

การวิเคราะห์สัญญาการสันตะเพื่อนของคู่เฟื่องตรงที่มีการลี้กหรอ



นาย เจษฏา เตชสังข์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4861-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN ANALYSIS OF VIBRATION SIGNAL OF A SPUR GEAR PAIR WITH TOOTH WEAR

Mr. Jessada Techashong

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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 2003

ISBN 974-17-4861-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์สัญญาณการสิ้นสะท้อนของคู่เฟืองตรงที่มีการสึกหรอ

โดย

นายเจษฎา เตชัสหงส์

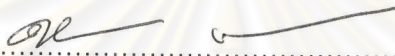
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

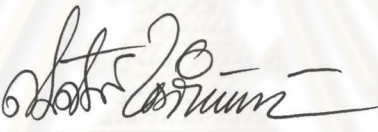
อาจารย์ที่ปรึกษา

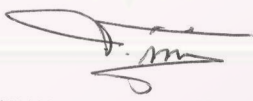
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

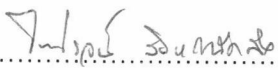
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ)

นายเจษฎา เตชัสหงส์ : การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของคู่เฟืองตรงที่มีการสึกหรอ  
 ( AN ANALYSIS OF VIBRATION SIGNAL OF A SPUR GEAR PAIR WITH TOOTH  
 WEAR ) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ , จำนวน 182 หน้า.  
 ISBN 974-17-4861-2

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนกับระดับการสึกหรอของฟันเฟือง ทำการทดลองให้เฟืองขับของเหลือ 4 เฟือง เกิดการสึกหรอที่หลายสภาวะด้วยการปรับระดับภาระและความเร็วรอบของชุดทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยกันบนโดเมนความถี่ การเฉลี่ยกันบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ และกระบวนการขยายความละเอียดบนโดเมนความถี่ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่นำมาใช้วิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของสัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม

ผลของสัญญาณบนโดเมนเวลา Peak และ RMS พบแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของสัญญาณตามการสึกหรอ โดยค่า PEAK และ RMS มีแนวโน้มที่เด่นชัดกว่าค่า Crest Factor และ Kurtosis การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยกันบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะช่วยให้สามารถสังเกตเห็นลักษณะคาบการขบกันของฟันเฟืองที่ชัดเจน ผลของสัญญาณสเปกตรัมพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของ GMF ไม่สัมพันธ์กับระดับการสึกหรออย่างชัดเจน การวิเคราะห์ชุดแถบความถี่ข้างพบว่าจำนวนฮาร์มอนิกของชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองที่เกิดการสึกหรอทางด้านต่ำกว่า  $1 \times \text{GMF}$  เพิ่มขึ้นตามระดับการสึกหรอ และที่ฮาร์มอนิกซึ่งตรงกับควมถี่ธรรมชาติของระบบจะมีแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของการสึกหรอ การเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่จะช่วยให้สามารถแยกแยะชุดแถบความถี่ข้างได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ผลของสัญญาณเซปส์ตรัมพบว่าค่าแกมมาจุดที่ควิเฟรนซ์ตรงกับคาบการหมุนของเฟืองที่เกิดการสึกหรอหรือเฟืองขับ ( $1/P$ ) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มสึกหรอแล้วลดลงเมื่อมีระดับสึกหรอมากขึ้น ส่วนค่าแกมมาจุดที่ควิเฟรนซ์ตรงกับคาบการหมุนของเฟืองตาม ( $1/W$ ) มีแนวโน้มที่ลดลงตามการสึกหรอ

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
 สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
 ปีการศึกษา ..... 2546

ลายมือชื่อนิติ ..... เจษฎา เตชัสหงส์  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

## 4370259121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : VIBRATION SIGNAL / TIME DOMAIN / SPECTRAL ANALYSIS / CEPSTRAL ANALYSIS / GEAR WEAR / GMF / FFT / ZOOM PROCESSING / SYNCHRONOUS TIME AVERAGING. JESSADA TECHASHONG : AN ANALYSIS OF VIBRATION SIGNAL OF A SPUR GEAR PAIR WITH TOOTH WEAR. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR CHAIROTE KUNPANITCHAKIT, Ph.D 182 pp. ISBN 974-17-4861-2

This research dealt with gear wear diagnosis based on vibration signal analysis. Four brass pinions were tested at various speeds and applied loads on an experimental test rig. Vibration signal was recorded by using spectrum averaging, zoom processing, and synchronous time averaging techniques. The relationship of vibration signal and gear wear level was analyzed by means of time domain, spectral and cepstral analysis.

The relation of time domain signal and wear level shows that the magnitude of Peak and RMS increase with wear evolution. Peak and RMS increase at higher rates than Crest Factor and Kurtosis. The tooth meshing period can be clearly seen in the synchronous time averaging signal. It is found from the spectrum analysis that the changing of the amplitude at gear meshing frequency (GMF) and its harmonics may not directly relate to wear evolution. The number of lower sidebands of the pinion speed around  $1 \times \text{GMF}$  increase with wear level. And the amplitude of pinion sideband at high harmonics which correspond to system natural frequencies increase with wear evolution. The zoom processing of the signal enhances the separation of each sideband harmonics. In case of cepstral analysis, magnitude of pinion revolution ( $1/P$ ) increases with the initial wear level. After a certain level of wear the magnitude reduces toward the maximum tested wear level. While magnitude of RPM of wheel ( $1/W$ ) decreases with wear evolution.

Department.....MECHANICAL ENGINEERING

Concentration.....MECHANICAL ENGINEERING

Academic year ..2003.....

Student's signature เจสดา เทชอง

Advisor's signature ช.ค.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้ความช่วยเหลือทั้งในเรื่องของอุปกรณ์ ถ่ายทอดความรู้ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย และแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ตลอดการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณทบวงมหาวิทยาลัย บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล สำหรับทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ ทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนผู้ช่วย วิจัยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีบำรุงรักษาเครื่องจักรกล และทุนวัสดุวิจัย ตามลำดับ

ขอขอบพระคุณ ครูธงชัย สิงห์สังวรณัฏ์ ครูปฏิบัติการประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับคำแนะนำต่างๆ ในการปรับปรุงชุดทดลอง เช่น การใช้งานชุดวงจรสำเร็จรูปแทกโคมิเตอร์ และการใช้งานของชุดภาระแบบเครื่องปั่นไฟรถยนต์ เป็นต้น

ขอขอบคุณ คุณสุบิน ชันตี คุณพรชัย เสาวรัตน์ชัย และคุณโกวิท โกพล นายช่าง เทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในด้านการ ปฏิบัติงานเป็นอย่างดี คุณวรพงษ์ สมพงษ์ เจ้าหน้าที่ศูนย์คอมพิวเตอร์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณสุรศักดิ์ คคมิ อดีตนิสิตปริญญาโทประจำห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีบำรุง รักษาเครื่องจักรกลเป็นอย่างมากสำหรับคำแนะนำดีๆ มากมาย และความช่วยเหลือต่างๆ ที่มอบ ให้ เช่น การปรับปรุงชุดทดลอง และความช่วยเหลือขณะตั้งแนวแกนชุดทดลองใหม่ อีกทั้ง ความช่วยเหลือทางด้านอื่นอีกมากมาย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และ สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด อนึ่งประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบ เป็นกตัญญูแด่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	3
สมมติฐานการทดลอง.....	8
วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	8
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	8
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	9
ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	10
การสั่นสะเทือน (Vibration).....	10
ประเภทของการสั่นสะเทือน.....	10
สัญญาณการสั่นสะเทือน (Vibration signal).....	11
สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา.....	11
การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา.....	11
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา.....	12
การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging).....	15
สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่.....	19
สเปกตรัม(Spectrum).....	19
การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่.....	20
กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ (Zoom Processing).....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนคิวเฟรนซี.....	26
เซปส์ตรัม (Cepstrum).....	26
การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซี.....	28
การสั่นสะเทือนของระบบเฟือง.....	29
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนของ ระบบเฟือง.....	30
การจัดเก็บข้อมูล (Data Acquisition).....	35
ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weighting Function).....	37
บทที่ 3 การทดลอง.....	40
รูปแบบการทดลอง.....	40
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	42
รายละเอียดการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	43
การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่.....	43
กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่.....	44
การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ.....	45
รูปแบบของการสีกหรือ.....	48
สัญญาณการสั่นสะเทือนจากการทดลอง.....	52
ภาพสัญญาณบนโดเมนเวลา.....	53
อภิปรายผลของสัญญาณบนโดเมนเวลา.....	58
ภาพสัญญาณสเปกตรัม.....	59
อภิปรายผลของสัญญาณสเปกตรัม.....	66
ภาพสัญญาณเซปส์ตรัม.....	67
อภิปรายผลของสัญญาณเซปส์ตรัม.....	74
บทที่ 4 การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน.....	75
สัญญาณบนโดเมนเวลา.....	75
ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณบนโดเมนเวลาและเวลาที่ใช้ในการ ทดลอง.....	76
ผลและการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา.....	85



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สัญญาณสเปกตรัม.....	91
ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสเปกตรัมและเวลาที่ ใช้ในการทดลอง.....	93
ผลและการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม.....	95
สัญญาณเซปส์ตรัม.....	139
ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเซปส์ตรัมและเวลาที่ใช้ ในการทดลอง.....	140
ผลและการวิเคราะห์สัญญาณเซปส์ตรัม.....	141
บทที่ 5 การสรุปผลของวิทยานิพนธ์.....	158
สรุปผลการวิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือน.....	158
ความเป็นไปได้ในการใช้สัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม ในการวิเคราะห์การสีกหรือของเฟือง.....	160
ประโยชน์ที่ได้รับ.....	161
ข้อเสนอแนะและการศึกษาวิจัยต่อไป.....	161
รายการอ้างอิง.....	162
บรรณานุกรม.....	164
ภาคผนวก.....	165
ภาคผนวก ก การแปลงแบบฟูริเยร์ (Fourier Transform).....	166
ภาคผนวก ข รูปถ่ายอุปกรณ์ทดลอง.....	170
ภาคผนวก ค การสีกหรือ.....	171
ภาคผนวก ง ความถี่ธรรมชาติ.....	177
ภาคผนวก จ ระดับเสียง.....	180
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	182

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการเคลื่อนบนโดเมนเวลา เข้าจังหวะ.....	16
ตารางที่ 3-1 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่างๆที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมน ความถี่สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที.....	43
ตารางที่ 3-2 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมน ความถี่สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที.....	44
ตารางที่ 3-3 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยกระบวนการขยาย ความละเอียดของโดเมนความถี่สำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที.....	45
ตารางที่ 3-4 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยกระบวนการขยาย ความละเอียดของโดเมนความถี่สำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที.....	45
ตารางที่ 3-5 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมน เวลาเข้าจังหวะสำหรับความเร็ว 500 รอบต่อนาที.....	46
ตารางที่ 3-6 รายละเอียดของสัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่เก็บด้วยวิธีการเคลื่อนบนโดเมน เวลาเข้าจังหวะสำหรับความเร็ว 800 รอบต่อนาที.....	46
ตารางที่ 3-7 ความถี่และคิวเฟรนซีที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณ.....	47
ตารางที่ 3-8 เวลาที่ใช้ในการทดลองจนเพื่อจะมีการสึกหรอถึงระดับที่ต้องการที่ สภาวะต่างๆ.....	50
ตารางที่ 4-1 ค่าความถี่ของ 1xGMF และชุดแถบความถี่ช่วง 3 ฮาร์มอนิกแรกรอบ 1xGMF.....	91

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 การเปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองบนโดเมนเวลา.....	12
รูปที่ 2-2 ค่าเคอร์โทซิสสำหรับรูปแบบสัญญาณต่างๆ.....	13
รูปที่ 2-3 ผลของสภาพเฟืองที่มีต่อสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา.....	15
รูปที่ 2-4 การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลด้วยวิธีการเฉื่อยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ.....	15
รูปที่ 2-5 การเฉื่อยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะของเครื่องกลึงที่ความเร็วรอบ 822 RPM.....	18
รูปที่ 2-6 สัญญาณสเปกตรัมของชุดเฟืองที่เกิดการสึกหรอไประดับหนึ่ง.....	20
รูปที่ 2-7 ขั้นตอนการทำงานของกรขยายความละเอียดโดเมนความถี่ด้วยวิธีเลื่อนความถี่.....	22
รูปที่ 2-8 โดเมนความถี่ แสดงช่วงความถี่สูงสุดที่ต้องการในการวิเคราะห์แบบปกติและความถี่ที่ทำการเลื่อนแล้วสำหรับนำไปขยายความละเอียด.....	23
รูปที่ 2-9 การเก็บสัญญาณโดยวิธีการ Zoom Processing.....	25
รูปที่ 2-10 สัญญาณสเปกตรัมของชุดเฟืองที่เกิดการสึกหรอไประดับหนึ่ง.....	28
รูปที่ 2-11 สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของเวลาและความถี่.....	32
รูปที่ 2-12 การมอดูเลตทางแอมพลิจูด และการมอดูเลตทางความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟส $\pm 30$ องศา.....	33
รูปที่ 2-13 การมอดูเลตทางแอมพลิจูด และการมอดูเลตทางความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟส $\pm 180$ องศา.....	34
รูปที่ 2-14 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT.....	35
รูปที่ 2-15 การสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ผิดพลาด.....	36
รูปที่ 2-16 การรั่วของสัญญาณซึ่งเกิดจากความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของหน้าต่างของเวลา.....	38
รูปที่ 2-17 หน้าต่าง ( Window ) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฟังก์ชันสี่เหลี่ยม.....	39
รูปที่ 2-18 หน้าต่าง ( Window ) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฟังก์ชันแฮนนิ่ง.....	39
รูปที่ 2-19 หน้าต่าง ( Window ) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฟังก์ชันแฟล็ต-ท้อป.....	39
รูปที่ 3-1 ชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง.....	42

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3-2 ภาพถ่ายการบิดเบี้ยวของปลายฟันเฟืองเมื่อฟันเฟืองมีการสึกหรอที่ปลาย 100 เปอร์เซ็นต์.....	49
รูปที่ 3-3 การกระจายโพรไฟล์ของระดับสึกหรอที่ 1.....	50
รูปที่ 3-4 ภาพถ่ายฟันเฟืองก่อนและหลังการทดลอง ที่สภาวะ 500 RPM ภาวะ 340 W.....	51
รูปที่ 3-5 สัญญาณบนโดเมนเวลา ที่สภาวะ 500 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....	54
รูปที่ 3-6 สัญญาณบนโดเมนเวลา ที่สภาวะ 500 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....	55
รูปที่ 3-7 สัญญาณบนโดเมนเวลา ที่สภาวะ 800 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....	56
รูปที่ 3-8 สัญญาณบนโดเมนเวลา ที่สภาวะ 800 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....	57
รูปที่ 3-9 สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....	60
รูปที่ 3-10 สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....	61
รูปที่ 3-11 สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing.....	62
รูปที่ 3-12 สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 800 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....	63
รูปที่ 3-13 สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 800 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....	64
รูปที่ 3-14 สัญญาณสเปกตรัม ที่สภาวะ 800 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing.....	65
รูปที่ 3-15 สัญญาณเซปส์ตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....	68

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3-16 สัญญาณเซปัลส์ตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....	69
รูปที่ 3-17 สัญญาณเซปัลส์ตรัม ที่สภาวะ 500 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing.....	70
รูปที่ 3-18 สัญญาณเซปัลส์ตรัม ที่สภาวะ 800 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging.....	71
รูปที่ 3-19 สัญญาณเซปัลส์ตรัม ที่สภาวะ 800 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging.....	72
รูปที่ 3-20 สัญญาณเซปัลส์ตรัม ที่สภาวะ 800 RPM ภาวะ 340 W เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing.....	73
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....	77
รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RMS กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM.....	78
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 RPM.....	79
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Peak กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 RPM.....	80
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ ความเร็วรอบ 500 RPM.....	81
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Crest Factor กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ ความเร็วรอบ 800 RPM.....	82
รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 500 RPM.....	83
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kurtosis กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็ว รอบ 800 RPM.....	84
รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของ 1xGMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ ความเร็วรอบ 500 RPM.....	97

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของ 1xGMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ ความเร็วรอบ 800 RPM.....	98
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของ 2xGMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ ความเร็วรอบ 500 RPM.....	99
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของ 2xGMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ ความเร็วรอบ 800 RPM.....	100
รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของ 3xGMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ ความเร็วรอบ 500 RPM.....	101
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของ 3xGMF กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ ความเร็วรอบ 800 RPM.....	102
รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 1xSBPL และ 2xSBPL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	104
รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 3xSBPL และ 1xSBPR กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	105
รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 2xSBPR และ 1xSBWL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	106
รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 2xSBWL และ 3xSBWL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	107
รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 1xSBWR และ 2xSBWR กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	108
รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 5xSBPL และ 6xSBPL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	109
รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 7xSBPL และ 11xSBPL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	110
รูปที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 1xSBPL และ 2xSBPL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM 340 W.....	112
รูปที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 3xSBPL และ 1xSBPR กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 500 RPM 340 W.....	113



## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-38 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 3xSBPL และ 1xSBPR กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	132
รูปที่ 4-39 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 2xSBPR และ 1xSBWL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	133
รูปที่ 4-40 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 2xSBWL และ 3xSBWL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	134
รูปที่ 4-41 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 1xSBWR และ 2xSBWR กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	135
รูปที่ 4-42 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 4xSBPL และ 5xSBPL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	136
รูปที่ 4-43 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 6xSBPL และ 10xSBPL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	137
รูปที่ 4-44 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ 14xSBPL กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	138
รูปที่ 4-45 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	146
รูปที่ 4-46 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging ที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	147
รูปที่ 4-47 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing ที่สภาวะ 500 RPM 200 W.....	148
รูปที่ 4-48 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ที่สภาวะ 500 RPM 340 W.....	149
รูปที่ 4-49 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging ที่สภาวะ 500 RPM 340 W.....	150
รูปที่ 4-50 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing ที่สภาวะ 500 RPM 340 W.....	151



## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-51 ความสัมพันธ์ระหว่างแกมมาของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ที่สภาวะ 800 RPM 200 W.....	152
รูปที่ 4-52 ความสัมพันธ์ระหว่างแกมมาของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging ที่สภาวะ 800 RPM 200 W.....	153
รูปที่ 4-53 ความสัมพันธ์ระหว่างแกมมาของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing ที่สภาวะ 800 RPM 200 W.....	154
รูปที่ 4-54 ความสัมพันธ์ระหว่างแกมมาของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Spectrum Averaging ที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	155
รูปที่ 4-55 ความสัมพันธ์ระหว่างแกมมาของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Synchronous Time Averaging ที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	156
รูปที่ 4-56 ความสัมพันธ์ระหว่างแกมมาของเซปส์ตรัมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง เก็บสัญญาณด้วยวิธี Zoom Processing ที่สภาวะ 800 RPM 340 W.....	157
รูปที่ ข-1 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง.....	170
รูปที่ ข-2 ภาพถ่ายการติดตั้งตัวตรวจรู้แบบความเร่งและแทกโคมิเตอร์.....	170
รูปที่ ค-1 การคำนวณการสึกหรอที่ปลายฟัน.....	171
รูปที่ ค-2 ระดับสึกหรอที่ 1.....	172
รูปที่ ค-3 ระดับสึกหรอที่ 2.....	173
รูปที่ ค-4 ระดับสึกหรอที่ 3.....	174
รูปที่ ค-5 ระดับสึกหรอที่ 4.....	175
รูปที่ ค-6 ระดับสึกหรอที่ 5.....	176
รูปที่ ง-1 สัญญาณสเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่วัดในแนวตั้ง.....	178
รูปที่ ง-2 สัญญาณสเปกตรัมความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่วัดในแนวระดับ.....	179
รูปที่ จ-1 ระดับเสียงที่วัดขณะทำการทดลอง.....	181

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$N$	คือ	ขนาดของการแปลงสัญญาณ หรือ จำนวนจุดข้อมูล
$N_{\text{span}}$	คือ	จำนวนของเส้นสเปกตรัม
$T$	คือ	ช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บสัญญาณในหนึ่งหน้าต่างเวลา
$f_{\text{span}}$	คือ	ช่วงความถี่ที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัม
$f_s$	คือ	ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล
$f_n$	คือ	ความถี่ในคริสต์ ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล
$\Delta t$	คือ	คาบของการสุ่มตัวอย่างข้อมูล หรือความละเอียดของสัญญาณเวลา
$\Delta f$	คือ	ระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมแต่ละเส้น
$f_0$	คือ	ความถี่รากฐานของการเก็บสัญญาณ ซึ่งเท่ากับ $1/T$
$w(t)$	คือ	ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก
$A(\omega)$	คือ	สเปกตรัมของฟูริเยร์ (Fourier Spectrum)
$A^2(\omega)$	คือ	เพาเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum) หรือออโตสเปกตรัม (Autospectrum)
$r$	คือ	ตัวประกอบการเลื่อน (Shift Factor)
$N_0$	คือ	จำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับกรณีปกติ (Base Band Analysis) ซึ่งมักมีจำนวนจุดข้อมูล 1024 หรือ 2048 จุด ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นสเปกตรัมที่เลือกใช้
$N_r$	คือ	จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมดที่ใช้เก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่
$\Delta f_n$	คือ	ระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมหลังทำการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่แล้ว
$f_p$	คือ	ความถี่ที่อยู่กึ่งกลางช่วงความถี่ที่ต้องการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่
$N_A$	คือ	จำนวนชุดสัญญาณที่นำมาเฉลี่ยกันบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ
$C(\tau)$	คือ	เซปัสต์รัม
$C_p(\tau)$	คือ	เพาเวอร์เซปัสต์รัม
$am_n(t)$	คือ	ฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด
$fm_n(t)$	คือ	ฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่
$A_{np}$	คือ	แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด
$F_{ns}$	คือ	แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่
$f_m, f_r$	คือ	ความถี่ GMF และความถี่ของฟังก์ชันมอดูเลตตามลำดับ
$\phi_n$	คือ	มุมเฟสฮาร์มอนิกที่ $n$
$\alpha_{np}, \beta_{np}$	คือ	มุมเฟสฮาร์มอนิกที่ $n$ ของฟังก์ชันมอดูเลต

GMF	คือ ความถี่การขบกันของคู่เฟือง (Gear Meshing Frequency)
SBP	คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองขับ
SBPL	คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองขับทางด้านซ้ายของ $1 \times \text{GMF}$
SBPR	คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองขับทางด้านขวาของ $1 \times \text{GMF}$
SBW	คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองตาม
SBWL	คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองตามทางด้านซ้ายของ $1 \times \text{GMF}$
SBWR	คือ ชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองตามทางด้านขวาของ $1 \times \text{GMF}$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย