การควบคุมแรงส่งผ่านไปยังพื้นโดยใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสำหรับเครื่องจักรที่แปรความเร็วรอบ

นาย เอกพงษ์ ตั้งพัฒนเสรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1043-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20440224 23 ก.ค. 2546

A CONTROL OF THE TRANSMITTED FORCE TO GROUND BY USING A VIBRATION ABSORBER FOR A VARIABLE SPEED MACHINE

Mr. Ekapong Tangpattanasaeree

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1043-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแรงส่งผ่านไปยังพื้นโดยใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสำหรับเครื่องจักรที่แปรความเร็วรอบ
โดย	นายเอกพงษ์ ตั้งพัฒนเสรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ทวี เวชพฤติ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จีระศักดิ์ เมฆอัมพรพงศ์)

นาย เอกพงษ์ ตั้งพัฒนเสรี : การควบคุมแรงส่งผ่านไปยังพื้นโดยใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสำหรับเครื่องจักรที่แปรความเร็วรอบ. (A CONTROL OF THE TRANSMITTED FORCE TO GROUND BY USING A VIBRATION ABSORBER FOR A VARIABLE SPEED MACHINE) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิทยา ยงเจริญ, 182 หน้า. ISBN 974-03-1043-5.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมาใช้กับเครื่องจักรที่มีการทำงานแบบหมุน มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการทำงาน และควบคุมให้แรงส่งผ่านไปยังพื้นมีค่าต่ำที่สุด ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนประกอบด้วยมวลและคานที่สามารถเปลี่ยนค่าความแข็งสปริงตามความเร็วรอบของเครื่องจักรในช่วง 300 ถึง 1500 รอบต่อนาที

จากผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของระบบการสั่นสะเทือนในแบบ 6 ลำดับขั้นความเสรี การสั่นสะเทือนในแนวตั้งไม่มีการควบของพิกัดกับพิกัดอื่น ผลจากค่าความหน่วงมีค่าน้อยมาก อิเนอร์เชียบล็อกที่ติดตั้งในระบบช่วยลดแอมพลิจูดการกระจัด การติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนช่วยลดค่าการส่งผ่านหรือแรงส่งผ่านไปยังพื้นได้มาก อัตราส่วนมวลที่สูงช่วยลดการสั่นสะเทือนที่เป็นผลจากความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งสปริงของตัวดูดซับได้ แต่ต้องคำนึงถึงมวลที่ใหญ่ขึ้นของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต.....เอกพงษ์ ตั้งพัฒนเสรี.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2544

4170657021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : VIBRATION ISOLATION / ISOLATOR / VIBRATION ABSORBER / TRANSMISSIBILITY / TRANSMITTED FORCE / SPRING

EKAPONG TANGPATTANASAEREE : A CONTROL OF THE TRANSMITTED FORCE TO GROUND BY USING A VIBRATION ABSORBER FOR A VARIABLE SPEED MACHINE. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. WITHAYA YONGCHAROEN, Ph.D. 182 pp. ISBN 974-03-1043-5.

The purpose of this research is to install the vibration absorber to use with a rotary machine that varies working speed and to control transmitted force to be minimized. The absorber consists of mass and beam that can varies the spring stiffness according to the machine speed

From analyzing the vibration of system in 6 degrees of freedom, the vertical vibration does not couple with the other coordinate and the effect of damping is very low. Inertia block installed in the system reduce the vibration amplitude of the machine. By installing the vibration absorber and adjusting the beam supporting position to suit the speed machine, the transmissibility and transmitted force decrease significantly. High mass ratio decreases the vibration effected from inaccuracy absorber spring stiffness but the higher absorber mass must be considered.

Department Mechanical Engineering Student's signature เอกพงษ์ ตั้งพัฒนเสรี

Field of Study Mechanical Engineering Advisor's signature .....

Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย รวมทั้งความพร้อมของชุดทดลองในห้องปฏิบัติการ Measurement & Instrumentation ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจที่กรุณาให้ยืมอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยสำหรับทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งช่วยแบ่งเบาค่าใช้จ่ายและวัสดุอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยไปได้อย่างมาก

ขอขอบคุณครูและช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยให้คำแนะนำในด้านงานช่าง และอำนวยความสะดวกในการยืมอุปกรณ์สำหรับทำงานช่างต่าง ๆ

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งคอยให้กำลังใจและให้คำแนะนำซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยอำนวยความสะดวกในด้านงานธุรการตลอดการทำงานวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่เห็นความสำคัญของการศึกษาและให้ความสนับสนุนด้านการศึกษามาโดยตลอด

ประโยชน์อันใดจากงานวิจัยนี้ ขอมอบแด่บิดา มารดา ครู อาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฏ

คำอธิบายสัญลักษณ์..... ด

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1-1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์..... 1

1-2 งานวิจัยที่ผ่านมา..... 2

1-3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... 9

1-4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 9

1-5 ขั้นตอนการทำการศึกษา..... 9

1-6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์..... 10

1-7 ภาพรวมของงานวิจัย..... 10

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการกันการสั่นสะเทือน 12

บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับตัวดูดซับการสั่นสะเทือน..... 20

3-1 ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสำหรับระบบที่ไม่มีตัวหน่วง..... 20

3-2 ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสำหรับระบบที่มีตัวหน่วง..... 25

บทที่ 4 สปริงที่สามารถปรับค่าความแข็งสปริง..... 30

4-1 สปริงอากาศ..... 30

4-1-1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสปริงอากาศ..... 30

4-1-2 วิธีการควบคุมความแข็งสปริงของสปริงอากาศ..... 32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4-2 คานที่สามารถเลื่อนตำแหน่งรองรับ 33

4-2-1 การหาระยะโก่งของคานโดยวิธีซิงกูลาริตี้ฟังก์ชัน..... 34

4-2-2 การหาค่าความแข็งสปริงของคานที่ใช้ในการทดลอง..... 35

4-3 เปรียบเทียบความแตกต่างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสปริงอากาศและคาน..... 37

บทที่ 5 การทดลองวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของระบบเมื่อติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน 39

5-1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ..... 43

5-2 อุปกรณ์การทดลอง..... 47

5-3 ขั้นตอนการทดลอง..... 50

5-4 ตำแหน่งและการวัดสัญญาณในพิกัดการเคลื่อนที่ทั้ง 6 พิกัด..... 51

5-5 ผลการทดลอง..... 56

5-6 อภิปรายผลการทดลอง..... 69

บทที่ 6 การทดลองวิเคราะห์ผลของอิเนอร์เชียบล็อก 74

6-1 อุปกรณ์การทดลอง..... 76

6-2 วิธีการทดลอง..... 76

6-3 ผลการทดลอง..... 77

6-4 อภิปรายผลการทดลอง..... 80

บทที่ 7 การทดลองวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของระบบเมื่อติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน 81

อุปกรณ์การทดลอง..... 84

7-1 การทดลอง 7.1 การทดลองวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของก้อนมวลหลักและก้อนมวลดูดซับ..... 86

7-1-1 วิธีการทดลอง..... 86

7-1-2 ผลการทดลอง..... 87

7-1-3 อภิปรายผลการทดลอง..... 101

7-1-4 ผลของค่าความหน่วงที่มีต่อระบบในการทดลอง..... 103

7-1-5 การแก้ไขค่าความแข็งสปริงของสปริงของตัวดูดซับ..... 106

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7-2 การทดลอง 7.2 การทดลองวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนมวล..... 113

7-2-1 วิธีการทดลอง..... 113

7-2-2 ผลการทดลอง..... 113

7-2-3 อภิปรายผลการทดลอง..... 121

บทที่ 8 การควบคุมความแข็งสปริงของสปริงของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน..... 124

บทที่ 9 การคำนวณออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนเพื่อใช้กับเครื่องจักรจริง..... 129

บทที่ 10สรุปผลวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ..... 133

10-1 สรุปผลวิทยานิพนธ์..... 133

10-2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย..... 134

10-3 ข้อเสนอแนะ..... 134

เอกสารอ้างอิง..... 135

บรรณานุกรม..... 136

ภาคผนวก..... 137

ภาคผนวก ก โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมระบบ..... 138

ภาคผนวก ข ตัวอย่างภาพสัญญาณโดเมนความถี่ที่ได้จากเครื่องมือวัด MICROLOG..... 160

ภาคผนวก ค ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) โดยประมาณ สำหรับสปริงที่ใช้วัสดุต่าง ๆ กัน..... 175

ภาคผนวก ง การคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบในบทที่ 5..... 176

ภาคผนวก จ คำตอบของระบบสมการ 5-18 ในบทที่ 5..... 178

ภาคผนวก ฉ การเคาะทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบ ในหัวข้อ 7-1-4 ผลของค่าความหน่วงที่มีต่อระบบในการทดลอง..... 179

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 182

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5-1 ข้อมูลดิบแสดงแอมพลิจูดการกระจัดตำแหน่งที่ติดตั้งโพรบ 6 ตำแหน่ง..... 56
ตารางที่ 5-2 การสั่นสะเทือนในพิกัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น x และพิกัดการเคลื่อนที่เชิงมุม θ ทาง ทฤษฎีและจากการทดลองที่ความเร็วรอบของเครื่องจักร 300 ถึง 1500 rpm..... 58
ตารางที่ 5-3 การสั่นสะเทือนในพิกัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น y และพิกัดการเคลื่อนที่เชิงมุม β ทาง ทฤษฎีและจากการทดลองที่ความเร็วรอบของเครื่องจักร 300 ถึง 1500 rpm..... 60
ตารางที่ 5-4 การสั่นสะเทือนในพิกัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น z ทางทฤษฎีและจากการทดลองที่ ความเร็วรอบของเครื่องจักร 300 ถึง 1500 rpm..... 62
ตารางที่ 5-5 การสั่นสะเทือนในพิกัดการเคลื่อนที่เชิงมุม γ ทางทฤษฎีและจากการทดลองที่ ความเร็วรอบของเครื่องจักร 300 ถึง 1500 rpm..... 64
ตารางที่ 5-6 แรงส่งผ่านไปยังพื้น 3 แนวแกนที่ความเร็วรอบเครื่องจักรต่าง ๆ 70
ตารางที่ 6-1 แอมพลิจูดการกระจัดในแนวตั้งเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ผลของการติดตั้ง อิเนอร์เชียบล็อก 77
ตารางที่ 6-2 ขนาดค่าการส่งผ่านในแนวตั้งเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ ผลของการติดตั้งอิเนอร์เชียบล็อก 78
ตารางที่ 7-1 ค่าการส่งผ่านของก้อนมวลหลักจากการทดลอง : อัตราส่วนมวล 0.205..... 88
ตารางที่ 7-2 ค่าการส่งผ่านของก้อนมวลหลักทางทฤษฎี : อัตราส่วนมวล 0.205..... 89
ตารางที่ 7-3 ค่า X_2/X_0 ของก้อนมวลดูดซับจากการทดลอง : อัตราส่วนมวล 0.205..... 94
ตารางที่ 7-4 ค่า X_2/X_0 ของก้อนมวลดูดซับทางทฤษฎี : อัตราส่วนมวล 0.205..... 95
ตารางที่ 7-5 ตำแหน่งรองรับคานที่เหมาะสมกับแต่ละความเร็วรอบของเครื่องจักร..... 101
ตารางที่ 7-6 ตัวประกอบแก้ไขสำหรับค่าความแข็งสปริงของสปริงของตัวดูดซับ (k_2)..... 106
ตารางที่ 7-7 ค่าการส่งผ่านของก้อนมวลหลักจากทางทฤษฎีที่ใช้ตัวประกอบแก้ไข : อัตราส่วนมวล 0.205..... 108
ตารางที่ 7-8 ค่าการส่งผ่านของก้อนมวลหลักจากการทดลอง : อัตราส่วนมวล 0.155..... 114
ตารางที่ 7-9 ค่าการส่งผ่านของก้อนมวลหลักจากทางทฤษฎี : อัตราส่วนมวล 0.155..... 115
ตารางที่ 7-10 ค่าการส่งผ่านของก้อนมวลหลักจากการทดลอง : อัตราส่วนมวล 0.254..... 116
ตารางที่ 7-11 ค่าการส่งผ่านของก้อนมวลหลักจากทางทฤษฎี : อัตราส่วนมวล 0.254..... 117

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 7-12 ค่าการส่งผ่านเมื่อค่าความแข็งสปริงของสปริงของตัวดูดซับ k2 คลาดเคลื่อน
เปรียบเทียบแต่ละอัตราส่วนมวล..... 122
ตารางที่ 7-13 เปรียบเทียบค่าการส่งผ่านเมื่ออัตราส่วนมวลคลาดเคลื่อนไป 10%..... 123
ตารางที่ 8-1 ลูคอัพเทเบิลที่ใช้ควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของสกรู..... 127
ตารางที่ 8-2 ผลการควบคุมระบบ..... 128
ตารางที่ ค-1 ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) โดยประมาณ
สำหรับสปริงที่ใช้วัสดุต่าง ๆ กัน..... 175

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1-1 ภาพตัวอย่างระบบการกันการสั่นสะเทือนแบบแอคทีฟแบบต่าง ๆ..... 3
รูปที่ 1-2 ภาพร่างของระบบในงานวิจัย..... 5
รูปที่ 1-3 แผนภาพระบบในการทดลอง..... 6
รูปที่ 1-4 สัญญาณแรงที่ลดลงเมื่อผ่านตัวกันการสั่นสะเทือน..... 6
รูปที่ 1-5 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบที่ยังไม่ได้ชดเชย..... 7
รูปที่ 1-6 ผลตอบสนองของตัวชดเชย..... 7
รูปที่ 1-7 ผลตอบสนองของระบบที่มีการชดเชย..... 7
รูปที่ 1-8 อัตราส่วนระหว่างแรงที่ส่งผ่านไปยังฐานรองรับของตัวกันการสั่นสะเทือนแบบแอคทีฟ
ที่มีการควบคุมแบบปิดต่อตัวกันการสั่นสะเทือนแบบแพสซีฟ..... 8
รูปที่ 2-1 เครื่องจักรที่มีการติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน..... 12
รูปที่ 2-2 ระบบเมื่อติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน (Vibration Isolator) มีตัวหน่วง (Damper)
และผังแรงอิสระ (Free Body Diagram)..... 13
รูปที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและมุมเฟสกับอัตราส่วนความถี่
โดยมีค่าอัตราส่วนความหน่วงต่าง ๆ กัน สำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรี..... 15
รูปที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ส่งผ่านไปยังพื้นหรือขนาดการกระจัดกับอัตราส่วนความถี่
สำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรีโดยไม่มีค่าความหน่วง
และความถี่ธรรมชาติ 400 rpm 16
รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ส่งผ่านไปยังพื้นหรือขนาดการกระจัดกับอัตราส่วน
ความถี่สำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรีโดยมีค่าอัตราส่วนความหน่วง 0.05
และความถี่ธรรมชาติ 400 rpm 17
รูปที่ 2-6 ตัวกันการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ..... 18
รูปที่ 3-1 แสดงระบบของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนและผังแรงอิสระ..... 20
รูปที่ 3-2 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านกับ $\frac{\omega}{\omega_{22}}$ และ $\frac{X_2}{X_0}$ กับ $\frac{\omega}{\omega_{22}}$
สำหรับระบบ 2 ลำดับขั้นความเสรีในแนวตั้ง โดย $\omega_{11} = \omega_{22}$
และอัตราส่วนมวลเป็น 0.2..... 23
รูปที่ 3-3 แสดงระบบของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่มีตัวหน่วง..... 25

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3-4 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{X_1}{X_0}$ และ $\frac{X_2}{X_0}$ กับ $\frac{\omega}{\omega_{22}}$ สำหรับระบบ 2 ลำดับขั้นความเสรีในแนวตั้ง โดย $\omega_{11} = \omega_{22}$, μ = 0.2, $c_1 = c_2 = c$ และ c/c_c = 0.05..... 28
รูปที่ 4-1 สปริงอากาศ..... 30
รูปที่ 4-2 แผนภาพแสดงการควบคุมระบบของสปริงอากาศ..... 32
รูปที่ 4-3 ค่าความแข็งสปริงของคาน..... 33
รูปที่ 4-4 คานที่สามารถเลื่อนตำแหน่งรองรับที่ใช้ในการทดลอง..... 34
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะรองรับของคาน a และความดันภายในสปริงอากาศ P กับความเร็วรอบของเครื่องจักร (โดยคานยาว 50 cm. กว้าง 9 cm. หนา 2.8 mm. สปริงอากาศสูง 10 cm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm.)..... 38
รูปที่ 5-1 ระบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของตัวกันการสั่นสะเทือนโดยมี 6 ลำดับขั้นความเสรี..... 40
รูปที่ 5-2 ผังแรงอิสระของระบบที่ติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน..... 41
รูปที่ 5-3 ค่าความแข็งสปริงในแนวแกน x y และ z..... 42
รูปที่ 5-4 มิติของจานเจาะรูที่ใช้สร้างแรงไม่สมดุล..... 46
รูปที่ 5-5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและจานเจาะรูเยื้องศูนย์ที่ใช้แทนเครื่องจักร..... 48
รูปที่ 5-6 อินเวอร์ตเตอร์..... 48
รูปที่ 5-7 ไมโครล็อกและโพรบ..... 49
รูปที่ 5-8 ระบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง..... 49
รูปที่ 5-9 ตำแหน่งที่ติดโพรบเพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือน 6 ลำดับขั้นความเสรี..... 52
รูปที่ 5-10 ตำแหน่งที่ติดตั้งโพรบและวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน x..... 53
รูปที่ 5-11 ตำแหน่งที่ติดตั้งโพรบและวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน y..... 53
รูปที่ 5-12 ตำแหน่งที่ติดตั้งโพรบและวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน z..... 54
รูปที่ 5-13 ตำแหน่งที่ติดตั้งโพรบและวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน z_θ 54
รูปที่ 5-14 ตำแหน่งที่ติดตั้งโพรบและวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน y_β..... 55
รูปที่ 5-15 ตำแหน่งที่ติดตั้งโพรบและวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน y_γ..... 55

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านในแนวแกน x และอัตราส่วนความถี่ สำหรับระบบที่ติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน วิเคราะห์แบบ 6 ลำดับขั้นความเสรี..... 59
รูปที่ 5-17 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการกระจัดเชิงมุม θ_0 และอัตราส่วนความถี่ สำหรับระบบที่ติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน วิเคราะห์แบบ 6 ลำดับขั้นความเสรี..... 59
รูปที่ 5-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านในแนวแกน y และอัตราส่วนความถี่ สำหรับระบบที่ติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน วิเคราะห์แบบ 6 ลำดับขั้นความเสรี..... 61
รูปที่ 5-19 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการกระจัดเชิงมุม β_0 และอัตราส่วนความถี่ สำหรับระบบที่ติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน วิเคราะห์แบบ 6 ลำดับขั้นความเสรี..... 61
รูปที่ 5-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านในแนวแกน z และอัตราส่วนความถี่ สำหรับระบบที่ติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน วิเคราะห์แบบ 6 ลำดับขั้นความเสรี..... 63
รูปที่ 5-21 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการกระจัดเชิงมุม γ_0 และอัตราส่วนความถี่ สำหรับระบบที่ติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน วิเคราะห์แบบ 6 ลำดับขั้นความเสรี..... 65
รูปที่ 5-22 ผังแรงอิสระของระบบ เมื่อจุด CG เยื้องไปตามแนวแกน x เป็นระยะ l..... 71
รูปที่ 6-1 ภาพวาดระบบที่ใช้ในการทดลองวิเคราะห์ผลของอิเนอร์เชียบล็อก..... 75
รูปที่ 6-2 ภาพถ่ายระบบที่ใช้ในการทดลองวิเคราะห์ผลของอิเนอร์เชียบล็อก..... 75
รูปที่ 6-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการกระจัดในแนวตั้งและอัตราส่วนความถี่ เพื่อเปรียบเทียบผลของอิเนอร์เชียบล็อก : วิเคราะห์แบบ 1 ลำดับขั้นความเสรีในแนวตั้ง.. 79
รูปที่ 6-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดค่าการส่งผ่านในแนวตั้งและอัตราส่วนความถี่ เพื่อเปรียบเทียบผลของอิเนอร์เชียบล็อก : วิเคราะห์แบบ 1 ลำดับขั้นความเสรีในแนวตั้ง.. 79
รูปที่ 7-1 ภาพวาดระบบที่ใช้ในการทดลองวิเคราะห์ผลของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน..... 82
รูปที่ 7-2 ภาพถ่ายระบบที่ใช้ในการทดลองวิเคราะห์ผลของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน..... 83
รูปที่ 7-3 ตำแหน่งที่ติดตั้งโพรบเพื่อวัดสัญญาณ x_1 83
รูปที่ 7-4 ตำแหน่งที่ติดตั้งโพรบเพื่อวัดสัญญาณ x_2 84
รูปที่ 7-5 มิติของคาน 3 ขนาด..... 85
รูปที่ 7-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและอัตราส่วนความถี่ของก้อนมวลหลัก เมื่อเลื่อนจุดรองรับไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ วิเคราะห์ระบบแบบ 2 ลำดับขั้นความเสรีในแนวตั้ง : อัตราส่วนมวล 0.205 90

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า X_2/X_0 และอัตราส่วนความถี่ของก้อนมวลดูดซับ เมื่อเลื่อนจุดรองรับไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ วิเคราะห์ระบบแบบ 2 ลำดับขั้นความเสรีในแนวตั้ง : อัตราส่วนมวล 0.205..... 96
รูปที่ 7-8 ระบบในการทดลองเมื่อมีความหน่วง..... 103
รูปที่ 7-9 ระบบในการทดลองที่ทำการเคาะทดสอบเพื่อหาค่าความหน่วง..... 103
รูปที่ 7-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและความเร็วรอบของเครื่องจักรเพื่อวิเคราะห์ผลของค่าความหน่วงต่อระบบ (คำนวณทางทฤษฎี)..... 105
รูปที่ 7-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและอัตราส่วนความถี่ของก้อนมวลหลัก เมื่อเลื่อนจุดรองรับไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ เปรียบเทียบเมื่อมีการใช้ตัวประกอบแก้ไข (วิเคราะห์ระบบแบบ 2 ลำดับขั้นความเสรีในแนวตั้ง) : อัตราส่วนมวล0.205..... 109
รูปที่ 7-12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและอัตราส่วนความถี่ ที่มีอัตราส่วนมวลต่างกัน โดยมีตำแหน่งค่าการส่งผ่านต่ำที่สุดที่อัตราส่วนความถี่เดียวกัน : วิเคราะห์ระบบแบบ 2 ลำดับขั้นความเสรีในแนวตั้ง..... 118
รูปที่ 7-13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและอัตราส่วนความถี่ ที่มีอัตราส่วนมวลต่างกัน โดยมีตำแหน่งค่าการส่งผ่านต่ำที่สุดที่จุดเดียวกัน : วิเคราะห์ระบบแบบ 2 ลำดับขั้นความเสรีในแนวตั้ง (ทางทฤษฎี)..... 120
รูปที่ 8-1 การควบคุมตำแหน่งรองรับคาน..... 124
รูปที่ 8-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบการควบคุม..... 125
รูปที่ 8-3 วงจรขับมอเตอร์โดยใช้ MOSFET 4 ตัว..... 126
รูปที่ 8-4 วงจรโฟโตไดโอดใช้วัดความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้แทนเครื่องจักร..... 126
รูปที่ 9-1 เครื่องจักรจริงที่จะออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือน..... 129
รูปที่ 9-2 ภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่ออกแบบและมิติเมื่อติดตั้งกับเครื่องจักร..... 131

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ข-1 ภาพสัญญาณโดเมนความถี่ของการสั่นสะเทือน x จากข้อมูลดิบในตาราง 5-1..... 160
รูปที่ ข-2 ภาพสัญญาณโดเมนความถี่ของการสั่นสะเทือน y จากข้อมูลดิบในตาราง 5-1..... 165
รูปที่ ข-3 ภาพสัญญาณโดเมนความถี่ของการสั่นสะเทือน z จากข้อมูลดิบในตาราง 5-1..... 170
รูปที่ ฉ-1 ระบบในการทดลองเมื่อมีความหน่วง..... 179
รูปที่ ฉ-2 ระบบในการทดลองที่ทำการเคาะทดสอบเพื่อหาค่าความหน่วง..... 180
รูปที่ ฉ-3 สัญญาณความเร่ง $\ddot{x}_1$ ในช่วงทรานเซียนในรูปแบบโดเมนเวลา..... 180
รูปที่ ฉ-4 สัญญาณความเร่ง $\ddot{x}_2$ ในช่วงทรานเซียนในรูปแบบโดเมนเวลา..... 181

คำอธิบายสัญลักษณ์

a	คือ ระยะรองรับของคาน
E	คือ ยังโมดูลัส (Young's Modulus)
c	คือ ค่าความหน่วงสำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรี
c_1	คือ ค่าความหน่วงของตัวกันการสั่นสะเทือน
c_2	คือ ค่าความหน่วงที่แฝงอยู่ในสปริงของตัวดูดซับ
F_0	คือ ขนาดของแรงไม่สมดุล (Unbalance Force)
F_T	คือ แรงที่ส่งผ่านไปยังพื้น (Transmitted Force)
F_y	คือ แรงไม่สมดุลในแนวแกน y
F_x	คือ แรงไม่สมดุลในแนวแกน x
I	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของคาน
I_x, I_y, I_z	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลรอบแกน x, y, z ตามลำดับ
k	คือ ค่าความแข็งสปริงสำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรี
k_1	คือ ค่าความแข็งสปริงของตัวกันการสั่นสะเทือน
k_2	คือ ค่าความแข็งสปริงของสปริงของตัวดูดซับ
k_x	คือ ค่าความแข็งสปริงในแนวแกน x
k_y	คือ ค่าความแข็งสปริงในแนวแกน y
k_z	คือ ค่าความแข็งสปริงในแนวแกน z
m	คือ น้ำหนักของเครื่องจักรและโครงสร้างทั้งหมดที่วางบนตัวกันการสั่นสะเทือน
m_1	คือ น้ำหนักของก้อนมวลหลัก (Main Mass)
m_2	คือ นักหนักของก้อนมวลดูดซับ (Absorber Mass)
TR	คือ ค่าการส่งผ่าน (Transmissibility)
x	คือ การกระจัดจากตำแหน่งสมดุลทางสถิตในแนวแกน x
x_1	คือ การกระจัดจากตำแหน่งสมดุลทางสถิตของเครื่องจักรของก้อนมวลหลักในแนวตั้ง
x_2	คือ การกระจัดจากตำแหน่งสมดุลทางสถิตของเครื่องจักรของก้อนมวลดูดซับในแนวตั้ง
X	คือ ขนาดของการกระจัด x
X_1	คือ ขนาดของการกระจัด x_1
X_2	คือ ขนาดของการกระจัด x_2

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

y คือ การกระจัดจากตำแหน่งสมดุลทางสถิตในแนวแกน y

y_β คือ การกระจัดในแนวแกน y เพื่อใช้ในการหาการกระจัดเชิงมุม β

y_γ คือ การกระจัดในแนวแกน y เพื่อใช้ในการหาการกระจัดเชิงมุม γ

Y คือ ขนาดของการกระจัด y

Y_β คือ ขนาดของการกระจัด y_β

Y_γ คือ ขนาดของการกระจัด y_γ

z คือ การกระจัดจากตำแหน่งสมดุลทางสถิตในแนวแกน z

z_θ คือ การกระจัดในแนวแกน z เพื่อใช้ในการหาการกระจัดเชิงมุม θ

Z คือ ขนาดของการกระจัด z

Z_θ คือ ขนาดของการกระจัด z_θ

θ คือ การกระจัดเชิงมุมรอบแกน y

β คือ การกระจัดเชิงมุมรอบแกน x

γ คือ การกระจัดเชิงมุมรอบแกน z

θ_0 คือ ขนาดของการกระจัดเชิงมุม θ

β_0 คือ ขนาดของการกระจัดเชิงมุม β

γ_0 คือ ขนาดของการกระจัดเชิงมุม γ

ζ คือ ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) สำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรี

ζ_1 คือ ค่าอัตราส่วนความหน่วงของตัวกันการสั่นสะเทือน

ζ_2 คือ ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่แฝงอยู่ในสปริงของตัวดูดซับ

ω คือ ความเร็วรอบของเครื่องจักร

ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ

ϕ คือ มุมเฟสของ X เทียบกับแรงที่มากระตุ้น

μ คือ อัตราส่วนมวล