A/D

Load simulator

Get load speed from previous interrupt service routine

Calculate motor speed - load speed (  $\omega_m - \omega_L$  )

Calculate shaft torque (  $T_{sh}$  )

$$T_{sh} = \frac{K_{sh}}{s} * (\omega_m - \omega_L)$$

Calculate load speed (  $\omega_L$  )

$$\omega_L = \left( \frac{1}{J_L s + D_L} \right) T_{sh}$$

1-Mass system

Calculate motor speed from 1-mass system (  $\omega_{m1}$  )

$$\omega_{m1} = \left[ \frac{1}{(J_m + J_L)s + (D_m + D_L)} \right] T_m$$

Get motor speed (  $\omega_m$  )

Calculate  $\beta$  signal

$$\beta = \omega_m - \omega_{m1}$$

Save data for closed-loop identification

Save motor torque to RAM

Save motor speed to RAM

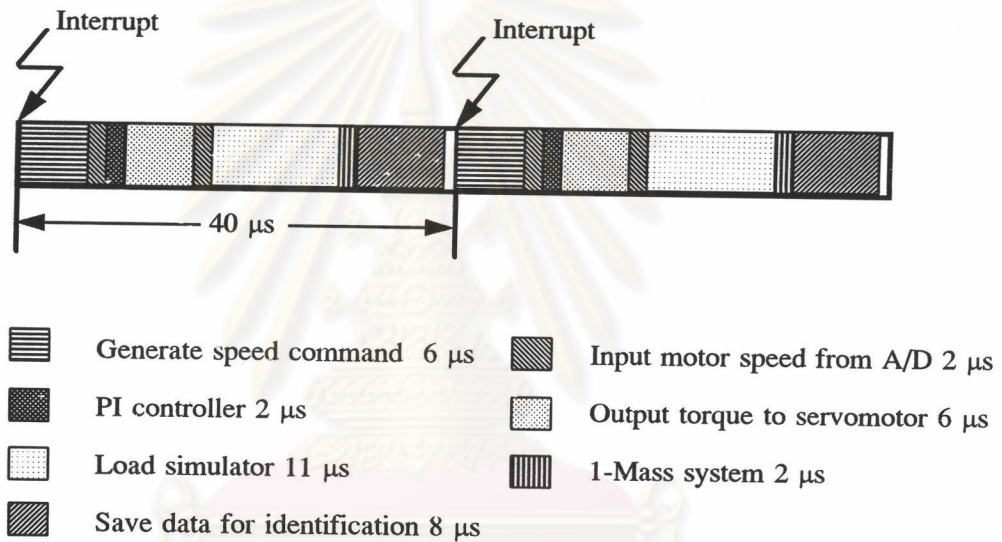
Save speed command to RAM

Save  $\beta$  signal to RAM

Return

END 2MSPI

\*\*\*\*\*

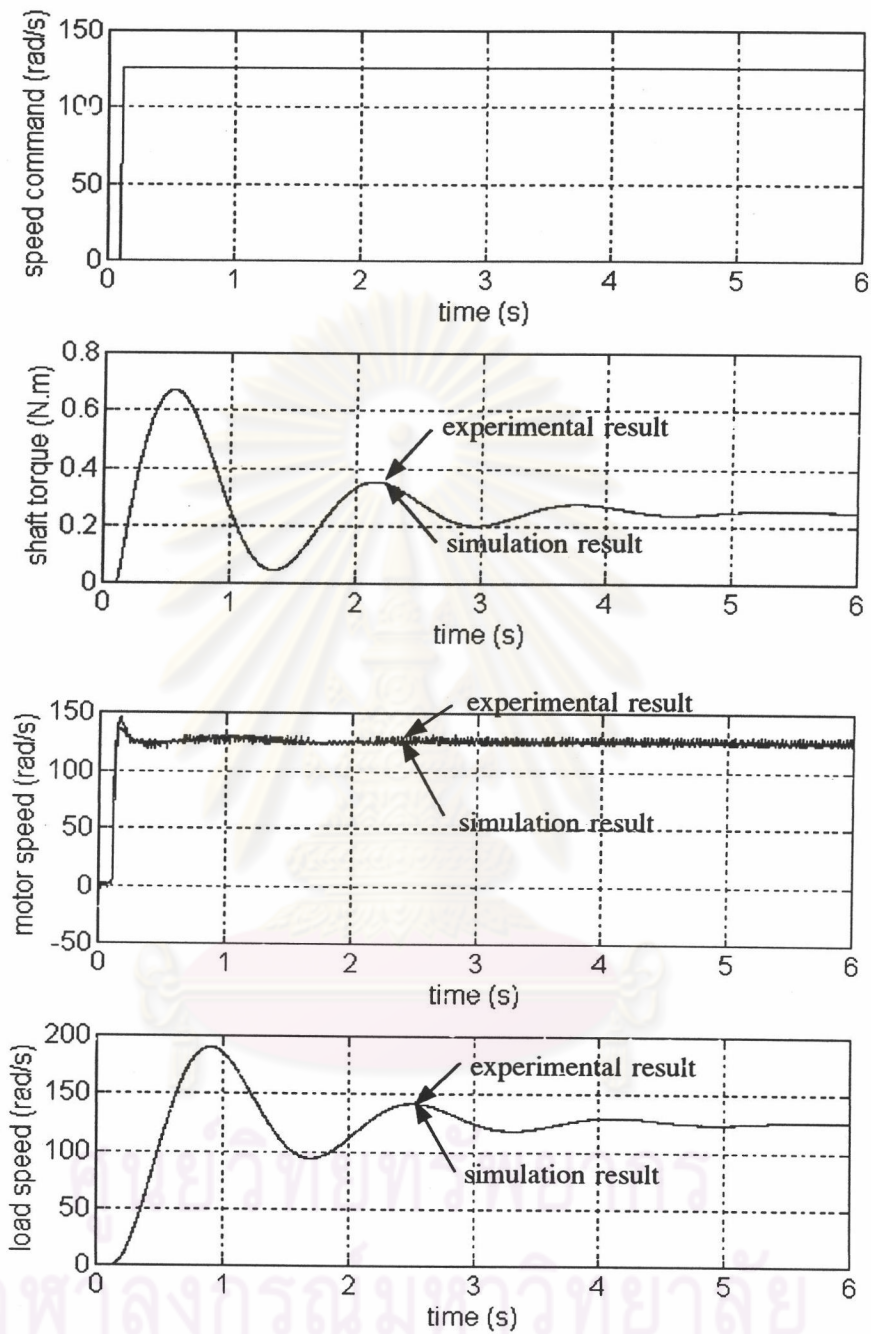


รูปที่ 5.9 ไคอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูลของระบบ 2 มวลที่มีตัวควบคุมแบบ PI

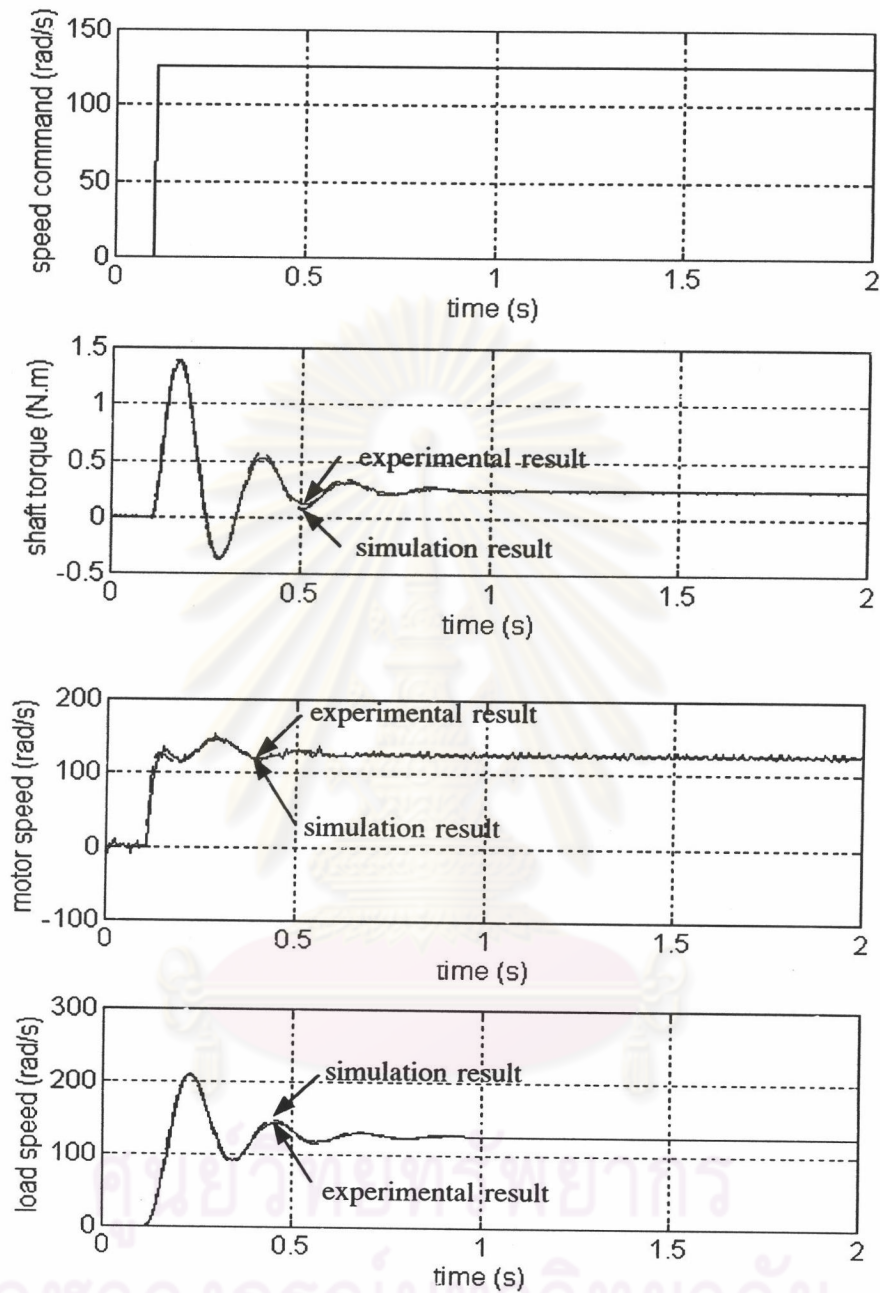
ผลการทดสอบการทำงานของระบบ 2 มวลที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI

ผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1.03 Hz และ 5.34 Hz ที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI (ค่าพารามิเตอร์แสดงในภาคผนวก ข) เมื่อให้คำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได แสดงได้ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ จะพบว่าได้ค่าใกล้เคียงกันมาก และเมื่อให้คำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณ PRBS แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 จะพบว่าได้ผลของการจำลองกับผลของการทดสอบใกล้เคียงกันมากเช่นกัน

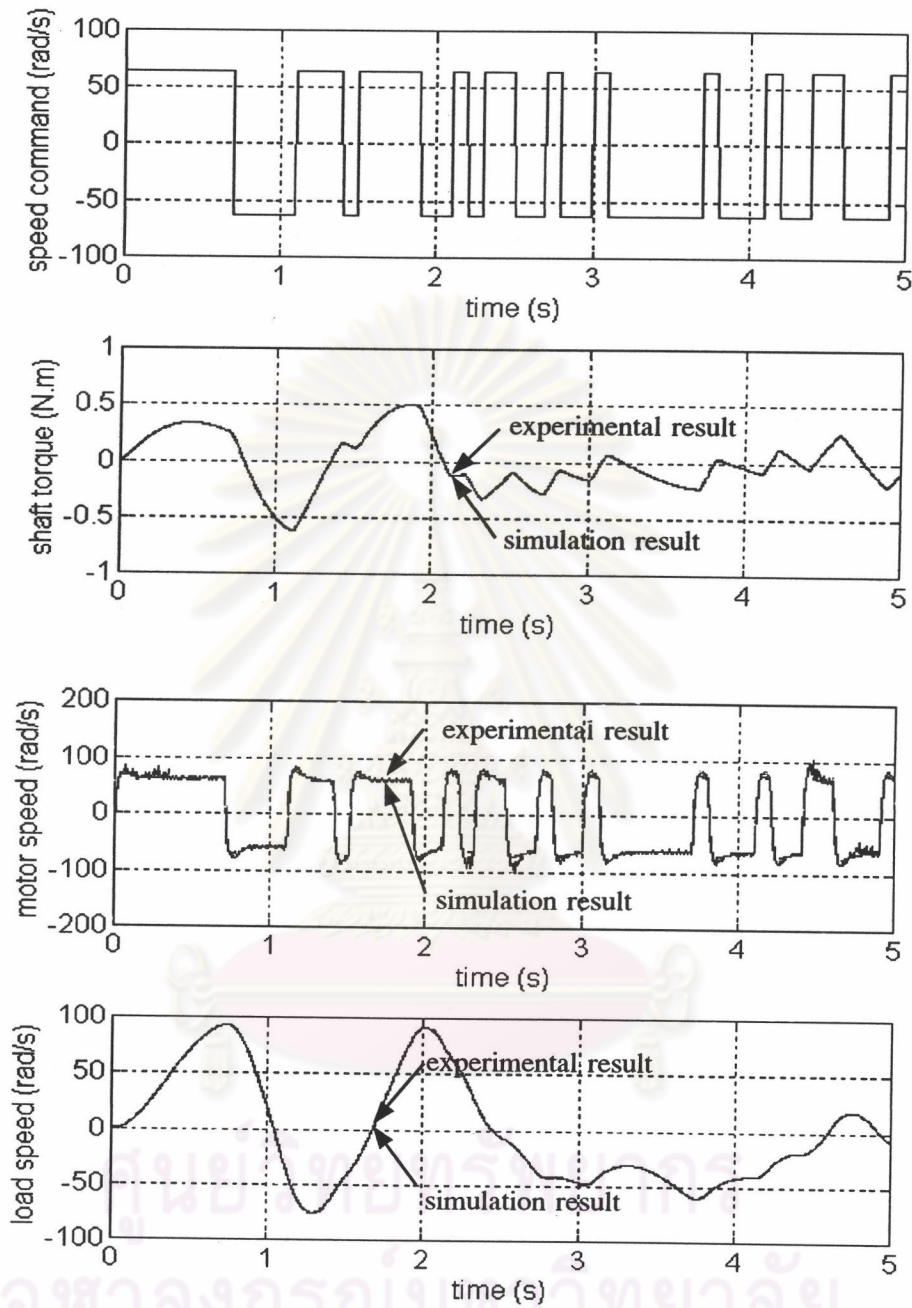
ดังนั้นจะเห็นว่าระบบ 2 มวลที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่จำลองขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับที่เราต้องการ ทั้งในย่านความถี่สูงและความถี่ต่ำ



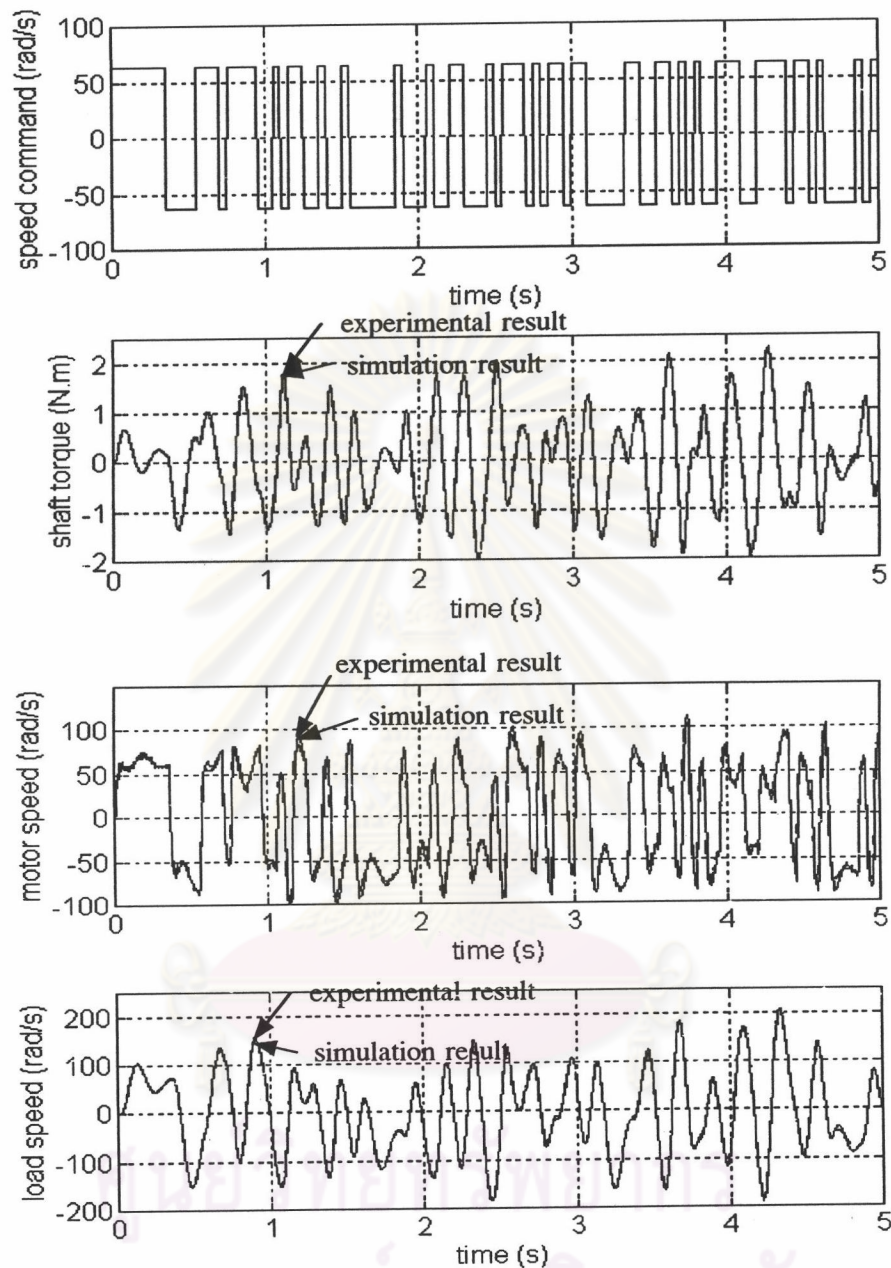
รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์, ความเร็วของโหลด และแรงบิดของเพลา ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ได้จากผลการทดสอบและผลการจำลอง เมื่อคำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์, ความเร็วของโหลด และแรงบิดของเพลา ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ได้จากผลการทดสอบและผลการจำลอง เมื่อคำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์, ความเร็วของโหลด และแรงบิดของเพลา ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 1.03 Hz ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ได้จากการทดสอบและผลการจำลอง เมื่อคำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณ PRBS ที่มี  $n = 7$  และ  $t_{prbs} = 0.1$  s

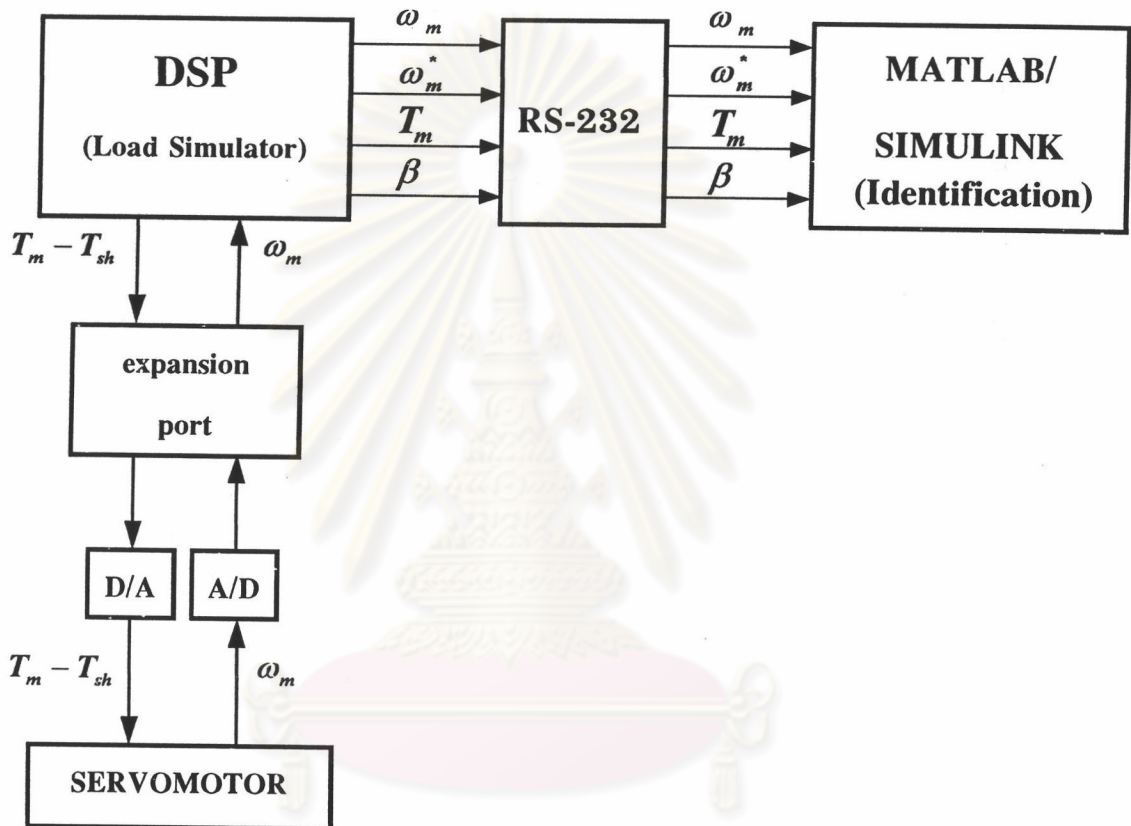


รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์, ความเร็วของโหลด และแรงบิดของเพลา ของระบบ 2 มวลที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 5.34 Hz ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ที่ได้จากการทดสอบและผลการจำลอง เมื่อคำสั่งความเร็วเป็นสัญญาณ PRBS ที่มี  $n = 7$  และ  $t_{prbs} = 0.05$  s



### 5.3 ส่วนการหาลักษณะสมบัติของระบบ

ในส่วนนี้จะใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัล DSP ช่วยในการเก็บข้อมูลของสัญญาณเพื่อนำไปประมวลผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อหาลักษณะสมบัติของระบบต่อไป ดังแสดงเป็นโครงสร้างได้ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 โครงสร้างของการหาลักษณะสมบัติของระบบ