

การตรวจสอบสภาพเครื่องจักรจากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยวิธีการแปลงฮิลเบิร์ต Machine Diagnostic through Vibration Analysis by Hilbert Transform

สุวัฒน์ พิทักษ์สุรัชย์¹ ธนู ญญาชัย² จักร จันทลักขณา³
ศูนย์วิจัยวิศวกรรมขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-28049231, 0-60-29132500 ต่อ 8303 โทรสาร 0-25870026 กด 111
E-mail: sw1977j@yahoo.com¹, tcc@kmitnb.ac.th², chak@kmitnb.ac.th³

Suwat Pitaksurachai¹ Thanu Chouychai² Chak Chantalakhana³
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand
Tel: 0-28049231, 0-29132500 Ext. 8303 Fax: 0-25870026 press 111
E-mail: sw1977j@yahoo.com¹, tcc@kmitnb.ac.th², chak@kmitnb.ac.th³,

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการสั่นสะเทือนของแบริ่งชนิดลูกกลิ้ง โดยใช้ทฤษฎีการแปลงฮิลเบิร์ต และฟังก์ชันคลุม (Envelope function) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแบริ่งที่ชำรุด และทำนายว่าการชำรุดเกิดจากส่วนใด แบริ่งที่มีการชำรุดต่างกันจะให้สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาที่ไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนจากฟังก์ชันคลุม ทำให้ทราบลักษณะการชำรุดของแบริ่ง โดยความถี่ที่แสดงว่ารางนอกของแบริ่งมีรอยสึก คือ ความถี่ที่เมื่อดูลูกปืนกลิ้งผ่านรอยสึกบนรางนอก และความถี่ย่อย (subharmonic) ของมัน ความถี่ที่แสดงว่ารางในมีรอยสึก คือ มีพัลส์เกิดขึ้นเท่าจำนวนรอบของเพลาลูกปืน และในแต่ละรอบการหมุนมีพัลส์เกิดขึ้นเท่าจำนวนเมื่อดูลูกปืนที่ผ่านรอยสึกบนรางใน ส่วนความถี่ที่แสดงว่าแบริ่งมีเมื่อดูลูกปืนแตกเท่ากับความถี่ของเมื่อดูลูกปืนหนึ่งเม็ดที่พิจารณาวิ่งครบหนึ่งรอบของวงตลับแบริ่ง

Abstract

This paper was the vibration study of roller bearing to delineate the vibrant conducts as the result of damaging bearing and predict where the damageable was presented.

The bearing of the different damage characteristics would deliver a vibrant signal in the different time domain. From the Envelope and Hilbert theory, the damaging characteristics of bearing can be prediction. From the results of experimentation, the frequency of worn outer race was that of rollers through the wear regime on the outer race and its subharmonic, whereas the

harmonic of worn inner race was presented by the equality of the number of pulse and shaft revolution. For each of revolutionary cycle, the pulse of rotation is equal to the number of the roller that experiences wear on the inner race. The harmonic of broken roller was identical to the frequency of the roller running round the bearing per a cycle.

1. บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมักเป็นเครื่องจักรกลหมุน เมื่อใช้งานไปย่อมเกิดการสึกหรอชำรุด ดังนั้นจึงต้องมีระบบการบำรุงรักษาที่ดี และสามารถตรวจสอบสภาพการใช้งานของเครื่องจักรได้อย่างแม่นยำ เพื่อสามารถกำหนดเวลาได้อย่างเหมาะสมในการบำรุงรักษาเป็นผลดีทางด้านการผลิต การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งที่บ่งบอกถึงความผิดปกติในเครื่องจักร หากสามารถบ่งชี้จุดเสียหายในเครื่องจักรจากสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ย่อมเป็นผลดีต่อระบบการบำรุงรักษา เครื่องจักรกลหมุนส่วนใหญ่จะมีแบริ่งเป็นส่วนประกอบ และโดยมากความเสียหายในเครื่องจักรจะเกิดที่แบริ่งก่อน เนื่องจากชิ้นส่วนของแบริ่งมีการเชื่อมต่อนั่นไม่แข็งแรง อีกทั้งลักษณะการออกแบบยังส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนในขณะใช้งาน ก่อให้เกิดการสึกหรอกับชิ้นส่วนของแบริ่งเมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง เมื่อแบริ่งหมุนแบริ่งจะสร้างสัญญาณการสั่นสะเทือนขึ้น เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น ระยะคลอนของแบริ่ง (Bearing clearance), การเสียรูปของเมื่อดูลูกปืน (Defection of rolling bodies), การสึกหรอของรางนอกและรางในของแบริ่ง (Wear of outer race and inner race) ถ้าเป็นไปตามสองกรณีหลัง จะก่อให้เกิดสั่นสะเทือนที่มีขนาดมากในรูป

1. นักศึกษาด้านวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2. อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
3. อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การดลจับปล้น (Shock pulse) ถ้าสามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดการดลจับปล้นของแบริ่งที่เสียหายได้ จะสามารถทำนายความเสียหายของชิ้นส่วนแบริ่งในเครื่องจักรได้ มีการใช้หลักการเซปสตรัม (cepstrum) ในการตรวจสอบการแตกร้าวเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น เพือง มู่เล่ และชิ้นส่วนอื่นๆ [6] แต่ในบทความนี้จะวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแบริ่งชนิดลูกกลิ้ง ในโดเมนเวลา โดยอาศัยทฤษฎีการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform) และทฤษฎีฟังก์ชันคลุม (Envelope) มาช่วยเพื่อทำนายความเสียหายของแบริ่งภายใต้สภาวะที่ถูกกำหนด

2. การเสียหายและการทดสอบแบริ่งชนิดลูกกลิ้ง

แบริ่งชนิดลูกกลิ้งสามารถสร้างการสั่นสะเทือนในขณะหมุน จากระยะคลาดเคลื่อนในแนวนอน โดยศูนย์กลางของรางใน (Inner ring) เปลี่ยนตำแหน่งไปตามเม็ดลูกปิ่นที่เคลื่อนที่ในราง ตำแหน่งของศูนย์กลางรางในอยู่ที่ O_{b1} เมื่อรางในอยู่บนเม็ดลูกปิ่นหนึ่งเม็ด และอยู่ที่ O_{b2} เมื่อรางในอยู่บนเม็ดลูกปิ่นสองเม็ด ดังรูปที่ 1 แต่การสั่นสะเทือนยังเกิดจากการสึกหรอและเสียรูปของชิ้นส่วนแบริ่งด้วย ซึ่งสามารถคำนวณความถี่ได้จากตารางที่ 1 [3]

ตารางที่ 1 ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่เกิดกับแบริ่ง

ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกปิ่นตามความเสียหาย		
เม็ดลูกปิ่นวิ่งผ่านจุดเสียหาย 1 จุด บนรางที่อยู่กับที่	$f = \frac{1}{120}(1-\gamma)z \cdot n$	$f = \frac{1}{120}(1+\gamma)z \cdot n$
รางลูกปิ่นของส่วนที่หมุนมีจุดเสียหาย 1 จุด	$f = \frac{n}{60}$	$f = \frac{n}{60}$
เม็ดลูกปิ่นเสียหาย 1 เม็ด	$f = \frac{1}{60} \frac{d_m}{d_g}(1-\gamma^2)n$	$f = \frac{1}{60} \frac{d_m}{d_g}(1-\gamma^2)n$

เมื่อ $\gamma = \frac{d_g}{d_m} \cos \alpha$

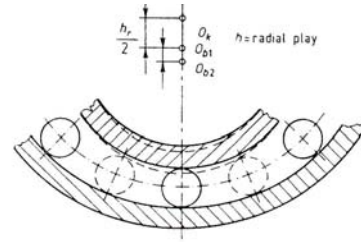
α = มุมสัมผัสของเม็ดลูกปิ่น (contact angle of bearing)

d_m = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแบริ่ง

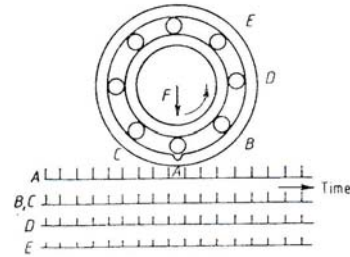
d_g = เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดลูกปิ่น

n = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

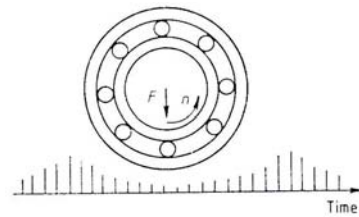
รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือน สามารถบอกได้ว่ามีจุดเสียหายที่ชิ้นส่วนใดของแบริ่งได้บ้าง ดูรายละเอียดจากรูปที่ 2



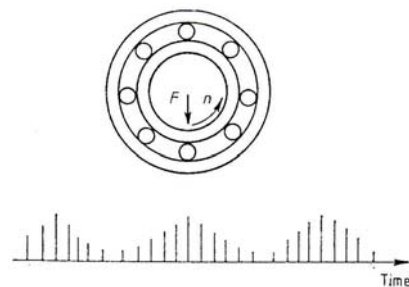
รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของศูนย์กลางแบริ่ง



รูปที่ 2.1 การกระแทกเนื่องจากมีจุดบกพร่อง 1 จุดบนรางนอก [3]



รูปที่ 2.2 การกระแทกเนื่องจากมีจุดบกพร่อง 1 จุดบนรางใน [3]



รูปที่ 2.3 การกระแทกเนื่องจากมีจุดบกพร่องที่เม็ดลูกปิ่น 1 เม็ด [3]

จากรูปที่ 2.1, 2.2, 2.3 ลักษณะของสัญญาณที่แสดงว่ารางนอกของแบริ่งมีรอยคือ เป็นพัลส์ที่มีความถี่เท่าจำนวนครั้งที่เม็ดลูกปิ่นผ่านรอบบนรางนอก ส่วนลักษณะของสัญญาณที่แสดงว่ารางในของแบริ่งมีรอยคือ มีพัลส์สูงที่ตำแหน่งรอยตรงกับแนวแรง และ พัลส์ต่ำลงที่ตำแหน่งรอยไม่ตรงกับแนวแรง เกิดความถี่ตรงกับรอบการหมุนของรางใน และลักษณะสุดท้ายคือ เกิดจากเม็ดลูกปิ่นแตก ลักษณะสัญญาณคล้ายกับกรณีมีรอยที่รางในแต่จะมีความถี่ต่างกัน โดยกรณีนี้จะมี ความถี่ตรงกับรอบการหมุนรอบตัวเองของเม็ดลูกปิ่น

3. ทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณ

3.1 อินทิเกรตของการประสาน (Convolution)

การทำอินทิเกรตของการประสาน คือ การเอาการตอบสนองดล (Impulse response) ของระบบมาคูณกับสัญญาณเข้า ณ เวลานั้นบวกกับ ผลคูณของการตอบสนองดลกับ สัญญาณเข้า ตัวก่อนหน้า หรือ การหาผลตอบสนอง (Response) ของระบบจากสัญญาณเข้าแบบต่อเนื่อง

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau = x(t) * h(t) \quad (1)$$

* = สัญลักษณ์อินทิเกรตของการประสาน

โดยแต่ละระบบจะมีผลตอบสนอง (Impulse response) ของระบบอยู่ ความหมายของการตอบสนองดลคือ ผลตอบสนองของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น Impulse ดังนั้นถ้าเราป้อนสัญญาณเข้าเป็น Impulse 2 Impulse ห่างกัน τ วินาที ระบบก็จะให้ผลตอบสนองเป็น การตอบสนองดล 2 อัน ห่างกัน เท่ากับ ช่วงเวลา τ ดังนั้น การตอบสนองดลของระบบ จะได้จากการนำเอาการตอบสนองดล 2 อัน มาบวกกันตามเวลา

การทำอินทิเกรตของการประสานในโดเมนของเวลา (Time domain) เท่ากับ การคูณกันของฟังก์ชัน ในโดเมนความถี่ (Frequency domain)

$$h(t) * x(t) \leftrightarrow H(f) \cdot X(f) \quad (2)$$

การทำ Convolution ในโดเมนความถี่ จะเท่ากับ การคูณกันของฟังก์ชันในโดเมนเวลา

$$H(f) * X(f) \leftrightarrow h(t) \cdot x(t) \quad (3)$$

3.2. การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform)

เป็นเครื่องมือในการหาสเปกตรัมของฟังก์ชันที่ไม่เป็นรายคาบ (Aperiodic function) โดยจะแปลงฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่องทางด้านเวลา เป็นฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่องทางด้านความถี่

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(i\omega_0) e^{i\omega_0 t} d\omega_0 \quad (4)$$

$$F(i\omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega_0 t} dt \quad (5)$$

เมื่อ $F(i\omega_0)$ เป็น Fourier transform ของ $f(t)$

$f(t)$ เป็น Inverse fourier transform ของ $F(i\omega_0)$

3.2.1 การแปลงฟูเรียร์เร็ว (Fast fourier transform)

การแปลงฟูเรียร์เร็ว คือ วิธีการแปลงสัญญาณที่อยู่ในโดเมนเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่ เนื่องจากวิธีการคำนวณ Discrete Fourier

Transform (DFT) ใช้เวลามากในการคำนวณ คือ ต้องทำการบวกจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด N ครั้ง และคูณจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมดอีก N ครั้ง รวมแล้วต้องทำการคำนวณทั้งหมด N^2 ครั้ง ดังนั้น จึงมีการคิดวิธี Fast Fourier Transform ขึ้น โดยการพัฒนาจาก DFT แต่มีการคำนวณเพียง $N \log_2 N$ ครั้งเท่านั้น ในการหา FFT ข้อมูลจะต้องมีจำนวนเป็น 2^M โดย M เป็นจำนวนเต็มด้วย

3.2.2. การแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform)

การแปลงฮิลเบิร์ต เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์เพื่อบอกให้ทราบว่ารระบบเป็น Causal หรือ Non-causal โดยฟังก์ชันของระบบต้องเป็น Analytic function คือ สามารถหาอนุพันธ์ (Differentiate) ได้ Hilbert transform คือ การนำสัญญาณที่สนใจมาอินทิเกรตของการประสาน กับ Pseudo function ดังสมการนี้

$$H(\omega) = \frac{1}{\pi j} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G(\Omega)}{\Omega - \omega} d\Omega = G(\omega) * \frac{-1}{i\pi\omega} \quad (6)$$

$G(\omega)$ = สัญญาณในโดเมนความถี่

$H(\omega)$ = การแปลงฮิลเบิร์ตของ $G(\omega)$

PV = สัญลักษณ์แสดงการอินทิเกรตโดยใช้ทฤษฎี Cauchy Riemann

สามารถแยกได้เป็นเทอม จำนวนจริง กับ จำนวนจินตภาพ และเปลี่ยนช่วงการอินทิเกรตใหม่ได้เป็น

$$\text{Re}(H(\omega)) = \frac{-2}{\pi} PV \int_0^{\infty} \frac{\Omega}{\Omega^2 - \omega^2} \text{Im}(G(\Omega)) d\Omega \quad (7)$$

$$\text{Im}(H(\omega)) = \frac{2\omega}{\pi} PV \int_0^{\infty} \frac{\Omega}{\Omega^2 - \omega^2} \text{Re}(G(\Omega)) d\Omega \quad (8)$$

การแปลงฮิลเบิร์ตในโดเมนความถี่ โดยการอินทิเกรตของการประสานใช้เวลามากกว่าการแปลงฮิลเบิร์ตในโดเมนเวลาโดยอาศัยทฤษฎีอินทิเกรตของการประสานที่กล่าวไว้ว่า การทำอินทิเกรตของการประสานในโดเมนความถี่จะเท่ากับ ผลคูณของฟูเรียร์ย้อนกลับ (Inverse Fourier Transform) ของสัญญาณแต่ละสัญญาณในโดเมนเวลา

$$G(\omega) * \frac{1}{i\pi\omega} = F^{-1}(G(\omega)) \times F^{-1}\left(\frac{-1}{i\pi\omega}\right) \quad (9)$$

โดย ฟูเรียร์ย้อนกลับของ $\frac{-1}{i\pi\omega}$ จะเท่ากับ $\text{sgn}(t)$ โดย $\text{sgn}(t) = -1$ เมื่อ $t < 0$ และเท่ากับ 1 เมื่อ $t > 0$ แต่การแปลงฟูเรียร์เร็วจะสมมุติข้อมูลเป็นฟังก์ชันคาบ (Periodic function) ซึ่งฟังก์ชัน $\text{sgn}(t)$ ไม่เป็นฟังก์ชันคาบ ดังนั้นจึงต้องแทน $\text{sgn}(t)$ ในโดเมนความถี่ คือ $\frac{i}{\pi\omega}$ เป็น $\text{cotan}(\omega)$ การทำเช่นนี้จะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นแต่สามารถหลีกเลี่ยง

ปัญหานี้ได้โดยขยายฟังก์ชัน $(G(\omega), \cotan(\omega))$ ไปอีก 2N จุด โดยให้ N จุดในส่วนหลังเลื่อนไป 2N จุด ส่วนตรงกลางที่ว่าง 2N จุด จะให้ค่าเป็นศูนย์ ส่วนอีกปัญหาหนึ่งที่พบ คือ ตามทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์จะต้องแปลงจาก $-\infty$ ถึง ∞ แต่ในทางปฏิบัติข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์มีจำนวนจำกัด ดังนั้นจึงเกิดความผิดพลาดขึ้น จากสาเหตุข้างต้นนี้ B.J. FEI [4] ได้คิดวิธีเพื่อลดความผิดพลาดนี้ ซึ่งได้เสนอฟังก์ชัน $\text{sgn}(t)$ รูปแบบใหม่ ดังสมการ (10) ซึ่งการใช้ฟังก์ชัน $\text{sgn}(t)$ ของ B.J. FEI จะตัดปัญหาเรื่องความไม่เป็นฟังก์ชันคาบได้

$$u(n) = 0.978 + 3.295 \times 10^{-4} n - 1.267 \times 10^{-6} n^2 + 0.528 e^{-0.2n} \cos \pi n \quad (10)$$

$$\text{เมื่อ } u(1) = 0 \quad 2 \leq n \leq 1024$$

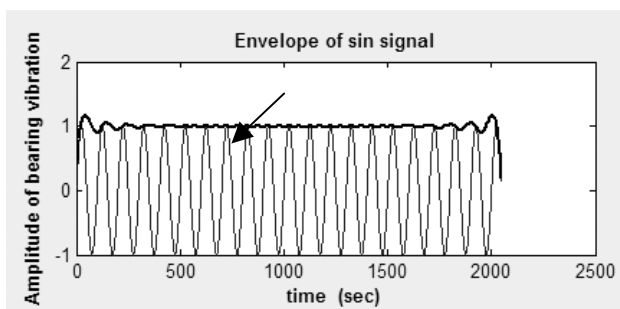
3.3. ฟังก์ชันคลุม (Envelope function)

ฟังก์ชันคลุมใช้คลุมจุดยอดของสัญญาณที่วัดมาได้ เช่น ถ้าสัญญาณอยู่ในรูป $\cos(\omega_0 t)$ จะได้ Envelope เป็นเส้นตรงตามแนวระดับ และมีขนาดเท่ากับ 1 สามารถพิสูจน์หาสูตรการคำนวณได้จากคลื่นไซน์ ดังนี้

$$E = \text{envelope} = \sqrt{A^2 \sin^2(\omega_0 t) + A^2 \cos^2(\omega_0 t)} \quad (11)$$

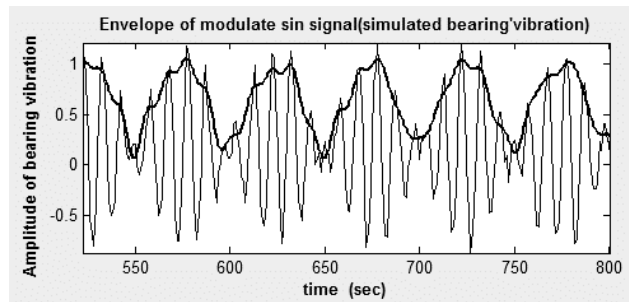
$$E = A$$

จากสูตรการคำนวณ ต้องการหาสัญญาณที่มีเฟสต่างจากสัญญาณเดิม 90 องศา ในที่นี้ใช้การแปลงฮิลเบิร์ตหาสัญญาณดังกล่าว จากสมการที่ (11) ได้ทำการหา Envelope ของสัญญาณ $\sin(\omega_0 t)$ ได้ผลดังรูปที่ 3 โดยกราฟ Envelope ของ $\sin(\omega_0 t)$ จะเป็นเส้นค่อนข้างตรงลากต่อดูยอดของกราฟ $\sin(\omega_0 t)$ และมีขนาดเท่ากับหนึ่ง

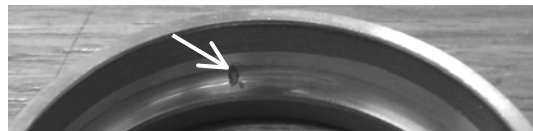


รูปที่ 3 กราฟ Envelope ของสัญญาณ $\sin(\omega_0 t)$

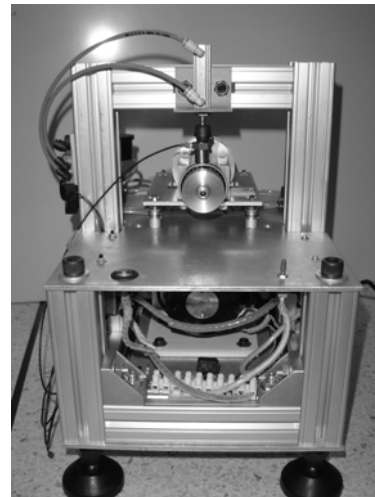
จากการศึกษาพบว่า การสั่นสะเทือนของแบริ่งคล้ายกับสัญญาณแอมพลิจูดโมดูเลท (Amplitude Modulate) จึงได้ทำการจำลองสัญญาณแอมพลิจูดโมดูเลทและหาฟังก์ชันคลุมได้ผลดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟ Envelope ของสัญญาณ $\sin(\omega_0 t)$ Modulate



รูปที่ 5 ลักษณะรอยที่เกิดจากการเจียร



รูปที่ 6 ลักษณะของเครื่องทดสอบ

4. การทดสอบเพื่อตรวจจับความเสียหายของแบริ่ง

ได้ทำการทดลองโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน

- 4.1. ทดลองโดยใช้แบริ่งที่ถูกกำหนดความเสียหายเอง
- 4.2. ทดลองกับแบริ่งที่ถูกใช้งานจริงมาแล้ว

การทดลองทั้ง 2 ส่วนนี้ จะมีขั้นตอนทดลองเหมือนกัน แตกต่างกันตรงแบริ่งที่ใช้ทำการทดลอง โดยในส่วนแรกจะใช้แบริ่งที่ถูกทำให้เสียหายโดยการเจียรให้เป็นรอย และในส่วนที่สองจะใช้แบริ่งที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำการทดลอง

การทดลองโดยใช้แบริ่งที่ถูกกำหนดความเสียหายเอง

แยกการเสียหายของแบริ่งเป็น 3 กรณี คือ

1. เสียที่เม็ดลูกปืนหนึ่งเม็ด
2. มีรอยลึกที่รางในหนึ่งรอย
3. มีรอยลึกที่รางนอกหนึ่งรอย

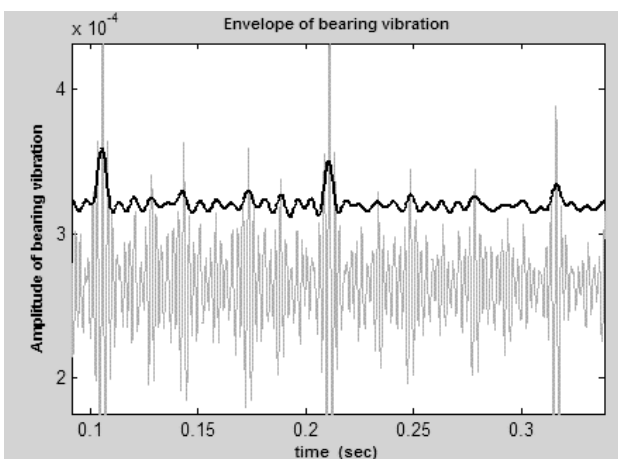
โดยรอยดังกล่าวเกิดจากการเจียรด้วยเข็มเจียรมีลักษณะดังรูปที่ 5 การทดลองใช้แบริ่งเบอร์ 7005CY P5 ซึ่งมีมุมสัมผัสของเม็ดลูกปืน (α) 40 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแบริ่ง (d_m) 36 มิลลิเมตร มีจำนวนลูกปืนอยู่ 14 ลูก และเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดลูกปืน (d_g) เท่ากับ 6.35 มิลลิเมตร โดยนำแบริ่งซึ่งถูกล้างจารบีออกแล้วไปหมุนบนเครื่องทดสอบแบริ่งตามรูปที่ 6 และใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (accelerometer) รุ่น 4371 ซึ่งยึดกับรางของแบริ่งวงนอกด้วยความถี่โดยใช้แรงกด 3 นิวตัน วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนผ่านเครื่องขยายประจุ (Charge Amplifier) รุ่น 2635 และเข้าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) รุ่น hp3562A

จากนั้นนำไปหมุนโดยรางนอกอยู่กับที่ และมีตัวยังสัญญาณการสั่นสะเทือนติดอยู่ ส่วนรางในจะติดกับเพลาหมุนและหมุนด้วยความเร็วประมาณ 1,400 รอบต่อนาที (23.75 เฮิรท์) นำสัญญาณที่วัดได้ไปหาฟังก์ชันคลุมนโดยใช้ทฤษฎีการแปลงฮิลเบิร์ตร่วมกับการกรองสัญญาณความถี่ต่ำ ได้ผลดังนี้ คือ

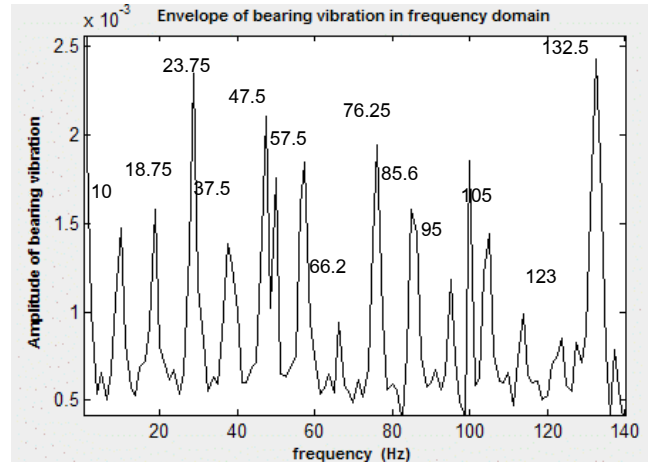
กรณีที่ 1 แบริ่งที่รางนอกมีรอยหนึ่งรอย หาฟังก์ชันคลุมนได้ผลตามรูปที่ 7 คือ มีพัลส์สิบพัลส์ซึ่งแสดงถึงเม็ดลูกปืนถึงผ่านรอบบนรางนอก ความถี่ที่แสดงว่ารางนอกมีรอยคือ 132.5 เฮิรท์ และความถี่ย่อย (subharmonic) คือ $(132.5/14) \times I$ เฮิรท์ ($I = 1, 2, \dots, 13$)

กรณีที่ 2 แบริ่งที่รางในมีรอยหนึ่งรอย หาฟังก์ชันคลุมนได้ผลตามรูปที่ 9 คือ มีพัลส์สิบพัลส์ในเวลา 0.8 วินาที หรือ 23.75 เฮิรท์ เท่าความเร็วรอบของเพลาหมุน พัลส์หนึ่งพัลส์เกิดจากรางในหมุนหนึ่งรอบ และการหมุนของรางในหนึ่งรอบจะผ่านเม็ดลูกปืนประมาณเก้าเม็ด ซึ่งตรงกับความถี่ 215 เฮิรท์ ดังนั้นความถี่ที่แสดงว่ารางในมีรอยคือ 23.75 และ 215 เฮิรท์ และความถี่ย่อยคือ $(215/9) \times I$ เฮิรท์ ($I = 1, 2, \dots, 8$)

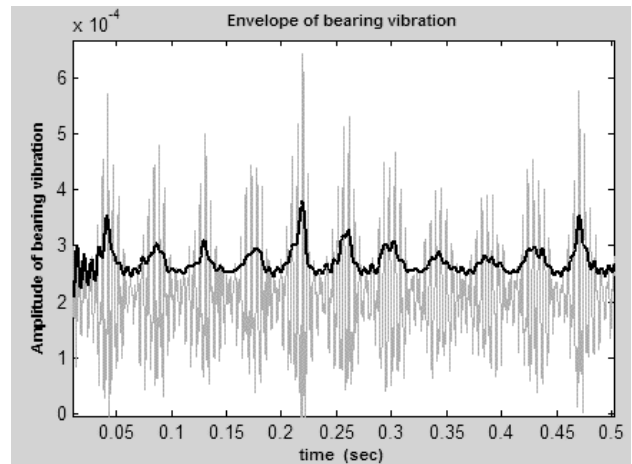
กรณีที่ 3 ส่วนแบริ่งที่เม็ดลูกปืนแตกหนึ่งเม็ด หาฟังก์ชันคลุมนได้ผลตามรูปที่ 11 คือ มีพัลส์แปดพัลส์ในเวลา 0.8 วินาทีหรือ 10 เฮิรท์ คือ เท่าความถี่ของเม็ดลูกปืนหนึ่งเม็ดที่พิจารณาวิ่งครบหนึ่งรอบของวงแบริ่ง



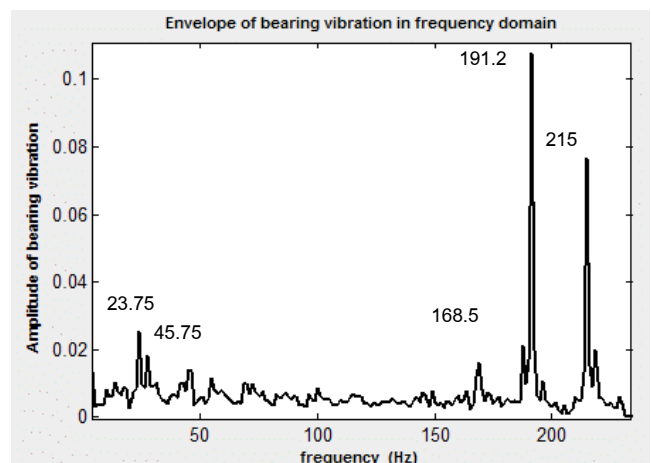
รูปที่ 7 กราฟ Envelope สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งที่รางนอกมีรอยหนึ่งรอย ณ ตำแหน่งตรงกับแนวแรงที่ให้



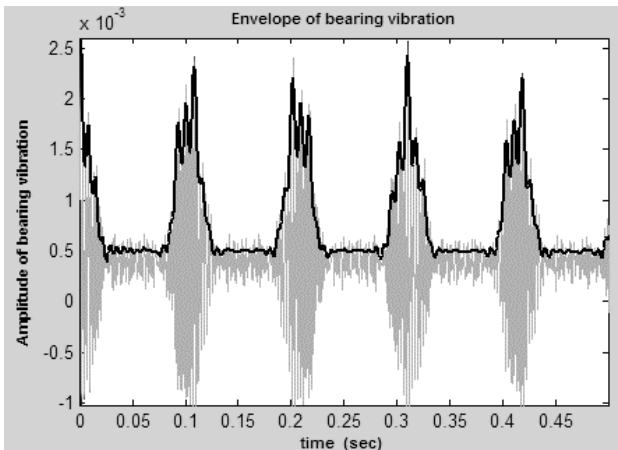
รูปที่ 8 กราฟ Envelope บนโดเมนความถี่ สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งที่รางนอกมีรอยหนึ่งรอย ณ ตำแหน่งตรงกับแนวแรงที่ให้



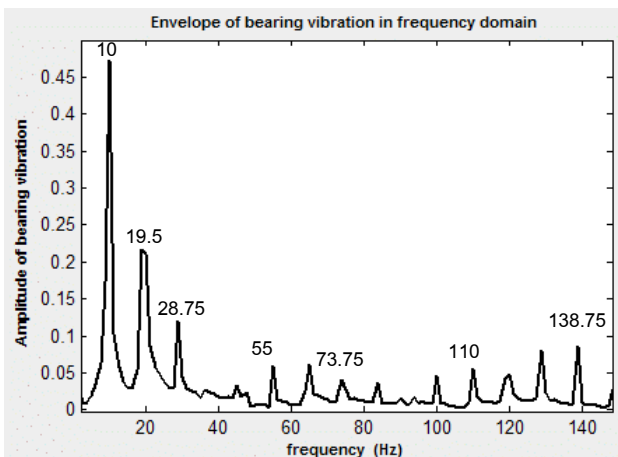
รูปที่ 9 กราฟ Envelope สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งที่รางในมีรอยหนึ่งรอย



รูปที่ 10 กราฟ Envelope บนโดเมนความถี่ สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งที่รางในมีรอยหนึ่งรอย



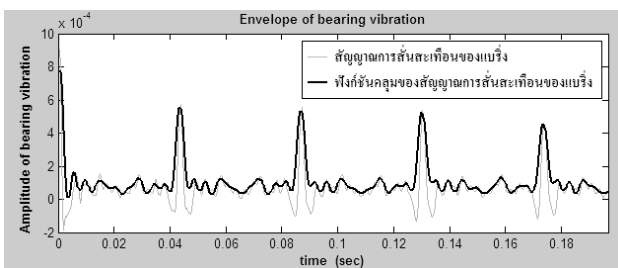
รูปที่ 11 กราฟ Envelope สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งที่มีเม็ดลูกปืนแตกหนึ่งเม็ด



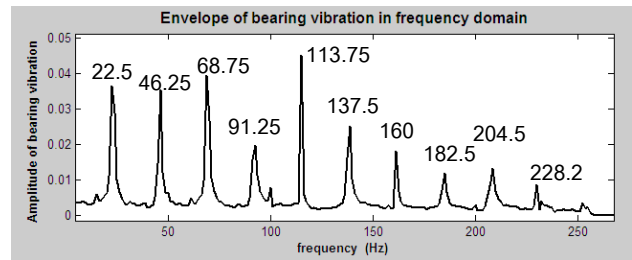
รูปที่ 12 กราฟ Envelope บนโดเมนความถี่ สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งที่มีเม็ดลูกปืนแตกหนึ่งเม็ด

การทดลองกับแบริ่งที่ถูกผ่านการใช้งานจริงมาแล้ว

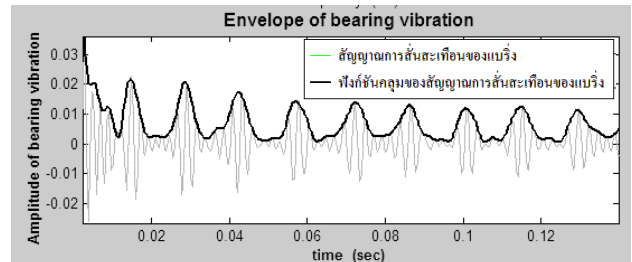
ส้อมแบริ่งมาทำการทดลองสามตัว โดยทั้งสามตัวเป็นเบอร์เดียวกัน คือ เบอร์ 6204 มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 47 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 25 มิลลิเมตร มีลูกปืนจำนวน 8 ลูก ได้ผลการทดลองดังนี้



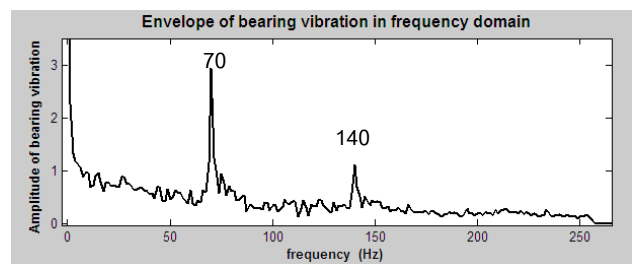
รูปที่ 13 กราฟ Envelope สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งตัวที่ 1



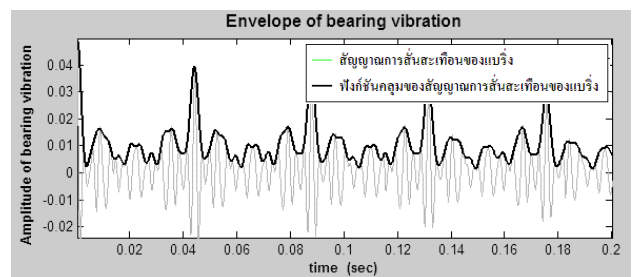
รูปที่ 14 กราฟ Envelope บนโดเมนความถี่ สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งตัวที่ 1



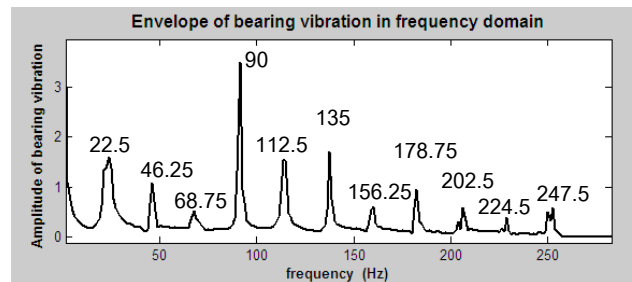
รูปที่ 15 กราฟ Envelope สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งตัวที่ 2



รูปที่ 16 กราฟ Envelope บนโดเมนความถี่ สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งที่ตัวที่ 2



รูปที่ 17 กราฟ Envelope สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งตัวที่ 3



รูปที่ 18 กราฟ Envelope บนโดเมนความถี่ สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งตัวที่ 3

จากรูปที่ 13 แสดงถึงฟังก์ชันคลุ่มของสัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งตัวที่ 1 ลักษณะของสัญญาณสามารถทำนายได้ว่ามีความเสียหายที่รางในของแบริ่ง เนื่องจากในระหว่างพีค (peak) ใหญ่จะมีพีคย่อยๆ อีก 4 พีค ซึ่งเกิดจากการหมุนของรางในหนึ่งรอบจะผ่านเม็ดลูกปืนประมาณห้าเม็ด ดังนั้นความถี่ที่แสดงว่ารางในมีความเสียหายคือ 113.75 และความถี่ย่อยของมันคือ $(113.75/5)^*i$ โดย $i = 1, 2, 3, 4$

จากรูปที่ 15 แสดงถึงฟังก์ชันคลุ่มของสัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งตัวที่ 2 ลักษณะของสัญญาณสามารถทำนายได้ว่ามีความเสียหายในลักษณะหลวมคลอน เนื่องจากค่าความถี่ 70 เฮิรท์ เป็นความถี่ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางของแบริ่งเมื่อรางในของแบริ่งหมุนด้วยความถี่ 22.5 เฮิรท์

จากรูปที่ 17 แสดงถึงฟังก์ชันคลุ่มของสัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งตัวที่ 3 ลักษณะของสัญญาณสามารถทำนายได้ว่ามีความเสียหายที่รางในของแบริ่ง เนื่องจากมีความถี่ที่แสดงว่ารางในมีความเสียหายคือ 112.5 เฮิรท์ และความถี่ย่อยของมันคือ $(112.5/5)^*i$ โดย $i = 1, 2, 3, 4$ การหมุนของรางในหนึ่งรอบจะผ่านเม็ดลูกปืนประมาณห้าเม็ด ซึ่งตรงกับความถี่ 112.5 เฮิรท์

สรุปผล

ฟังก์ชันคลุ่มของสัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่ง สามารถบอกถึงส่วนที่เสียหายของแบริ่งได้ โดยต้องมีการกรองสัญญาณตรงช่วงความถี่ที่พิจารณา ความถี่ที่แสดงว่ารางนอกของแบริ่งมีรอยสึก คือ ความถี่ที่เม็ดลูกปืนกลิ้งผ่านรอยสึกบนรางนอกและความถี่ย่อย (subharmonic) ของมัน ความถี่ที่แสดงว่ารางในมีรอยสึก คือ มีพัลส์เกิดขึ้นเท่าจำนวนรอบของเพลลาหมุน และในแต่ละรอบการหมุนมีพัลส์เกิดขึ้นเท่าจำนวนที่รอยสึกบนรางในผ่านเม็ดลูกปืน ส่วนความถี่ที่แสดงว่าแบริ่งมีเม็ดลูกปืนแตก คือความถี่ของเม็ดลูกปืนหนึ่งเม็ดที่พิจารณาวิ่งครบหนึ่งรอบของวงดลัปแบริ่ง และจะเห็นว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของแบริ่งที่มีความเสียหายต่างกรณีกันจะต่างกัน และสามารถนำรูปแบบของสัญญาณมาเป็นตัวช่วยอีกตัวหนึ่ง ในการพิจารณาว่าเกิดความเสียหายกับแบริ่งในลักษณะใด จากทฤษฎีและผลสรุปข้างต้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนหมุนอื่นๆ ของเครื่องจักรได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] E.Oran Brigham, "The fast fourier transform", 1974 by Prentic- Hall,Inc. Englewood Cliff,N.J.
- [2] G.R. Tomlinson,"Kmit Lectures:Note on Hilbert transform"
- [3] György Lipóvszky, Karoly Sólyomvári, and Gábor Varga, "Vibration Testing of Machines and Their maintenance", ELSEVIER Amsterdam Oxford New York Tokyo 1990.
- [4] T.Vinh, Y.Chevalier, A.Haoui, and B.J. Fei ,"An introduction to the theory of the Hilbert transform and its scientific basis."Laboratory of structures,ISMCM,Saint Ouen Francs.
- [5] นาย ชัชชัย ชลิตพันธุ์,"โปรแกรมวิเคราะห์โมดัลของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น",ปริญญาณิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ.2532
- [6] นาย สมชาย เดโชธรรมสถิต, "การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟัน" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 เล่มที่3, หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย