

การศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วยสเปกตรัมและเซปส์ตรัม



นาย สมชาย เดโชธรรมสถิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-909-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

23 ก.ค. 2546

I17961439

**A STUDY OF VIBRATION ANALYSIS OF GEAR-TRAINS
BY SPECTRUM AND CEPSTRUM**



MR. SOMCHAI DECHOTAMSTIT

**A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

**Department of Mechanical Engineering
Graduate School**

Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-638-909-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการวิเคราะห์สัณฐานการสันสะท้อนของชุดเฟืองด้วย
สเปกตรัมและเซปส์ตรัม

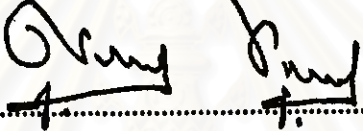
โดย นาย สมชาย เดโชธรรมสถิต

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล


อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ

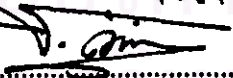
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

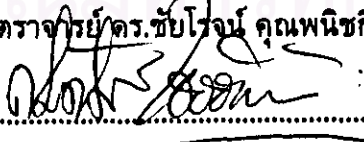

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล ป่านงาม)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

สมชาย เตโชธรรมสถิต : การศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วย
สเปกตรัมและเซปส์ตรัม (A STUDY OF VIBRATION ANALYSIS OF GEAR-TRAINS BY
SPECTRUM AND CEPSTRUM) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล , อ.ที่ปรึกษาร่วม
: ผศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ ; 138 หน้า. ISBN 974-638-909-2

งานวิจัยนี้ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วยสเปกตรัมและ
เซปส์ตรัม โดยทำการทดลองวิเคราะห์สัญญาณจากชุดทดลองซึ่งจำลองให้ชุดเฟืองมีการสึกหรอของ
ซี่ฟันเฟืองและมีการเยื้องศูนย์ของเฟืองในระดับต่างๆกัน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในสภาพ
ปกติประกอบด้วย ชุดฮาร์โมนิกของ GMF และแถบความถี่ข้าง ขณะที่เซปส์ตรัมจะแสดงยอดสัญญาณ
ที่ราชมอนิกของเฟืองขับและเฟืองตามที่มีแอมพลิจูดระดับหนึ่ง ในกรณีที่ชุดเฟืองมีปัญหาการสึกหรอ
ของซี่ฟันจะพบว่า การสั่นสะเทือนมีระดับสูงขึ้นกว่าเดิม สเปกตรัมจะมี แถบความถี่ข้างที่สูงขึ้น พร้อมกับ
มีสัญญาณแถบความถี่กว้างและมี ชุดฮาร์โมนิกของ GMF เพิ่มขึ้น ส่วนราชมอนิกของเฟืองขับที่สึกหรอ
จะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นแต่ราชมอนิกของเฟืองตามกลับมีแอมพลิจูดลดลงแตกต่างกัน ในกรณีที่ชุดเฟืองมี
ปัญหาการเยื้องศูนย์เพิ่มมากขึ้นจะพบว่า การสั่นสะเทือนอาจมีระดับสูงขึ้นหรือลดลง สเปกตรัมจะมี แอม
พลิจูดของแถบความถี่ข้างและแอมพลิจูดของความถี่การหมุนของเฟืองที่เยื้องศูนย์ เพิ่มสูงขึ้น แต่การเพิ่ม
ของแอมพลิจูดดังกล่าวมีรูปแบบไม่ชัดเจน ขณะที่ยอดราชมอนิกของเฟืองที่เยื้องศูนย์มีขนาดสูงขึ้นเด่น
ชัดเมื่อเทียบกับเฟืองปกติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา ...2540.....

ลายมือชื่อนิติกร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

** C716236 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: VIBRATION / SPECTRUM / CEPSTRUM / GEAR / GEARBOX / WEAR / ECCENTRIC / GMF /
SIDEBANDS / DIAGNOSIS / MONITORING

SOMCHAI DECHOTAMSATIT : A STUDY OF VIBRATION ANALYSIS OF GEAR-TRAINS BY
SPECTRUM AND CEPSTRUM. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF.KAUKEART
BOONCHUKOSOL, Dr.Eng. THESIS CO-ADVISOR : ASSIST.PROF.CHAIROTE
KUNPANITCHAKIT, Ph.D. 138 pp. ISBN 974-638-909-2.

This research studied the analysis of vibration signals of gear-trains by using spectrum and cepstrum. The experiments were conducted to simulate different levels of gear wear and gear eccentricity.

The results of this study indicate that the spectrum of the vibration signals are comprised of GMF harmonics and sidebands peaks for normal gears. While the cepstrum shows a same order of magnitude of harmonics of the driving and the driven gears. In case of increasing wear of gear teeth, vibration increases and the spectrum shows sporadic increasing trend of GMF sidebands with existence of broadband frequency and sub-harmonics of GMF. The peak magnitude of the harmonic of the worn gears increases and separates further from the harmonic of the normal gears which decreases. In case of increasing eccentricity of gears, the spectrum also indicates inconsistent increasing trend of GMF sidebands and rotational speed peak magnitudes. While the cepstrum clearly shows the increasing of the harmonic peak of the eccentric gears over the harmonic of the normal gear.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
ปีการศึกษา..... 2540.....

ลายมือชื่อนิสิต..... นก ฐน.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วมวิทยานิพนธ์ ซึ่งทั้งสองท่านได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และหาแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อความกรุณาจาก อาจารย์ทั้งสองท่าน และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัย ของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

งานวิจัยนี้นับได้ว่าเป็นผลงานหนึ่งของหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษา เครื่องจักรกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เอกสารทางวิชาการและ อุปกรณ์ทดลองส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นของหน่วยปฏิบัติการฯ จึงต้องขอขอบพระคุณหน่วยปฏิบัติการฯ เป็นอย่างยิ่ง

ระหว่างทำการวิจัยมีปัญหาการชำรุดของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการทำวิจัย ปัญหานี้ได้รับการช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พิชิต ฤกษ์นันท์ ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และในระหว่างที่ทำการทดลอง ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ก็ได้รับความกรุณาจาก ผศ.ดร.สุรเชษฐ์ ชูติมา ซึ่ง ให้ความสะดวกในการใช้สถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ และยังให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา ผู้วิจัย รู้สึกซาบซึ้งอย่างยิ่งต่อความกรุณาของอาจารย์ทั้งสองท่าน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอก ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้กำลังใจและคอยให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ และที่ซึ่งใจยิ่งนักก็คือความ เอื้ออาทรที่มีต่อกัน นอกจากนี้ ที่ประทับใจมากก็คือ เพื่อนนักศึกษาที่มหาวิทยาลัย พระจอมเกล้าธนบุรี หลายท่านได้ให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยอย่างมากมาย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณน้องสาวที่ช่วยดูแลภาระกิจส่วนตัวของผู้วิจัยและคอยให้กำลังใจตลอดมา ทำให้ผู้วิจัยสามารถอุทิศเวลาให้กับงานวิจัยได้อย่างเต็มที่

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัย มีความเข้าใจ และคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา ทำให้สามารถฝ่าฟันอุปสรรคนานาประการจนสำเร็จการศึกษา

ประโยชน์อันใดจากงานวิจัยนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแต่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน เทอญ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ฅ |
| สารบัญภาพ | ญ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์ | ด |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| 1-1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ | 1 |
| 1-2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ | 2 |
| 1-3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ | 2 |
| 1-4 การดำเนินงานวิจัย | 2 |
| 1-5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ | 3 |
| 2 ทฤษฎีของการวิเคราะห์สัญญาณ | 4 |
| 2-1 การสังเคราะห์ | 4 |
| 2-2 โดเมนเวลาและโดเมนความถี่ | 4 |
| 2-3 การวิเคราะห์ฟูรีเยร์ | 6 |
| 2-4 สเปกตรัม | 6 |
| 2-5 เชปส์ตรัม | 7 |
| 2-6 การสังเคราะห์ของเครื่องจักร | 9 |
| 2-7 ตัวอย่างกรณีศึกษาการวิเคราะห์เชปส์ตรัม | 10 |
| 3 การสังเคราะห์ของชุดเฟือง | 13 |
| 3-1 สมการการเคลื่อนที่ของชุดเฟือง | 13 |
| 3-2 สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ ξ | 17 |
| 3-3 การสังเคราะห์ของชุดเฟือง | 18 |
| 3-4 ปัญหาการเยื้องศูนย์ของเฟือง | 20 |
| 3-5 ปัญหาการสึกหรอของซี่ฟัน | 21 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 4 | การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง | 23 |
| 4-1 | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง ... | 23 |
| 4-2 | การศึกษาผลการแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง จากแบบจำลอง | 28 |
| 4-3 | สรุปผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณ การสั่นสะเทือนของชุดเฟือง | 47 |
| 5 | การทดลองวิเคราะห์ที่สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง ที่มีปัญหาการสึกหรอของซีฟัน | 49 |
| 5-1 | อุปกรณ์การทดลอง | 49 |
| 5-2 | การทดลอง | 51 |
| 5-3 | การวิเคราะห์สัญญาณ | 53 |
| 5-4 | ผลการทดลอง | 56 |
| 5-5 | อภิปรายผลการทดลอง | 83 |
| 5-6 | สรุปผลการทดลอง | 88 |
| 6 | การทดลองวิเคราะห์ที่สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง ที่มีปัญหาการเยื้องศูนย์ของเฟือง | 89 |
| 6-1 | อุปกรณ์การทดลอง | 89 |
| 6-2 | การทดลอง | 91 |
| 6-3 | การวิเคราะห์สัญญาณ | 93 |
| 6-4 | ผลการทดลอง | 96 |
| 6-5 | อภิปรายผลการทดลอง | 121 |
| 6-6 | สรุปผลการทดลอง | 124 |
| 7 | สรุปผลการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ | 125 |
| | รายการอ้างอิง | 127 |
| | บรรณานุกรม | 128 |
| | ภาคผนวก | 129 |
| | ภาคผนวก ก | 129 |
| | ภาคผนวก ข | 133 |
| | ภาคผนวก ค | 135 |
| | ภาคผนวก ง | 136 |
| | ประวัติผู้วิจัย | 138 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จำลองสัญญาณสั้นสะท้อนของชุดเฟือง | 30 |
| ตารางที่ 4-2 ค่าสัญญาณของสัญญาณการสั้นสะท้อนของชุดเฟืองจาก แบบจำลองเมื่อทดลองเปลี่ยนค่ามุมเฟส | 36 |
| ตารางที่ 4-3 ค่าสัญญาณของสัญญาณการสั้นสะท้อนของชุดเฟืองจาก แบบจำลองเมื่อทดลองเปลี่ยนการมอดูเลตแอมพลิจูด | 38 |
| ตารางที่ 4-4 ค่าสัญญาณของสัญญาณการสั้นสะท้อนของชุดเฟืองจาก แบบจำลองเมื่อทดลองเปลี่ยนการมอดูเลตความถี่ | 41 |
| ตารางที่ 4-5 ค่าสัญญาณของสัญญาณการสั้นสะท้อนของชุดเฟืองจาก แบบจำลองเมื่อมีสัญญาณรบกวนในระดับต่าง ๆ กัน | 46 |
| ตารางที่ 5-1 การเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ Peak และ RMS ของชุดเฟือง 1 | 57 |
| ตารางที่ 5-2 การเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ Peak และ RMS ของชุดเฟือง 2 | 71 |
| ตารางที่ 6-1 สภาพะการทำงานของชุดเฟืองในการทดลองแต่ละชุด | 92 |
| ตารางที่ 6-2 ค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สเปกตรัมและเซปส์ตรัม สำหรับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ Signal Analyzer 2035 | 93 |
| ตารางที่ 6-3 ความถี่ของยอดสเปกตรัมและคิวเฟรนซ์ของยอดเซปส์ตรัม ที่ทำการวิเคราะห์ค่าสัญญาณ | 94 |

สารบัญญภาพ

| | | หน้า |
|--------------|--|------|
| รูปที่ 2-1 | ความสัมพันธ์ของสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ | 5 |
| รูปที่ 2-2 | สเปกตรัมและเชปส์ตรัมของคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ถูกมอดูเลต | 8 |
| รูปที่ 2-3 | สเปกตรัมและเชปส์ตรัมจากชุดเฟืองที่เสื่อมสภาพแล้วชุดหนึ่ง [6] | 11 |
| รูปที่ 3-1 | การขบกันของเฟือง | 13 |
| รูปที่ 3-2 | แบบจำลองทางจลน์ของชุดเฟือง [7] | 15 |
| รูปที่ 3-3 | ลักษณะทั่วไปของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง บนโดเมนความถี่ | 20 |
| รูปที่ 3-4 | ลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนความถี่ เมื่อชุดเฟืองมีปัญหาการเยื้องศูนย์ | 21 |
| รูปที่ 3-5 | การเปลี่ยนแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง บนโดเมน ความถี่เมื่อชุดเฟืองมีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟัน | 22 |
| รูปที่ 4-1 | แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถที่วิ่งไปบนทางขรุขระซึ่งคล้ายกับ การสั่นสะเทือนของชุดเฟือง | 24 |
| รูปที่ 4-2 | ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากแบบจำลอง ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตาราง 4-1 | 32 |
| รูปที่ 4-3 | โปรแกรม MathCAD Plus 6.0 ซึ่งใช้จำลองสัญญาณการสั่นสะเทือน ของชุดเฟือง | 33 |
| รูปที่ 4-3 ก | โปรแกรมส่วนที่ใช้กำหนดพารามิเตอร์ | 33 |
| รูปที่ 4-3 ข | โปรแกรมส่วนที่สร้างแบบจำลองสัญญาณและแปลงสัญญาณ | 34 |
| รูปที่ 4-3 ค | โปรแกรมส่วนที่คำนวณค่าสัญญาณ | 35 |
| รูปที่ 4-4 | ผลกระทบของการมอดูเลตแอมพลิจูดต่อค่าแอมนิจูดของยอดเชปส์ตรัม | 40 |
| รูปที่ 4-5 | โปรแกรม MathCAD Plus 6.0 จำลองสัญญาณการสั่นสะเทือนของ ชุดเฟืองให้มีสัญญาณรบกวน | 43 |
| รูปที่ 4-6 | เปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่ไม่มีสัญญาณรบกวน และมีสัญญาณรบกวนระดับที่ 2 | 44 |
| รูปที่ 4-6ก | สัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวน | 44 |
| รูปที่ 4-6ข | สัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนระดับที่ 2 | 45 |
| รูปที่ 5-1 | แผนภาพของชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการ สึกหรอของซี่ฟัน | 49 |

| | | |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 5-2 | รูปถ่ายชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรอของซีฟัน | 50 |
| รูปที่ 5-3 | ผังแสดงการต่ออุปกรณ์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือน | 50 |
| รูปที่ 5-4 | แสดงการติดตั้งตัวตรวจรู้บนแบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง และต่อตัวตรวจรู้ เข้ากับเครื่องขยายประจุ | 51 |
| รูปที่ 5-5 | รูปถ่ายเฟืองขับก่อนทำการทดลองและหลังจากทำการทดลอง | 52 |
| รูปที่ 5-6 | ภาพบนหน้าจอมอนิเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ Signal Analyzer 2035 | 53 |
| รูปที่ 5-7 | ตำแหน่งของค่าสัญญาณ 1xGMF 2XGMF และ 3XGMF บนโดเมนความถี่ค่าสัญญาณ 1/P และ 1/G บนโดเมนคิวเฟรมซี สัญญาณที่แสดงในรูปถูกจำลองจากแบบจำลองในบทที่ 4 | 55 |
| รูปที่ 5-8 | ค่าสัญญาณ Peak และ RMS ของชุดเฟือง 1 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 57 |
| รูปที่ 5-9 | ค่าสัญญาณ G และ P ของชุดเฟือง 1 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 58 |
| รูปที่ 5-10 | ค่าสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF ของชุดเฟือง 1 กับระยะ เวลาทำงานตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 59 |
| รูปที่ 5-11 | ค่าสัญญาณ SBD-G และ SBD-P ของชุดเฟือง 1 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 61 |
| รูปที่ 5-12 | ค่าสัญญาณ 1/G และ 1/P กับระยะเวลาทำงาน และเส้นโค้งแสดง แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ ของชุดเฟือง 1 ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 62 |
| รูปที่ 5-13 | สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัด ที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 63 |
| รูปที่ 5-14 | เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 1 ซึ่งตรวจวัด ที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 66 |
| รูปที่ 5-15 | ค่าสัญญาณ Peak และ RMS ของชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 70 |
| รูปที่ 5-16 | ค่าสัญญาณ G และ P ของชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงานตรวจวัด ที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 71 |
| รูปที่ 5-17 | ค่าสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF ของชุดเฟือง 2 กับระยะ เวลาทำงานตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 72 |
| รูปที่ 5-18 | ค่าสัญญาณ SBD-G และ SBD-P ของชุดเฟือง 2 กับระยะเวลาทำงาน ตรวจวัดที่แบริ่ง 2 ทิศแนวตั้ง | 74 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| รูปที่ 5-19 | ค่าสัญญาณ 1/G และ 1/P กับระยะเวลาทำงาน และเส้นโค้งแสดง แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ ของชุดเฟือง 2 ตรวจวัดที่แบริง 2 ทิศแนวตั้ง | 75 |
| รูปที่ 5-20 | สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัด ที่แบริง 2 ทิศแนวตั้ง | 76 |
| รูปที่ 5-21 | เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 2 ซึ่งตรวจวัดที่แบริง 2 ทิศแนวตั้ง | 79 |
| รูปที่ 5-22 | ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณจากประสบการณ์ ของ Wowk [4] (หน้า 164) | 85 |
| รูปที่ 5-23 | ความสัมพันธ์ระหว่างยอดเซปส์ตรัม 1_P และ 1_G กับ ค่าสัดส่วน (AM1/AM2) จากผลการศึกษาในบทที่ 4..... | 87 |
| รูปที่ 6-1 | แผนภาพของชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มี ปัญหาการเยื้องศูนย์ของเฟือง | 89 |
| รูปที่ 6-2 | รูปถ่ายชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการเยื้องศูนย์ | 90 |
| รูปที่ 6-3 | รูปถ่ายเฟืองขับและบุชที่ใช้ในการทดลองวิเคราะห์สัญญาณ การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการเยื้องศูนย์ | 90 |
| รูปที่ 6-4 | ผังแสดงการต่ออุปกรณ์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือน | 91 |
| รูปที่ 6-5 | แสดงการติดตั้งตัวตรวจรับแบริง 2 ทิศแนวตั้ง และ ต่อตัวตรวจรู้ เข้ากับเครื่องขยายประจุ | 92 |
| รูปที่ 6-6 | ตำแหน่งของสัญญาณ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF บนโดเมนความถี่ ค่าสัญญาณ 1/P และ 1/G บนโดเมนคิวเฟรนซี สำหรับการทดลองชุดที่ 1 | 95 |
| รูปที่ 6-7 | สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 1 ตรวจวัดที่แบริง 2 ทิศแนวตั้ง | 97 |
| รูปที่ 6-8 | สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 1 ตรวจวัดที่แบริง 2 ทิศแนวนอน | 98 |
| รูปที่ 6-9 | เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 1 ตรวจวัดที่แบริง 2 ทิศแนวตั้ง | 99 |
| รูปที่ 6-10 | เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 1 ตรวจวัดที่แบริง 2 ทิศแนวนอน | 100 |
| รูปที่ 6-11 | ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง กับระยะเยื้องศูนย์ของเฟืองขับ ตรวจวัดที่แบริง 2 ทิศแนวตั้ง สำหรับชุดทดลองชุดที่ 1 | 102 |
| รูปที่ 6-12 | ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง กับระยะเยื้องศูนย์ของเฟืองขับ ตรวจวัดที่แบริง 2 ทิศแนวนอนสำหรับชุดทดลองชุดที่ 1 | 103 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| รูปที่ 6-13 | สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 2 ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง | 105 |
| รูปที่ 6-14 | สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 2 ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวนอน | 106 |
| รูปที่ 6-15 | เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 2 ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง | 107 |
| รูปที่ 6-16 | เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 2 ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวนอน | 108 |
| รูปที่ 6-17 | ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนชุดเฟือง กับระยะเยื้องศูนย์กลางของเฟืองขับ ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง สำหรับการทดลองชุดที่ 2 | 110 |
| รูปที่ 6-18 | ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง กับระยะเยื้องศูนย์กลางของเฟืองขับ ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวนอน สำหรับการทดลองชุดที่ 2 | 111 |
| รูปที่ 6-19 | สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 3 ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง | 113 |
| รูปที่ 6-20 | สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 3 ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวนอน | 114 |
| รูปที่ 6-21 | เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 3 ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง | 115 |
| รูปที่ 6-22 | เซปส์ตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจากการทดลองชุดที่ 3 ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวนอน | 116 |
| รูปที่ 6-23 | ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง กับระยะเยื้องศูนย์กลางของเฟืองขับ ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวตั้ง สำหรับการทดลองชุดที่ 3 | 118 |
| รูปที่ 6-24 | ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง กับระยะเยื้องศูนย์กลางของเฟืองขับ ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวนอน สำหรับการทดลองชุดที่ 3 | 119 |
| รูปที่ 6-25 | ความสัมพันธ์ระหว่างยอดเซปส์ตรัม 1_P และ 2_G กับค่าสัดส่วน (AM1/AM2) จากผลการศึกษาในบทที่ 4 | 122 |
| รูปที่ 6-26 | สเปกตรัมของสัญญาณจากการทดลองชุดที่ 3 ตรวจวัดที่แบร์ริง 2 ทิศแนวนอน แสดงแอมพลิจูดบนสเกลลอการิทึม | 123 |

คำอธิบายสัญลักษณ์

- θ_1 และ θ_2 คือ การขจัดเชิงมุมของเฟือง 1 และเฟือง 2 ตามลำดับ
- ω_1 คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (mean angular velocity) ของเฟือง 1
- ω_2 คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของเฟือง 2
- R_1 และ R_2 คือ รัศมีของทรงกระบอกฐานของเฟือง 1 และเฟือง 2 ตามลำดับ
- I_1 และ I_2 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยมวล (mass moment of inertia) ของเฟือง 1 และเฟือง 2 ตามลำดับ
- T_1 และ T_2 คือ แรงบิดขนาดคงที่ ซึ่งกระทำกับเฟือง 1 และเฟือง 2 ตามลำดับ
- W คือ แรงที่ส่งผ่านระหว่างฟันที่สัมผัสกัน มีทิศทางอยู่บนระนาบสัมผัส
- Δ คือ ระยะพิตช์ฐาน (base pitch) ของฟันเฟือง เป็นค่าคงที่เท่ากับ (เส้นรอบวงกลมพิตช์ฐาน)/(จำนวนฟัน)
- K_T คือ ความแข็งเกร็งของการขบเฟืองในขณะนั้น (instantaneous mesh stiffness) ของเฟืองคู่
- C_T คือ ความยืดหยุ่นของการขบเฟืองในขณะนั้น (instantaneous mesh compliance) ของเฟืองคู่
- C_{Tav} คือ ความยืดหยุ่นของการขบเฟืองเฉลี่ย (time average mesh compliance) ของเฟืองคู่ เป็นค่าคงที่
- δC_T คือ ค่าแปรปรวนความยืดหยุ่นของการขบเฟือง (instantaneous variation in mesh compliance) และ $\delta C_T = C_T - C_{Tav}$
- ξ คือ ความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านการเคลื่อนที่ (transmission error) ของเฟืองคู่ที่ขบกัน
- ξ_1 และ ξ_2 คือ ความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านการเคลื่อนที่ ของเฟือง 1 และเฟือง 2 ตามลำดับ
- ξ_s คือ ความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิต (static transmission error) ของเฟืองคู่ที่ขบกัน
- ξ_{sw} คือ ความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิตของเฟืองคู่ที่ขบกัน เฉพาะส่วนที่เกิดจากการโก่งตัวของฟันเฟืองขณะรับภาระ
- ξ_{s1} และ ξ_{s2} คือ ความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิตของเฟือง 1 และเฟือง 2 ตามลำดับ เป็นความคลาดเคลื่อนเนื่องจากโปรไฟล์ของฟันเฟืองเบี่ยงเบนไปจากโปรไฟล์ของฟันเฟืองที่มีระยะพิตช์สม่ำเสมอ ไม่มีภาระกระทำกับฟัน และมีโปรไฟล์เป็นเส้นโค้งอินโวลูท

- a คือ สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง ซึ่งเป็นสัญญาณแบบความเร่ง
- GMF คือ ความถี่การขบกันของเฟือง เท่ากับ (ความเร็วรอบเฟือง) \times (จำนวนฟัน) ใช้หน่วยเฮิรตซ์ (Hz)
- t คือ เวลา ใช้หน่วยวินาที
- RPM1 และ RPM2 คือ ความเร็วรอบของเฟือง 1 และเฟือง 2 ตามลำดับ ใช้หน่วยเฮิรตซ์
- D_n คือ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ n ของ GMF
- AM คือ การมอดูเลตทางแอมพลิจูด
- FM คือ การมอดูเลตทางความถี่
- ϕ α และ β คือ มุมเฟส ใช้หน่วยเรเดียน
- NT1 และ NT2 คือ จำนวนฟันเฟืองของเฟือง 1 และ 2 ตามลำดับ
- Peak คือ ยอดสูงสุด (peak) ของสัญญาณ
- RMS คือ รากที่สองของค่ากำลังสองเฉลี่ย (root mean square) ของสัญญาณ
- GMF₋ คือ แอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับ 1xGMF
- SBD_{-P} คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟือง 1 (RPM1)
- SBD_{-G} คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟือง 2 (RPM2)
- I_{-P} คือ ค่าแอมพลิจูดของยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซีเท่ากับ 1/(RPM1)
- I_{-G} คือ ค่าแอมพลิจูดของยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซีเท่ากับ 1/(RPM2)
- P คือ แอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับความเร็วรอบหมุนของเฟืองขับ
- G คือ แอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่เท่ากับความเร็วรอบหมุนของเฟืองตาม
- 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF คือ แอมพลิจูดของยอดสเปกตรัมที่ความถี่การขบกันของเฟือง ฮาร์มอนิกอันดับที่สองและอันดับที่สามของความถี่การขบกันของเฟืองตามลำดับ
- SBD-P คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองขับ
- SBD-G คือ ค่าแอมพลิจูดเฉลี่ยของยอดแถบความถี่ข้าง ข้างซ้ายและข้างขวาของยอดสเปกตรัม 1xGMF โดยห่างจาก 1xGMF เท่ากับความเร็วรอบของเฟืองตาม
- 1/P คือ ค่าแอมพลิจูดของยอดเซปส์ตรัมที่ควิเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความเร็วรอบหมุนของเฟืองขับ)

1/G คือ คำกมณิจุดของยอดเซปส์ตรัมที่ควเฟรนซีเท่ากับ 1/(ความเร็วรอบหมุนของเฟืองตาม)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย