การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและรอยแตกร้าวบนเฟือง

นาย สุรศักดิ์ คกมิ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2510-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21051987

A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN VIBRATION SIGNAL AND GEAR CRACK

Mr. Surasak Kokmi

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2002

ISBN 974-17-2510-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและรอยแตกร้าวบนเฟือง
โดย	นาย สุรศักดิ์ คกมิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุศล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุรศักดิ์ คกมิ : การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและรอยแตกร้าวบนเฟือง (A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN VIBRATION SIGNAL AND GEAR CRACK) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ , 240 หน้า. ISBN 974-17-2510-8.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับความยาวของรอยแตกอันเนื่องจากความล้าที่บริเวณฐานของฟันเฟือง การทดลองกระทำโดยการสร้างรอยแตกร้าวที่ระดับความยาวต่าง ๆ กันบนซี่ฟันของเฟืองขับทองเหลืองด้วยเครื่องทดสอบความล้า เฟืองที่แตกร้าวนี้ใช้เป็นเฟืองขับในชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองโดยทำการทดลองที่หลายสภาวะด้วยการปรับระดับภาระและความเร็วรอบ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่นำมาใช้วิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของสัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม โดยทำการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการต่าง ๆ กันดังนี้ การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

ผลการวิจัยพบว่าการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา ค่าพารามิเตอร์ Kurtosis และ Crest Factor มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าว ในขณะที่ค่า RMS มีขนาดที่ค่อนข้างคงที่ การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะช่วยให้สามารถสังเกตเห็นลักษณะคาบการขบกันของเฟืองที่ชัดเจน สามารถระบุตำแหน่งฟันซี่ที่แตกร้าวได้จากการสังเกตพบพัลส์บริเวณช่วงเวลาที่ฟันซี่ที่แตกร้าวขบกันสำหรับการวัดสัญญาณในทิศทางเดียวกับการขบกันของเฟือง ผลของสัญญาณสเปกตรัมพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของ 1xGMF ไม่สัมพันธ์กับขนาดรอยแตกร้าว การวิเคราะห์ชุดแถบความถี่ข้างพบว่า จำนวนฮาร์มอนิกของชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองที่แตกร้าวทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าว และฮาร์มอนิกที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติจะมีแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าวเป็นอย่างมาก ผลของสัญญาณเซปส์ตรัมพบว่า ค่าแกมนิจูดที่คิวเฟรนซีตรงกับคาบการหมุนของเฟืองขับ (1/P) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งที่ระดับความยาวรอยแตกร้าว 2.5 มม.แล้วค่าแกมนิจูดจึงลดลง การเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่นอกจากจะช่วยให้สามารถแยกแยะชุดแถบความถี่ข้างได้ชัดเจนแล้ว ยังให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าแกมนิจูดของสัญญาณเซปส์ตรัมที่ชัดเจนที่สุด

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2545 .

4270620921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : VIBRATION SIGNAL / VIBRATION / SPECTRUM / SPECTRAL ANALYSIS / CEPSTRUM / CEPSTRAL ANALYSIS / GEAR CRACK / GEAR / GMF / FFT / ZOOM PROCESSING / SYNCHRONOUS TIME AVERAGING. SURASAK KOKMI : A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN VIBRATION SIGNAL AND GEAR CRACK. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR CHAIROTE KUNPANITCHAKIT, Ph.D. 240 pp. ISBN 974-17-2510-8.

This research dealt with gear crack diagnosis based on vibration signal analysis. The relationship of vibration signal and crack length was analyzed by means of time domain, spectral and cepstral analysis. Vibration signal was recorded by using spectrum averaging, zoom processing, and synchronous time averaging techniques. One cracked tooth was prepared on brass pinions in several lengths by using a dynamic servo fatigue testing machine. Cracked pinions were tested at various speeds and applied loads on an experimental test rig.

The study of time domain signal and crack length shows that the magnitude of Kurtosis and Crest Factor increase with crack evolution while the RMS value does not change with crack length. The tooth meshing period can be clearly seen in the synchronous time averaging signal. The cracked tooth and the shock pulse around cracked tooth meshing period can be identified in the direction of tooth contact. It is found from the spectral analysis that the changing of the amplitude at 1xGMF do not directly relate to crack length. Number of lower sidebands of the pinion speed around 1xGMF increase with crack length. Harmonics of pinion speed sideband which resemble with any natural frequencies of test bed greatly increase with crack length. In case of cepstral analysis, gamnitude of 1/P increases with crack length until the crack length reaches 2.5 mm and then it slightly decreases. The zoom processing of the signal enhances the separation of each harmonics of sideband. The values of the rate of cepstral gamnitude obtained from this method change greater than the signal from other methods.

Department MECHANICAL ENGINEERING Student's signature .....

Concentration MECHANICAL ENGINEERING Advisor's signature .....

Academic year 2002 .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการเอาใจใส่ดูแลและให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ทั้งคำปรึกษา แนะนำ ความรู้ และหาแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อความกรุณาที่ท่านมอบให้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนวัสดุวิจัย และทุนผู้ช่วยวิจัยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ตามลำดับ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุศล สำหรับคำแนะนำแนวทางการสร้างรอยแตกร้าว และขอขอบพระคุณ อ.ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย เป็นอย่างสูงสำหรับความรู้เรื่องกลศาสตร์การพังทลาย คำแนะนำในการใช้งานเครื่องทดสอบความล้า รวมทั้งความช่วยเหลืออย่างมากมายที่มอบให้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องทดสอบความล้า

ขอขอบพระคุณ ครูธงชัย สิงห์สังวรณ์ ครูปฏิบัติการประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับคำแนะนำและการให้ความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์อิเลกทรอนิก เช่น การซ่อมแซมเครื่องทดสอบความล้า การใช้งานชุดวงจรสำเร็จรูปแทกโคมิเตอร์ เป็นต้น

ขอขอบคุณ คุณโสภณ นาคยงค์ คุณสุบิน ขันตี คุณพรชัย เสาวรัตน์ชัย และคุณโกวิท โกพล นายช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในด้านการปฏิบัติงานเป็นอย่างดี คุณวรพงษ์ สมพงษ์ เจ้าหน้าที่ศูนย์คอมพิวเตอร์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน และคุณธีรชัย ตันติมงคลสุข

ขอขอบคุณ คุณเจษฎา เตชัสหงส์ นิสิตปริญญาโทประจำห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีบำรุงรักษาเครื่องจักรกลเป็นอย่างมากสำหรับความช่วยเหลือที่มอบให้ตลอดเวลาที่ได้ทำงานร่วมกัน ไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองเพิ่มเติม เช่น แทกโคมิเตอร์ ชุดภาระแบบเครื่องปั่นไฟรถยนต์ และความช่วยเหลือขณะตั้งแนวแกนชุดทดลองใหม่ อีกทั้งความช่วยเหลือทางด้านอื่นอีกมากมาย และขอขอบคุณ คุณยอดยิ่ง หมวกงาม นิสิตปริญญาโทประจำห้องวิจัยกลศาสตร์การพังทลาย ซึ่งเป็นผู้ช่วยของผู้วิจัยขณะสร้างรอยแตกร้าว

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ได้สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเป็นอย่างดี ให้กำลังใจ ความรักและความเข้าใจ ทำให้สามารถฝ่าฟันอุปสรรคนานาประการจนสำเร็จได้ดี

สุดท้ายนี้ ประโยชน์อันใดจากงานวิจัยนี้ขอมอบเป็นการตอบแทนพระคุณของบิดามารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ตลอดจนชาวบ้าน ต.สะเอียบ อ.สอง จ.แพร่ ที่กำลังต่อสู้กับโครงการเขื่อนแก่งเสือเต้น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฑ

คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ป

บทที่ 1 บทนำ 1

1 – 1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ 1

1 – 2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา 4

1 – 3 สมมติฐานการทดลอง 8

1 – 4 วัตถุประสงค์ 9

1 – 5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 9

1 – 6 ขั้นตอนการดำเนินงาน 9

1 – 7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 10

บทที่ 2 ทฤษฎีการจัดการข้อมูลและวิเคราะห์สัญญาณ 11

2 – 1 ประเภทของสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยทั่วไป 11

2 – 2 การแปลงแบบฟูริเยร์ 12

2 – 3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เวลาและความถี่ 17

2 – 4 การจัดเก็บข้อมูล 18

2 – 5 ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก 20

2 – 6 การเฉลี่ยและการเหลื่อมกันของหน้าต่างเวลา 27

2 – 7 กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ 29

2 – 8 การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ 33

2 – 9 การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา 34

2 – 10 การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ 38

2 – 11 เซปส์ตรัม 38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 41

3 – 1 เฟืองตรง 41

3 – 2 ความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิต 43

3 – 3 ความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ของเฟือง 46

3 – 4 การมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ 48

3 – 5 การแตกร้าวของฟันเฟืองและสัญญาณการสั่นสะเทือน 51

บทที่ 4 การทดลองวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 54

4 – 1 การจำลองรอยแตกร้าวบนฟันเฟือง 54

4 – 2 รูปแบบการทดลอง 64

4 – 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน 66

4 – 4 การวิเคราะห์สัญญาณ 67

4 – 4 – 1 การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ 67

4 – 4 – 2 กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ 68

4 – 4 – 3 การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ 69

4 – 5 สัญญาณการสั่นสะเทือนจากการทดลอง 71

4 – 5 – 1 ภาพสัญญาณบนโดเมนเวลา 71

4 – 5 – 2 อภิปรายผลของสัญญาณบนโดเมนเวลา 81

4 – 5 – 3 ภาพสัญญาณสเปกตรัม 83

4 – 5 – 4 อภิปรายผลของสัญญาณสเปกตรัม 97

4 – 5 – 5 ภาพสัญญาณเซปส์ตรัม 99

4 – 5 – 6 อภิปรายผลของสัญญาณเซปส์ตรัม 113

4 – 6 รูปแบบการสึกหรอภายหลังการทดลอง 114

บทที่ 5 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน 116

5 – 1 สัญญาณบนโดเมนเวลา 116

5 – 1 – 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณบนโดเมนเวลาและความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง 117

5 – 1 – 2 ผลและการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา 126

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 – 2 สัญญาณสเปกตรัม 132
5 – 2 – 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสเปกตรัม และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง 134
5 – 2 – 2 ผลและการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม 171
5 – 3 สัญญาณเซปส์ตรัม 177
5 – 3 – 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัม และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง 178
5 – 3 – 2 ผลและการวิเคราะห์สัญญาณเซปส์ตรัม 185
บทที่ 6 การสรุปผลของวิทยานิพนธ์ 189
6 – 1 สรุปผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน 189
6 – 2 ความเป็นไปได้ในการใช้สัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม ในการวิเคราะห์การแตกร้าวของฟันเฟือง 191
6 – 3 ข้อเสนอแนะและการศึกษาวิจัยต่อไป 193
รายการอ้างอิง 194
บรรณานุกรม 196
ภาคผนวก 197
ภาคผนวก ก รูปถ่ายอุปกรณ์ทดลอง 198
ภาคผนวก ข ภาพวาดหัวกดที่ใช้สำหรับสร้างรอยแตกร้าว 200
ภาคผนวก ค ตัวอย่างภาพการสึกหรอของเฟืองแต่ละตัวภายหลังการทดลอง 201
ภาคผนวก ง ภาพสัญญาณสเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของชุดทดลอง 204
ภาคผนวก จ ข้อมูลการสร้างรอยแตกร้าว 206
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลดิบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณ 215
ประวัติผู้วิจัย 240

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์ a_i ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักชนิดต่าง ๆ 22

ตารางที่ 2-2 คุณลักษณะการเป็นตัวกรองความถี่แบบดิจิตอลของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักชนิดต่าง ๆ 24

ตารางที่ 2-3 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ 34

ตารางที่ 4-1 รายละเอียดของชุดเฟืองที่ใช้ในการทดลอง 55

ตารางที่ 4-2 ขนาดของรอยบากบริเวณโคนฟันเฟือง 58

ตารางที่ 4-3 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที 67

ตารางที่ 4-4 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที 67

ตารางที่ 4-5 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที 68

ตารางที่ 4-6 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที 69

ตารางที่ 4-7 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะสำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที 69

ตารางที่ 4-8 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะสำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที 70

ตารางที่ 4-9 ความถี่และคิวเฟรนซีที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณ 71

ตารางที่ 5-1 ค่าความถี่ 1xGMF และชุดแถบความถี่ข้าง 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF 132

ตารางที่ จ–1 ข้อมูลการสร้างรอยแตกร้าวของเฟือง 01-1 207

ตารางที่ จ–2 ข้อมูลการสร้างรอยแตกร้าวของเฟือง 01-2 208

ตารางที่ จ–3 ข้อมูลการสร้างรอยแตกร้าวของเฟือง 01-3 210

ตารางที่ จ–4 ข้อมูลการสร้างรอยแตกร้าวของเฟือง 01-4 212

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ฉ–1 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 218
ตารางที่ ฉ–2 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 218
ตารางที่ ฉ–3 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 219
ตารางที่ ฉ–4 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 219
ตารางที่ ฉ–5 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 220
ตารางที่ ฉ–6 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 220
ตารางที่ ฉ–7 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 221
ตารางที่ ฉ–8 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 221
ตารางที่ ฉ–9 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 222
ตารางที่ ฉ–10 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 223
ตารางที่ ฉ–11 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 224
ตารางที่ ฉ–12 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 225
ตารางที่ ฉ–13 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 226

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ฉ–14 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 227
ตารางที่ ฉ–15 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 228
ตารางที่ ฉ–16 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 229
ตารางที่ ฉ–17 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 230
ตารางที่ ฉ–18 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 231
ตารางที่ ฉ–19 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 232
ตารางที่ ฉ–20 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 233
ตารางที่ ฉ–21 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 234
ตารางที่ ฉ–22 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 234
ตารางที่ ฉ–23 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 235
ตารางที่ ฉ–24 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 235
ตารางที่ ฉ–25 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 236
ตารางที่ ฉ–26 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 236

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ฉ–27 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 237
ตารางที่ ฉ–28 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 237
ตารางที่ ฉ–29 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 150 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 238
ตารางที่ ฉ–30 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 238
ตารางที่ ฉ–31 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 239
ตารางที่ ฉ–32 ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที
ภาระ 300 วัตต์ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 239

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 แผนภูมิแสดงการแบ่งแยกชนิดของสัญญาณแบบดีเทอมินิสติก 11
รูปที่ 2-2 แผนภูมิแสดงการแบ่งแยกชนิดของสัญญาณแบบสุ่ม 12
รูปที่ 2-3 การแปลงฟูริเยร์รูปแบบต่าง ๆ 15
รูปที่ 2-4 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT 18
รูปที่ 2-5 ผลของการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ผิดพลาด 19
รูปที่ 2-6 สัญญาณไซน์คลื่น A มีคาบที่สามารถบรรจุลงในหน้าต่างเวลาได้พอดี ในขณะที่คลื่น B มีความถี่เปลี่ยนไปเล็กน้อย 20
รูปที่ 2-7 จุดศูนย์กลางฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักสี่เหลี่ยมเลื่อนไปตามองค์ประกอบความถี่ ที่มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน 21
รูปที่ 2-8 ลักษณะของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักทั้ง 4 ชนิดบนโดเมนเวลา 23
รูปที่ 2-9 คุณลักษณะความเป็นตัวกรองสัญญาณแบบดิจิตอลของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก ชนิดต่าง ๆ 23
รูปที่ 2-10 การวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณคลื่นไซน์ที่ความถี่ 1,600 Hz (Best Case) และ 1,602 Hz (Worst Case) โดยที่ใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักชนิดต่าง ๆ 24
รูปที่ 2-11 ความสามารถของฟังก์ชันชนิดต่าง ๆ ในการแยกแยะยอดสัญญาณที่อยู่ใกล้กัน 25
รูปที่ 2-12 (ก) ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแฮนนิ่ง 4 ชุดที่นำมาเฉลี่ยกันโดยมีการเหลื่อมกัน 75% (ข) ผลของการเฉลี่ยฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแฮนนิ่งกำลังสอง 28
รูปที่ 2-13 ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแฮนนิ่งและฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแฮนนิ่งกำลังสอง ที่มีการเหลื่อมกัน 0% , 50% , 66.67% และ 75% 29
รูปที่ 2-14 ขั้นตอนการทำงานของการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ด้วยวิธี เลื่อนความถี่ 31
รูปที่ 2-15 โดเมนความถี่ แสดงช่วงความถี่สูงสุดที่ต้องการในการวิเคราะห์แบบปรกติ และความถี่ที่ทำการเลื่อนแล้วสำหรับนำไปขยายความละเอียด 32
รูปที่ 2-16 การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมน เวลาเข้าจังหวะ 33
รูปที่ 2-17 รูปสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีความเสียหายเกิดขึ้นตั้งแต่เพิ่งเริ่มจน กระทั่งใกล้จะเสียหาย และเส้นโค้งการกระจายความน่าจะเป็นของ แอมพลิจูดสัญญาณการสั่นสะเทือน 36

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2-18 ค่าเคอร์โทซิสสำหรับรูปแบบสัญญาณต่าง ๆ 37
รูปที่ 2-19 ผลของสภาพเฟืองที่มีต่อสัญญาณบนโดเมนเวลา 37
รูปที่ 3-1 ฟันเฟืองขบกัน แนวของการกระทำ และจุดพิตช์ 41
รูปที่ 3-2 การให้ชื่อส่วนต่าง ๆ ของฟันเฟือง 42
รูปที่ 3-3 สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่ยังมีสภาพดี (หนึ่งรอบหมุนของเฟืองขับ) 42
รูปที่ 3-4 สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่ยังมีสภาพดี (หนึ่งรอบหมุนของเฟืองตาม) 43
รูปที่ 3-5 สัญญาณสเปกตรัมของชุดเฟืองที่ยังมีสภาพดี 43
รูปที่ 3-6 รูปแบบสัญญาณบนโดเมนเวลาของเฟืองที่มีฟันแตกร้าว 1 ซี่ (ความเร็วรอบ 1200 rpm, ฟัน 30 ซี่) 46
รูปที่ 3-7 สัญญาณสเปกตรัม แสดงองค์ประกอบของความคลาดเคลื่อนการเคลื่อนที่ของเฟืองทั้ง 3 ชนิด 47
รูปที่ 3-8 เฟสเซอร์ที่แสดงถึงการมอดูเลตทางแอมพลิจูด และสัญญาณสเปกตรัมแสดงให้เห็นลักษณะของแถบความถี่ข้าง 49
รูปที่ 3-9 เฟสเซอร์ที่แสดงถึงการมอดูเลตทางความถี่ และสัญญาณสเปกตรัมแสดงให้เห็นลักษณะของแถบความถี่ข้าง 50
รูปที่ 3-10 รอยแตกร้าวบริเวณฐานฟัน เกิดขึ้นเนื่องจากความล้า 51
รูปที่ 3-11 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาของชุดเฟืองที่เฟืองขับมีฟันแตกร้าว 52
รูปที่ 3-12 สัญญาณสเปกตรัมของชุดเฟืองที่เฟืองขับมีฟันแตกร้าว 52
รูปที่ 3-13 สัญญาณเซปส์ตรัมของชุดเฟืองที่เฟืองขับมีฟันแตกร้าว 53
รูปที่ 4-1 เครื่องทดสอบความล้า 56
รูปที่ 4-2 หัวกดฟันเฟืองและแท่นยึดจับเฟือง 56
รูปที่ 4-3 การหาตำแหน่งของความเค้นดึงมากที่สุด และมุมของรอยบาก (Notch angle) 57
รูปที่ 4-4 ลักษณะความเค้นที่ใช้สำหรับกดฟันเฟืองให้แตกร้าว 59
รูปที่ 4-5 กราฟอายุความล้าคงที่ หรือ Haigh's Diagram 60
รูปที่ 4-6 รอยแตกร้าวของเฟือง 01-1 ยาวประมาณ 1.5 มม. 62
รูปที่ 4-7 รอยแตกร้าวของเฟือง 01-2 ยาวประมาณ 2.5 มม. 63
รูปที่ 4-8 รอยแตกร้าวของเฟือง 01-3 ยาวประมาณ 3.5 มม. 63
รูปที่ 4-9 รอยแตกร้าวของเฟือง 01-4 ยาวประมาณ 4.5 มม. 63

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-10 ภาพร่างแสดงฟันของเฟือง 01-3 และ 01-4 ภายหลังสร้างรอยแตกร้าว เทียบกับก่อนสร้างรอยแตกร้าว..... 64
รูปที่ 4-11 ชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง..... 66
รูปที่ 4-12 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 73
รูปที่ 4-13 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 74
รูปที่ 4-14 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 75
รูปที่ 4-15 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 76
รูปที่ 4-16 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 77
รูปที่ 4-17 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 78
รูปที่ 4-18 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 79
รูปที่ 4-19 สัญญาณบนโดเมนเวลา : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 80
รูปที่ 4-20 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 85
รูปที่ 4-21 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 86
รูปที่ 4-22 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing..... 87
รูปที่ 4-23 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing..... 88

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-24 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 89
รูปที่ 4-25 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 90
รูปที่ 4-26 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 91
รูปที่ 4-27 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 92
รูปที่ 4-28 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing..... 93
รูปที่ 4-29 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing..... 94
รูปที่ 4-30 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 95
รูปที่ 4-31 สัญญาณสเปกตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 96
รูปที่ 4-32 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 101
รูปที่ 4-33 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging..... 102
รูปที่ 4-34 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing..... 103
รูปที่ 4-35 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing..... 104
รูปที่ 4-36 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 105
รูปที่ 4-37 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging..... 106

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-38 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 107
รูปที่ 4-39 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 108
รูปที่ 4-40 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 109
รูปที่ 4-41 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing 110
รูปที่ 4-42 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 111
รูปที่ 4-43 สัญญาณเซปส์ตรัม : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์
วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 112
รูปที่ 4-44 ภาพจำลองแสดงทิศทางการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (R) และแบบไถล (S)
ของคู่ฟันเฟือง 114
รูปที่ 4-45 การสึกหรอของฟันเฟือง 01-0 และ 01-4 ภายหลังการทดลอง 115
รูปที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง :
ความเร็ว 500 รอบต่อนาที 118
รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง :
ความเร็ว 800 รอบต่อนาที 119
รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง :
ความเร็ว 500 รอบต่อนาที 120
รูปที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง :
ความเร็ว 800 รอบต่อนาที 121
รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง :
ความเร็ว 500 รอบต่อนาที 122
รูปที่ 5-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง :
ความเร็ว 800 รอบต่อนาที 123

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที 124
รูปที่ 5-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที 125
รูปที่ 5-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ GMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 137
รูปที่ 5-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ GMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 138
รูปที่ 5-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ GMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 139
รูปที่ 5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ GMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 140
รูปที่ 5-13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 141
รูปที่ 5-14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 142
รูปที่ 5-15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF 143
รูปที่ 5-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF 144

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging....145

รูปที่ 5-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....146

รูปที่ 5-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....147

รูปที่ 5-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....148

รูปที่ 5-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF....149

รูปที่ 5-22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF.....150

รูปที่ 5-23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging....151

รูปที่ 5-24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....152

รูปที่ 5-25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP ฮาร์มอนิกที่ไกลออกไป ทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....153

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP ฮาร์มอนิกที่ไกลออกไป ทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF 154
รูปที่ 5-27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP ฮาร์มอนิกที่ไกลออกไป ทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 155
รูปที่ 5-28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP ฮาร์มอนิกที่ไกลออกไป ทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 156
รูปที่ 5-29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP ฮาร์มอนิกที่ไกลออกไป ทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF 157
รูปที่ 5-30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBP ฮาร์มอนิกที่ไกลออกไป ทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 158
รูปที่ 5-31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 159
รูปที่ 5-32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 160
รูปที่ 5-33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF 161
รูปที่ 5-34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF 162

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging....163
รูปที่ 5-36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....164
รูปที่ 5-37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....165
รูปที่ 5-38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....166
รูปที่ 5-39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF....167
รูปที่ 5-40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF.....168
รูปที่ 5-41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวระดับ เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging....169
รูปที่ 5-42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของ SBW 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที วัดสัญญาณแนวดิ่ง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....170
รูปที่ 5-43 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัม และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....179

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-44 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัม และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF 180
รูปที่ 5-45 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัม และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 181
รูปที่ 5-46 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัม และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging 182
รูปที่ 5-47 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัม และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing รอบ 1xGMF 183
รูปที่ 5-48 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัม และความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟือง : ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging 184
รูปที่ ก-1 ชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง 198
รูปที่ ก-2 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ รุ่น 2035 และเครื่องขยายประจุ รุ่น 2635 ยี่ห้อ Brüel & Kjær 198
รูปที่ ก-3 การติดตั้งตัวตรวจรู้แบบความเร่งและแทกโคมิเตอร์ 199
รูปที่ ข-1 หัวกดสำหรับสร้างรอยแตกร้าว 200
รูปที่ ค-1 การสึกหรอภายหลังการทดลองของเฟือง 01-0 ซึ่งไม่มีรอยแตกร้าว 201
รูปที่ ค-2 การสึกหรอภายหลังการทดลองของเฟือง 02-0 ซึ่งไม่มีรอยแตกร้าว 201
รูปที่ ค-3 การสึกหรอภายหลังการทดลองของเฟือง 01-1 ซึ่งมีรอยแตกร้าวยาว 1.5 มม. 202
รูปที่ ค-4 การสึกหรอภายหลังการทดลองของเฟือง 01-2 ซึ่งมีรอยแตกร้าวยาว 2.5 มม. 202
รูปที่ ค-5 การสึกหรอภายหลังการทดลองของเฟือง 01-3 ซึ่งมีรอยแตกร้าวยาว 3.5 มม. 203
รูปที่ ค-6 การสึกหรอภายหลังการทดลองของเฟือง 01-4 ซึ่งมีรอยแตกร้าวยาว 4.5 มม. 203
รูปที่ ง-1 สัญญาณสเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่วัดในแนวระดับ 204
รูปที่ ง-2 สัญญาณสเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่วัดในแนวดิ่ง 205

คำอธิบายสัญลักษณ์

N คือ ขนาดของการแปลงสัญญาณ หรือ จำนวนจุดข้อมูล

N_{span} คือ จำนวนของเส้นสเปกตรัม

T คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บสัญญาณในหนึ่งหน้าต่างเวลา

f_{span} คือ ช่วงความถี่ที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม

f_s คือ ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล

f_n คือ ความถี่ไนควิสต์ ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล

Δt คือ คาบของการสุ่มตัวอย่างข้อมูล หรือความละเอียดของสัญญาณเวลา

Δf คือ ระยะห่างระหว่างเส้นสเปตรัมแต่ละเส้น

f_0 คือ ความถี่รากฐานของการเก็บสัญญาณ ซึ่งเท่ากับ 1/T

$w(t)$ คือ ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก

G_{xx} คือ เพาเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum) หรือออโตสเปกตรัม (Autospectrum)

r คือ ตัวประกอบการเลื่อน (Shift Factor)

OL คือ ขนาดการเหลื่อมกันของหน้าต่างเวลา

N_0 คือ จำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับกรณีปรกติ (Base Band Analysis) ซึ่งมักมีจำนวนจุดข้อมูล 1024 หรือ 2048 จุด ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นสเปกตรัมที่เลือกใช้

N_r คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมดที่ใช้เก็บสัญญาณด้วยระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่

Δf_n คือ ระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมหลังทำการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่แล้ว

f_p คือ ความถี่ที่อยู่กึ่งกลางช่วงความถี่ที่ต้องการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่

N_A คือ จำนวนชุดสัญญาณที่นำมาเฉลี่ยกันบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

$C(\tau)$ คือ เซปส์ตรัม

$C_p(\tau)$ คือ เพาเวอร์เซปส์ตรัม

$s(t)$ คือ ความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิต

$s_{eh}(t)$ คือ ความคลาดเคลื่อนแบบฮาร์มอนิก

$s_{er,p}(t)$ คือ ความคลาดเคลื่อนส่วนที่เหลือ เนื่องมาจากเฟืองขับ

$s_{er,g}(t)$ คือ ความคลาดเคลื่อนส่วนที่เหลือ เนื่องมาจากเฟืองตาม

X_m คือ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่ฮาร์มอนิกที่ m

ϕ_m คือ มุมเฟสฮาร์มอนิกที่ m

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$a_m(t)$ คือ ฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด

$b_m(t)$ คือ ฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่

α_{mn}, β_{mn} คือ มุมเฟสฮาร์มอนิกที่ n ของฟังก์ชันมอดูเลต

GMF คือ ความถี่การขบกันของคู่เฟือง (Gear Meshing Frequency)

SBP คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองขับ

SBW คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองตาม

σ_e คือ ขีดจำกัดความทนทาน หรือขีดจำกัดความล้า

σ_u คือ ความต้านแรงดึงตรวจสอบ

σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย

σ_a คือ ความเค้นส่วนเปลี่ยน

σ_{max} คือ ความเค้นสูงสุด

σ_{min} คือ ความเค้นต่ำสุด

k_b คือ ตัวประกอบของขนาด

k_c คือ ตัวประกอบของแรง

m คือ โมดูลของชุดเฟือง

b คือ ความหนาของฟันเฟือง

Y คือ ตัวประกอบรูปแบบของลูอิส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย