doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

ตัวบ่งชี้สำหรับปรับมอร์เลต์เวฟเลตเพื่อใช้ในการตรวจจับความเสียหายแบบเฉพาะที่ของตลับลูกปืน

นันธพงศ์ กุลดิลกไพบูลย์[1] และ ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ[2*]

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

Email: nuntaphongk@hotmail.com[1], chairote.k@chula.ac.th[2*]

*ผู้เขียนสำหรับติดต่อกลับ

บทคัดย่อ

การตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนมีบทบาทที่สำคัญในงานบำรุงรักษาตามสภาพของเครื่องจักรกลหมุน เมื่อเกิดความเสียหายแบบเฉพาะที่ขึ้นในตลับลูกปืน สัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนจะมีลักษณะของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นคาบปะปนอยู่ในสัญญาณ โดยคาบของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจะมีความเกี่ยวข้องกับจุดที่เกิดความเสียหายของตลับลูกปืน อย่างไรก็ตามสัญญาณอิมพัลส์ดังกล่าวมักจะถูกกลบด้วยสัญญาณรบกวน จึงมีการใช้วิธีการวิเคราะห์การสั่นพ้องที่ความถี่สูงร่วมกับตัวกรองมอร์เลต์เวฟเลตในการประมวลผลสัญญาณเพื่อตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้น แต่วิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องมีการเลือกความถี่กึ่งกลางและแถบความถี่ผ่านของตัวกรองที่เหมาะสมเพื่อที่จะได้ผลการตรวจจับความเสียหายที่ถูกต้อง มีการนำเสนอตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสมในการปรับตัวกรอง เช่น เคอร์โทซิส และแชนนอนเอนโทรปี แต่ตัวบ่งชี้ดังกล่าวไม่ได้พิจารณาถึงฮาร์มอนิกในเอ็น-วีลอปสเปกตรัมซึ่งมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นคาบในสัญญาณความเสียหาย บทความนี้นำเสนอตัวบ่งชี้ใหม่ โดยตัวบ่งชี้นี้จะเลือกตัวกรองที่ให้อัตราส่วนที่มีค่ามากที่สุดระหว่างผลรวมของตระกูลฮาร์มอนิกที่มีค่ามากที่สุดในช่วงที่กำหนดต่อค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเอ็นวีลอปสเปกตรัม จากผลการศึกษาโดยการใช้แบบจำลองสัญญาณความเสียหายพบว่า ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอสามารถตรวจจับลักษณะของความเสียหายได้มากกว่า 97% ที่ระดับของสัญญาณรบกวน -15dB โดยไม่ขึ้นกับลักษณะอัตราส่วนการหน่วงและความถี่ธรรมชาติของสัญญาณความเสียหาย

คำสืบค้น

มอร์เลต์เวฟเลต, การกรองสัญญาณด้วยเวฟเลต, การวิเคราะห์เอ็นวีลอป, การตรวจจับความเสียหายตลับลูกปืน

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

A New Indicator for Morlet Wavelet Filter Adjustment in Rolling Element Bearing Localized Defect Detection

Nuntaphong Koondilogpiboon[1] and Chairote Kunpanitchakit[2*]

Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok, Thailand 10330
Email: nuntaphongk@hotmail.com[1], chairote.k@chula.ac.th[2*]

*Corresponding Author

ABSTRACT

Rolling element bearings fault diagnostic has vital role in rotating machinery condition based maintenance. When localized defect occurs, the periodic impulse feature which relates to defect location on the bearing appears in machinery vibration signal. However, this signal is generally masked by noised. Hence, an effective signal processing method is needed. The combination of high frequency resonance technique (HFRT) or envelope analysis and Morlet wavelet filter is one of commonly used method. It demodulates low frequency signal related to bearing failure from high frequency carrier related to machine system natural frequency. Unfortunately, it requires proper passband to get effective detection result. Parameters such as kurtosis and Shannon entropy of filtered signal envelope have been proposed as indicator for optimal Morlet wavelet filter selection. However, both parameters do not consider harmonics in envelope spectrum, which are directly related to periodic impulse in the signal. An indicator that takes harmonics in envelope spectrum into account has been proposed. It picks optimal Morlet wavelet that gives the highest ratio of the sum of harmonics family that has maximum value to the arithmetic mean of envelope spectrum in a specified range. In simulation study, it is shown that the proposed parameter can detect bearing defect more than 97% from signal of various natural frequencies and damping ratios up to signal to noise ratio of -15 dB.

KEYWORDS

Morlet wavelet, wavelet filtering, envelope analysis, rolling element bearing defect detection

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

I. บทนำ

ตลับลูกปืน (rolling element bearing) เป็นชิ้นส่วนที่มีความสำคัญในเครื่องจักรหมุนแทบทุกชนิด ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนถือเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่นำไปสู่ความเสียหายของเครื่องจักรกลซึ่งมักจะตามมาด้วยค่าใช้จ่ายและการเสียโอกาสต่างๆ เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจึงมีการพัฒนาวิธีการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนขึ้นมา วิธีการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืนโดยใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นสูงและสะดวกในการใช้งาน [1]

โดยทั่วไปรูปแบบความเสียหายของตลับลูกปืนที่เกิดขึ้นมักจะเป็นความเสียหายแบบเฉพาะที่ (localized defect) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเนื้อโลหะชิ้นเล็กๆหลุดออกมาจากพื้นผิวสัมผัสของตลับลูกปืน โดยสาเหตุมักมาจากความล้าเนื่องจากชิ้นส่วนดังกล่าวรับความเค้นแบบเป็นวงรอบ [2] เมื่อชิ้นส่วนอื่นที่สัมผัสกับพื้นผิวที่เกิดความเสียหายเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เกิดความเสียหายจะเกิดอิมพัลส์ขึ้น โดยอิมพัลส์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นเป็นคาบที่สอดคล้องกับตำแหน่งความเสียหายในตลับลูกปืนและอัตราเร็วรอบของเพลา ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนได้เป็นผลการตอบสนองต่อชุดของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นคาบๆ เป็นสัญญาณที่ถูกมอดุเลตแอมพลิจูด (amplitude modulation) โดยประกอบไปด้วยตัวสัญญาณมอดุเลต (modulator) ความถี่ต่ำ ซึ่งก็คือความถี่ของการเกิดซ้ำของอิมพัลส์ และสัญญาณที่เป็นคลื่นพาห์ (carrier) ความถี่สูงซึ่งก็คือความถี่ธรรมชาติของระบบชุดตลับลูกปืนและโครงสร้างที่รองรับ [3, 4] โดยความถี่ของการเกิดซ้ำของอิมพัลส์ถือเป็นความถี่ลักษณะเฉพาะ (characteristic frequency) ที่สามารถบ่งบอกถึงการมีอยู่และตำแหน่งของความเสียหายในตลับลูกปืนได้ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนแผ่ตัวเป็นช่วงกว้างในโดเมนความถี่ ดังนั้นสัญญาณความเสียหายจึงมักจะถูกสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณอื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องกับความเสียหายของตลับลูกปืนกลบ โดยเฉพาะในย่านความถี่ต่ำซึ่งมีความถี่ที่มีความถี่ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนทางกลอื่นๆ [5]

เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในข้างต้น ได้มีการนำเสนอวิธีการตรวจจับสัญญาณความเสียหายอยู่หลายวิธีด้วยกัน โดยวิธีการวิเคราะห์การสั่นพ้องที่ความถี่สูง (high frequency resonance technique: HFRT) หรือเรียกอีกอย่างว่าการวิเคราะห์เอ็นวีลอป (envelope analysis) ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไป [1, 6] วิธีการดังกล่าวประกอบไปด้วยการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองผ่านช่วง การสร้างเอ็นวีลอป และการแปลงฟูริ-เยร์ วิธีการนี้สามารถดึงเอาลักษณะของการกระตุ้นที่เกิดขึ้นเป็นคาบ และดีมอดุเลตสัญญาณความเสียหายได้ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องมีการเลือกแถบความถี่ผ่านของตัวกรองที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการตรวจจับที่ถูกต้อง [7]

ในปัจจุบัน ตัวกรองเวฟเลต (wavelet) ถูกนิยมนำมาใช้ในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน โดยทำงานร่วมกับการวิเคราะห์การสั่นพ้องที่ความถี่สูง เนื่องจากเวฟเลตมีความยืดหยุ่นในการปรับรายละเอียดในโดเมนเวลาและความถี่ อีกทั้งยังมีความสามารถในการตรวจจับสัญญาณชั่วครู่ได้ดี โดยชนิดของเวฟเลตที่นิยมใช้ในการตรวจจับสัญญาณความเสียหาย คือ มอร์เลต์เวฟเลต (Morlet wavelet) เนื่องจากมีลักษณะที่คล้ายกับอิมพัลส์ซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการตรวจจับ [3, 8, 9] แต่ว่าการใช้งานเวฟเลตดังกล่าวจำเป็นต้องมีการเลือกพารามิเตอร์ของเวฟเลต คือความถี่กึ่งกลาง(center frequency) และความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการตรวจจับที่ถูกต้อง เพื่อที่จะได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังกล่าว จึงจำเป็นต้องมีตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสมของพารามิเตอร์ของเวฟเลต โดยตัวบ่งชี้ที่นิยมใช้กันคือ แชนนอนเอน-โทรปี (Shannon entropy) [3, 8] และเคอร์โทซิส (kurtosis) [9] ของเอ็นวีลอปที่ได้จากการกรองสัญญาณด้วย

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

มอร์เลต์เวฟเลต แต่ตัวบ่งชี้ทั้งสองตัวนี้ไม่ได้พิจารณาถึงลักษณะของฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัมซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับชุดของอิมพัลส์ที่เกิดจากความเสียหายแบบเฉพาะที่ ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอตัวบ่งชี้สำหรับปรับพารามิเตอร์ของตัวกรองมอร์เลต์เวฟเลต โดยตัวบ่งชี้ดังกล่าวจะนำเอาลักษณะของฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัมมาใช้ในการพิจารณาเลือกชุดพารามิเตอร์ของเวฟเลตที่เหมาะสมที่สุด

II. ทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณ

2.1 การแปลงเวฟเลต

เวฟเลตสามารถถูกสร้างได้จากฟังก์ชัน “เวฟเลตแม่” $\psi(t)$ โดยการเลื่อนตำแหน่งและการปรับสเกล [10]

$$\psi_{(a,\tau)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \tag{1}$$

เมื่อ a และ τ คือสเกลและการเลื่อนตำแหน่งตามลำดับ การแปลงเวฟเลตของสัญญาณที่มีพลังงานจำกัด $x(t)$ คือการทำคอนโวลูชันระหว่าง $x(t)$ และสังยุคของสมการ (1) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เวฟเลตลูก”

$$WT(a,\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right)dt \tag{2}$$

เมื่อ $\psi^*(t)$ คือสังยุคของ $\psi(t)$ เนื่องหลักการที่สำคัญในการตรวจจับความเสียหายในตลับลูกปืนคือการดึงเอาลักษณะที่คล้ายกับอิมพัลส์ในสัญญาณออกมาพิจารณา ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้มอร์เลต์เวฟเลตเนื่องจากมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของอิมพัลส์ทางกลมากกว่าเวฟเลตแม่ชนิดอื่นๆ [11] โดยนิยามของมอร์เลต์เวฟเลตคือฟังก์ชันไซนูซอยดัลที่มีซองเป็นฟังก์ชันเกาส์ [9]

$$\psi(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}}e^{-\sigma^2 t^2}e^{i2\pi f_0 t} \tag{3}$$

เมื่อ σ และ f_0 คือตัวประกอบรูปทรง (shape factor) และความถี่กึ่งกลางของตัวกรองเวฟเลตตามลำดับ โดยสามารถเขียนฟูริเยร์สเปกตรัมของสมการ (3) ได้ดังนี้

$$\Psi(f) = e^{-\left(\pi^2/\sigma^2\right)(f-f_0)^2} \tag{4}$$

และเนื่องจากการแปลงเวฟเลตสามารถเขียนได้ในรูปของการแปลงฟูริเยร์ [10] ดังนั้นสมการ (2) จึงสามารถเขียนได้บนโดเมนความถี่ ดังนี้

$$WT(a,\tau) = \sqrt{a}\cdot IFT\left\{X(f)\Psi^*(af)\right\} \tag{5}$$

เมื่อ $X(f)$ และ $\Psi(f)$ คือฟูริเยร์สเปกตรัมของ $x(t)$ และ $\psi(t)$ ตามลำดับ และ IFT คือการแปลงกลับฟูริเยร์ สมการ (5) บ่งบอกว่าการแปลงเวฟเลตสามารถพิจารณาได้เป็นการกรองสัญญาณ โดยที่ $\psi(t)$ ประพฤติตัวเป็นตัวกรองที่มีความถี่กึ่งกลาง f_0 และถูกกำหนดความกว้างของแถบความถี่ผ่านด้วย σ และเนื่องจากความกว้างของแถบความถี่ผ่านสามารถนิยามได้หลากหลาย ในบทความนี้จึงนิยามความกว้างของแถบความถี่ผ่านช่วงกว้างในโดเมนความถี่ที่พลังงานของตัวกรองมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่ความถี่กึ่งกลาง ดังนั้นจากสมการ (4) จึงสามารถนิยามความกว้างของแถบความถี่ผ่าน β ในรูปของ σ ได้เป็น

$$\beta = \frac{\sqrt{2\ln 2}}{\pi}\sigma \tag{6}$$

โดยค่า β ในสมการ (6) จะทำให้สเปกตรัมพลังงานที่ $\left\{f_0-\beta/2, f_0+\beta/2\right\}$ มีพลังงานเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่ความถี่ f_0 ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) เมื่อแทนค่าในสมการ (6) ลงไป จะสามารถเขียนสมการ (4) ได้ใหม่เป็น

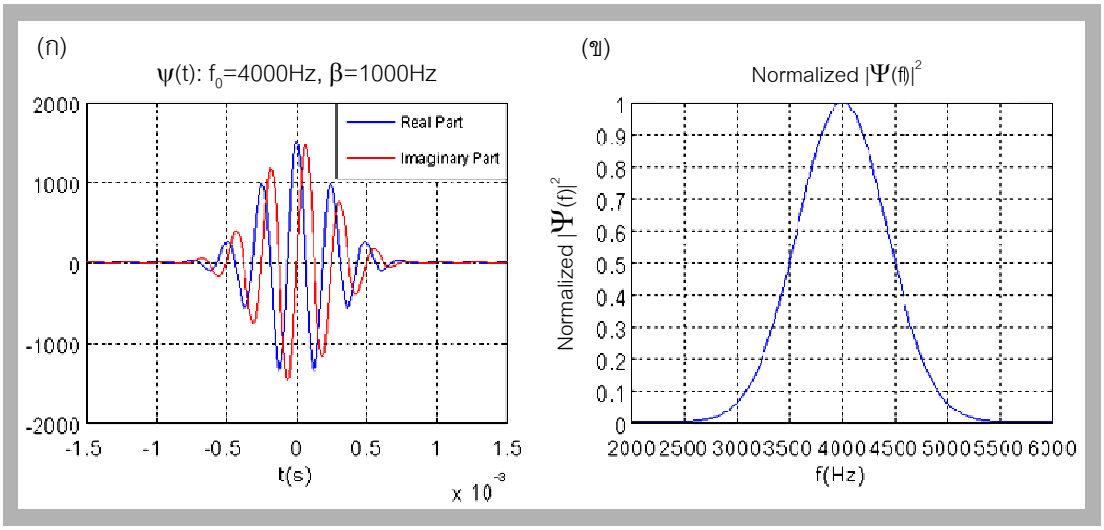
doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

$$\Psi(f) = e^{-\left(2\ln 2/\beta^2\right)(f-f_0)^2} \tag{7}$$

ดังนั้นจึงสามารถกรองสัญญาณด้วยมอร์เลต์เวฟเลตที่มีความถี่กึ่งกลาง f_0 และมีความกว้างของแถบความถี่ผ่าน β ได้โดยอาศัยสมการ (5) และ (7) ซึ่งสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$WT(f_0,\beta) = IFT\left\{X(f)\Psi^*(f)\right\} \tag{8}$$

จากสมการ (8) จะเห็นได้ว่าสามารถแปลงสัญญาณด้วยการแปลงกลับฟูริเยร์อย่างเร็ว (inverse fast Fourier transform: IFFT) ได้ ตัวอย่างของมอร์เลต์เวฟเลตทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1(ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 1 ตัวอย่างมอร์เลต์เวฟเลต (f_0 = 4000Hz, β = 1000Hz): (ก) โดเมนเวลา (ส่วนจริงและส่วนจินตภาพ), (ข) โดเมนความถี่ (สเปกตรัมพลังงานที่ถูกนอร์มัลไลซ์แล้ว)

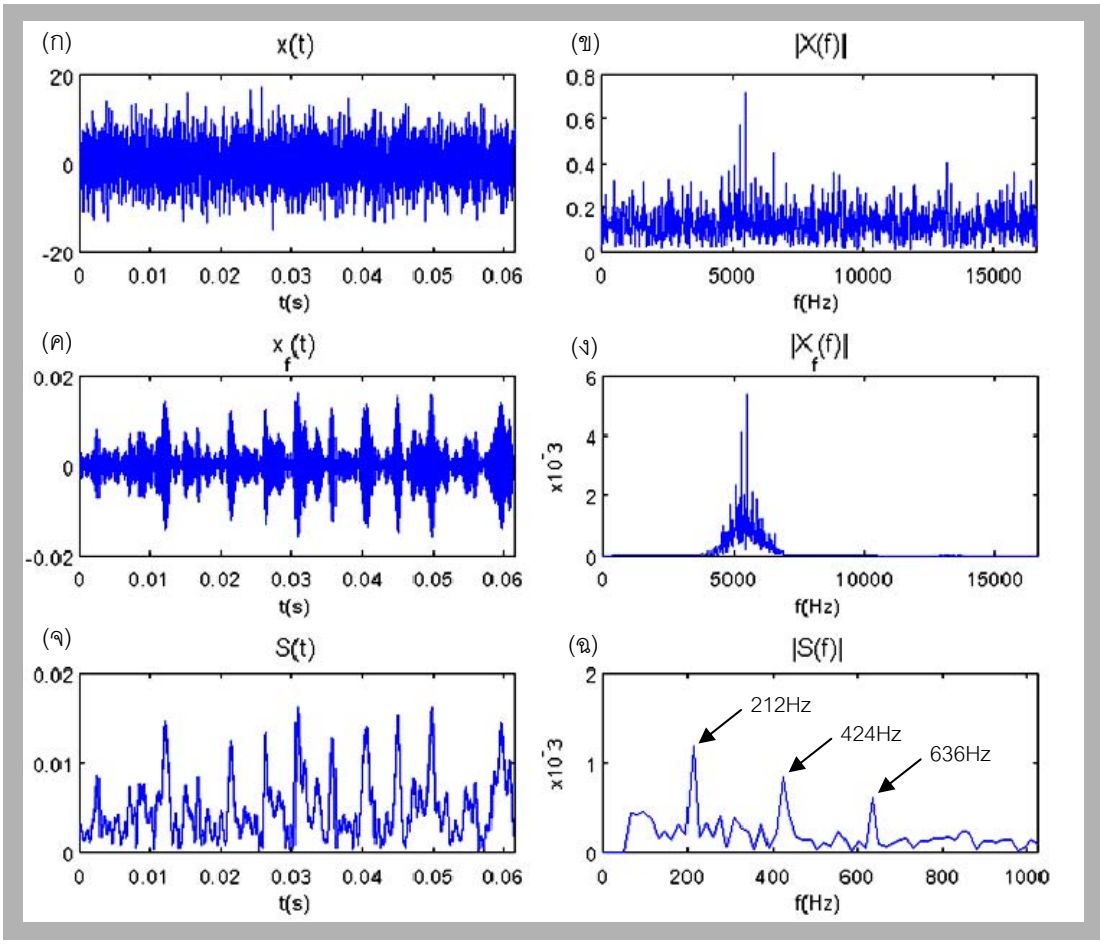
2.2 การวิเคราะห์เอ็นวีลอป

เนื่องจากสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนสามารถมองได้เป็นชุดของสัญญาณไซนูซอยดัลที่ความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีการลดลงแบบเอกโปเนนเชียล การวิเคราะห์เอ็นวีลอปสามารถดึงเอาความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายของตลับลูกปืนออกมาจากสัญญาณดังกล่าวได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้ เริ่มจากสัญญาณ $x(t)$ ในรูปที่ 2(ก) ซึ่งมีฟูริเยร์สเปกตรัม $X(f)$ แสดงในรูปที่ 2(ข) เมื่อกรองด้วยตัวกรองผ่านช่วงของสมการ (8) โดยความถี่กึ่งกลางของตัวกรองผ่านช่วงควรจะมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของระบบ จะได้สัญญาณที่ผ่านการกรอง $x_f(t)$ ดังรูปที่ 2(ค) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ผ่านการกรองมีลักษณะที่เป็นคาบที่สอดคล้องกับความเสียหายชัดเจนกว่าสัญญาณที่ไม่ได้ผ่านการกรอง สเปกตรัม $X_f(f)$ ในรูปที่ 2(ง) แสดงส่วนของสัญญาณที่ผ่านการกรองในโดเมนความถี่ จากนั้นจึงสร้างเอ็นวีลอปหรือซองของสัญญาณดังกล่าว ในกรณีของการกรองสัญญาณด้วยมอร์เลต์เวฟเลตสัญญาณที่ผ่านการกรองจะเป็นสัญญาณวิเคราะห์ (analytical signal) ที่มีทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ โดยทั้งสองส่วนจะมีเฟสต่างกัน 90° ดังนั้นจึงสามารถสร้างเอ็นวีลอป $S(t)$ ของสัญญาณดังกล่าวได้การหามอดูลัสของสัญญาณดังกล่าว [9]

$$S(t) = \sqrt{\left[\mathrm{Re}\left(WT(f_0,\beta)\right)\right]^2 + \left[\mathrm{Im}\left(WT(f_0,\beta)\right)\right]^2} \tag{9}$$

หลังจากนั้นจึงแปลงฟูริเยร์เอ็นวีลอปที่ได้ในสมการ (9) ที่แสดงในรูปที่ 2(จ) จะได้เอ็นวีลอปสเปกตรัม $S(f)$ โดยถ้าตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย จะปรากฏยอดที่เป็นความถี่เฉพาะของความเสียหายนั้นในเอ็นวีลอป-สเปกตรัม หรืออาจจะเกิดยอดที่เป็นฮาร์มอนิกของยอดดังกล่าวร่วมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2(ฉ)

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17



รูปที่ 2
การวิเคราะห์เอ็นวีลอป:
(ก) สัญญาณ x(t)
(ข) สเปกตรัม |X(f)|
(ค) สัญญาณ $x_f(t)$
(ง) สเปกตรัม $|X_f(f)|$
(จ) เอ็นวีลอป S(t)
(ฉ) เอ็นวีลอปสเปกตรัม |S(f)|

จะพบยอดที่ความถี่ 212Hz และฮาร์มอนิก ในเอ็นวีลอป-สเปกตรัมซึ่งเป็นความถี่เฉพาะของความเสียหาย

III. แบบจำลองสัญญาณความความเสียหายของตลับลูกปืน

ในกรณีที่ตลับลูกปืนอยู่ในสภาพดี ชิ้นส่วนต่างๆมีพื้นผิวที่เรียบมาก และมีความคลาดเคลื่อนทางมิติที่น้อย จะไม่เกิดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เป็นความถี่ใดๆสูงผิดปรกติ โดยส่วนมากจะเกิดเป็นความถี่แบบสุ่มที่มีขนาดในแต่ละความถี่น้อย อาจจะถูกกระตุ้นมีค่ามากขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติต่างๆของระบบ แต่จะไม่มีลักษณะที่เป็นยอดแหลมหรือเป็นแถบความถี่ข้างในโดเมนความถี่ที่ชัดเจน

ในกรณีที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นยังมีขนาดเล็ก สัญญาณในช่วงความถี่สูงจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากมีอิมพัลส์จากการกระแทก โดยสัญญาณความเสียหายจะยกตัวขึ้นมาเหนือพื้นของสัญญาณรบกวนแบบสุ่มและมีลักษณะที่เป็นแถบความถี่ข้างที่มีระยะห่างสอดคล้องกับความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายที่เกิดขึ้นของตลับลูกปืน แต่จะไม่สามารถตรวจจับลักษณะที่เกิดขึ้นได้ในช่วงความถี่ต่ำซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่นิยมใช้กันในการตรวจจับความเสียหายของเครื่องจักรทั่วๆไปในอุตสาหกรรม

การตรวจจับความถี่ของความเสียหายที่เกิดขึ้นแบบเฉพาะที่ที่เป็นจุดเดียวที่รางวิ่งนอก เม็ดลูกปืน และรางวิ่งในของตลับลูกปืนสามารถทำได้ดังแสดงในส่วนต่อๆไปของบทความ ส่วนการตรวจจับหลายๆความถี่หรือความถี่ที่อยู่ชิดกันอันเกิดมาจากตลับลูกปืนเกิดความเสียหายที่หลายส่วนอาจจะมีปัญหาได้ แต่ในทางปฏิบัติตลับลูกปืนจะต้องถูกเปลี่ยนทั้งอันแม้ว่าเกิดความเสียหายที่จุดเดียว ดังนั้นเป้าหมายหลักของการบทความนี้คือการตรวจจับความถี่ลักษณะเฉพาะที่แสดงถึงความเสียหายของตลับลูกปืน เพียงความถี่ใดความถี่หนึ่ง

เมื่อชิ้นส่วนที่เป็นคู่สัมผัสเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เกิดความเสียหายจะเกิดอิมพัลส์เกิดขึ้นทำให้เกิดการกระตุ้นในช่วงความถี่ที่กว้างแก่ระบบตลับลูกปืนและโครงสร้างที่รองรับ ดังนั้นความถี่ธรรมชาติของระบบดังกล่าวย่อม

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

ถูกกระตุ้นด้วย ทำให้เกิดการสั่นพ้องที่ความถี่ธรรมชาติซึ่งจะเห็นได้จากยอดในฟูริเยร์สเปกตรัมที่ยกตัวสูงขึ้น ในกรณีที่เกิดความเสียหายที่รางวิ่งนอกของตลับลูกปืน ทางเดินของสัญญาณการสั่นสะเทือนจากจุดที่เกิดความเสียหายมายังหัววัดการสั่นสะเทือนคงที่ ทำให้สามารถจำลองสัญญาณการเกิดอิมพัลส์ที่เป็นคาบได้ โดยใช้แบบจำลองที่มี 1 ความถี่ธรรมชาติ ดังนี้ [12]

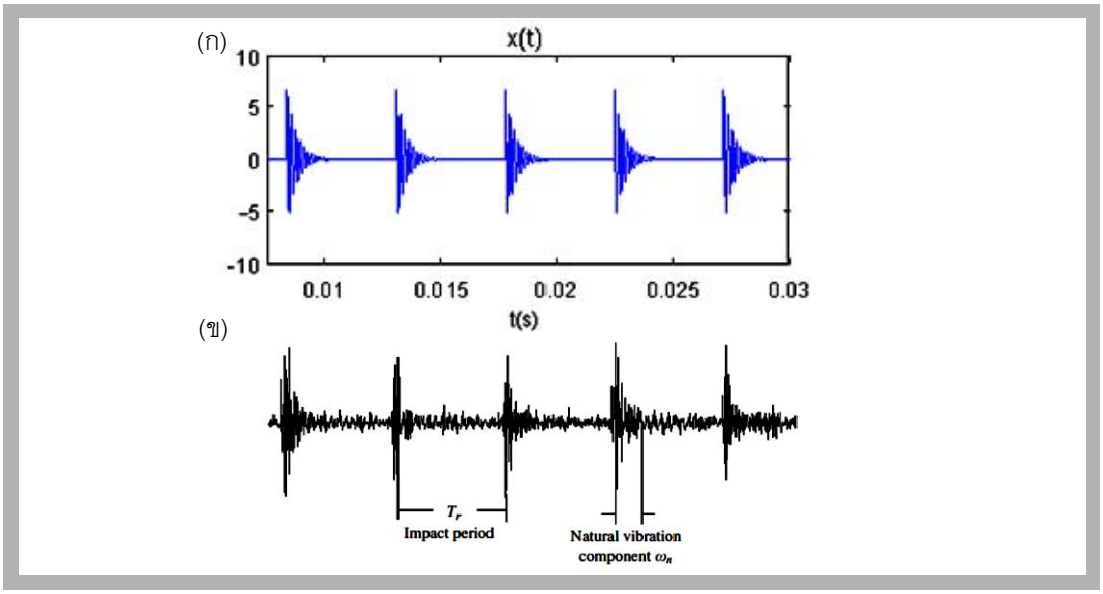
$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k h\left(t - kT_r\right) + n(t) \tag{10}$$

เมื่อ A_k คือระดับความรุนแรงของการเกิดอิมพัลส์ลูกที่ k, n(t) คือสัญญาณรบกวน และ $h(t-kT_r)$ คือฟังก์ชันผลการตอบสนองอิมพัลส์ของระบบการสั่นสะเทือนเชิงเส้นอันดับสองที่มีค่าอัตราส่วนการหน่วงต่ำกว่า 1 ที่มีคาบของการกระตุ้นซ้ำ T_r ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายของตลับลูกปืน โดยสามารถเขียนฟังก์ชันการตอบสนองต่ออิมพัลส์ h(t) ได้ ดังนี้

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\left(\frac{\xi\omega_d}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)t} \sin\omega_d t \tag{11}$$

เมื่อ m, ξ และ ω_d คือมวลของระบบ, อัตราส่วนการหน่วง และความถี่ธรรมชาติที่มีความหน่วงตามลำดับ โดยในรูปที่ 3(ก) และ (ข) แสดงสัญญาณที่ได้จากแบบจำลอง และสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงที่รางวิ่งนอกของตลับลูกปืน [12] ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งสองรูปมีลักษณะของอิมพัลส์ที่คล้ายกัน

ในกรณีที่ความเสียหายเกิดขึ้นที่รางวิ่งในหรือที่เม็ดลูกปืน ความรุนแรงของอิมพัลส์ (A_k) แต่ละลูกที่ตรวจวัดได้ตามสมการ (10) จะไม่คงที่เนื่องจากเส้นทางเดินของสัญญาณการสั่นสะเทือนและภาระที่กระทำต่อส่วนที่เกิดความเสียหายจะมีค่าที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งเชิงมุมของจุดที่เกิดความเสียหาย ทำให้แบบจำลองของสัญญาณมีความซับซ้อนและยังไม่มีสมการที่แสดงพฤติกรรมดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ จึงยังไม่ได้ศึกษาในกรณีดังกล่าว แต่ถ้าพิจารณาไปถึงการกระแทกกันของชิ้นส่วนต่างๆของตลับลูกปืน จะพบว่าสมการ (11) ยังคงใช้ได้กับทุกๆความเสียหาย เนื่องจากเมื่อชิ้นส่วนอื่นที่สัมผัสกับพื้นผิวที่เกิดความเสียหายเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เกิดความเสียหายจะเกิดอิมพัลส์ขึ้น เพียงแต่ว่าขนาดของพัลส์แต่ละลูกจะไม่เท่ากัน แต่ความถี่ของการเกิดพัลส์แต่ละลูกยังคงสอดคล้องกับความถี่ของความเสียหายที่บริเวณนั้นๆเช่นเดิม ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงใช้แบบจำลองในสมการ (10) และ (11) ในการศึกษา เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่เสมือนจริง โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดความเสียหายที่รางวิ่งนอก



รูปที่ 3
เปรียบเทียบสัญญาณจากแบบจำลองและสัญญาณความเสียหายจริง:
(ก) สัญญาณจากแบบจำลอง
(ข) สัญญาณความเสียหายที่รางวิ่งนอก [12]

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

IV. ตัวบ่งชี้สำหรับการปรับตัวกรองมอร์เลต์เวฟเลต

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าในการที่จะได้ผลการตรวจจับความเสียหายที่ถูกต้องนั้นจำเป็นต้องปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองให้เหมาะสม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวบ่งชี้ว่าชุดของพารามิเตอร์ของตัวกรองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมเพียงใด โดยทั่วไปสำหรับการทำเอ็นวีลอปสเปกตรัมโดยใช้มอร์เลต์เวฟเลตมักนิยมใช้เคอร์โทซิสและแชนนอนเอนโทรปีของเอ็นวีลอปของสัญญาณที่ผ่านการกรอง S(t) เป็นตัวบ่งชี้ โดยเคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้ที่พิจารณาถึงความเป็นยอดแหลมของสัญญาณที่กำลังพิจารณา [9] โดยสามารถนิยามได้ ดังนี้

$$\mathrm{kurt}\left(f_0,\beta\right)=\frac{\frac{1}{N}\sum_i\left(S_i(t)_{f_0,\beta}-\bar{S}(t)_{f_0,\beta}\right)^4}{\frac{1}{N}\sum_i\left(S_i(t)_{f_0,\beta}-\bar{S}(t)^2_{f_0,\beta}\right)^2} \tag{12}$$

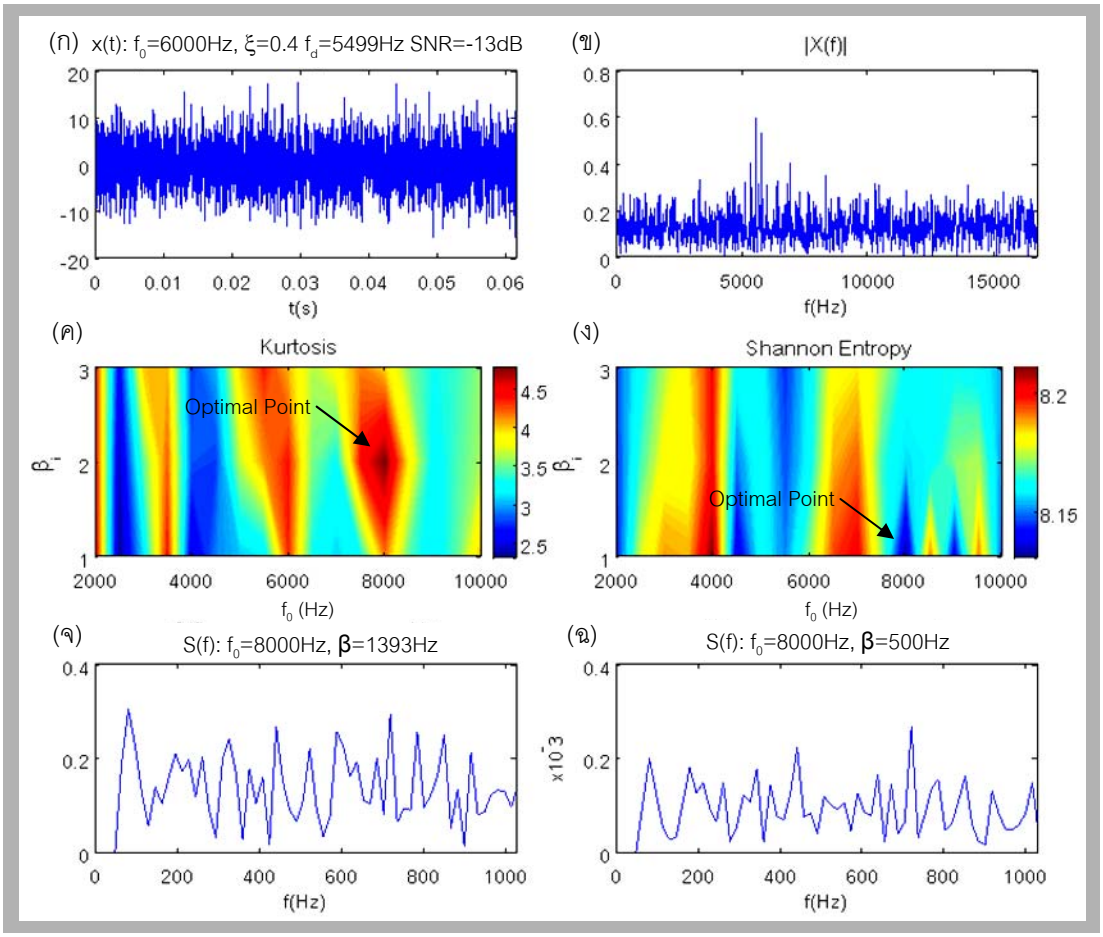
เมื่อ $S_i(t)_{f_0,\beta}$ และ $\bar{S}(t)_{f_0,\beta}$ คือจุดข้อมูลตัวที่ i และค่าเฉลี่ยของเอ็นวีลอปของสัญญาณที่ผ่านการกรองที่ได้จากตัวกรองที่มีพารามิเตอร์ f_0,β ตามลำดับ โดยค่าเคอร์โทซิสที่สูงบ่งบอกถึงสัญญาณดังกล่าวมีลักษณะเป็นยอดแหลมมาก จึงมีผู้เสนอให้ใช้ชุดของ f_0,β ที่ให้ค่าเคอร์โทซิสของเอ็นวีลอปสูงสุดเป็นจุดที่มีพารามิเตอร์ของตัวกรองเหมาะสมที่สุด ด้วยเหตุผลที่ว่าความเป็นยอดแหลมที่เกิดขึ้นในเอ็นวีลอปควรจะมีที่มาจากการเกิดอิมพัลส์ แต่จะพบว่าในหลายกรณีสัญญาณรบกวนแบบสุ่มก็ให้ยอดแหลมในเอ็นวีลอปเช่นกัน ดังนั้นจุด f_0 ที่ให้ค่าเคอร์โทซิสสูงสุดอาจจะไม่ใช่จุดที่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติของระบบซึ่งเป็นจุดที่พบแถบความถี่ข้าง (sideband) ที่ชัดเจน ซึ่งแถบความถี่ข้างดังกล่าวเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดยอดในเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ใช้ในการตรวจจับความเสียหาย

แชนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ที่พิจารณาจำนวนของจุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ของสัญญาณ โดยสามารถนิยามได้ในรูปของการกระจายตัวของความน่าจะเป็น [8, 10]

$$\mathrm{SE}\left(f_0,\beta\right)=-\sum_i\hat{S}_i(t)_{f_0,\beta}\cdot\log\left(\hat{S}_i(t)_{f_0,\beta}\right) \tag{13}$$

เมื่อ $\hat{S}_i(t)_{f_0,\beta}=S_i(t)_{f_0,\beta}/\sum_i S_i(t)_{f_0,\beta}$ โดยค่าแชนนอนเอนโทรปีที่น้อยหมายถึงจุดข้อมูลจำนวนน้อยจุดเก็บค่าข้อมูลส่วนใหญ่ของสัญญาณไว้ ดังนั้นจึงมีการเสนอว่าควรจะใช้ชุดของ f_0,β ที่ให้ค่าแชนนอนเอนโทรปีของเอ็นวีลอปต่ำที่สุด เนื่องจากเอ็นวีลอปดังกล่าวน่าจะแสดงลักษณะของอิมพัลส์ได้ชัดเจน ในลักษณะคล้ายกับที่ได้กล่าวถึงในกรณีของเคอร์โทซิส แต่อย่างไรก็ตามแชนนอนเอนโทรปีไม่ได้พิจารณาถึงฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัมซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเสียหายของตลับลูกปืน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จุดที่ค่าแชนนอนเอนโทรปีต่ำที่สุดอาจจะไม่ใช่จุดที่เหมาะสมในการดึงเอาลักษณะความเสียหายของตลับลูกปืนออกมาก็ได้ ในรูปที่ 4 จะแสดงตัวอย่างของเอ็นวีลอปสเปกตรัมของสัญญาณความเสียหายในกรณีที่เคอร์โทซิสมีค่าสูงสุด และแชนนอนเอนโทรปีมีค่าต่ำที่สุด แต่ว่าเอ็นวีลอปที่ได้ไม่สามารถแสดงถึงความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายได้ โดยเมื่อพิจารณาฟูริเยร์สเปกตรัมในรูปที่ 4(ข) ของสัญญาณความเสียหายในรูปที่ 4(ก) จะพบว่าจะมีลักษณะของแถบความถี่ข้างอยู่ใกล้กับช่วงความถี่ธรรมชาติของระบบ (f_d) แต่ไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากมีระดับของสัญญาณรบกวนที่ค่อนข้างสูง ในรูปที่ 4(ค) และ (ง) แสดงค่าเคอร์โทซิสและแชนนอนเอนโทรปีของเอ็นวีลอปที่ได้จากสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยเวฟเลตที่มีพารามิเตอร์ f_0,β ต่างๆกัน จะเห็นได้ว่าค่า f_0 ที่ให้เคอร์โทซิสสูงที่สุดและแชนนอนเอนโทรปีต่ำที่สุดไม่ตรงกับ f_d ของสัญญาณความเสียหายซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่แถบความถี่ข้างซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะของความเสียหายยกตัวขึ้นมาจากพื้นของสัญญาณรบกวนชัดเจนมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4(ข) ทำให้เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ได้จากการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลตที่มีพารามิเตอร์ f_0,β ดังกล่าวไม่แสดงความถี่ที่สอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นในกรณีที่ใช้เคอร์โทซิสหรือแชนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ ดังแสดงในรูปที่ 4(จ) และ (ฉ) ตามลำดับ

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17



รูปที่ 4
ตัวอย่างการใช้เคอร์โทซิสและแชนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้โดยมีความถี่ลักษณะเฉพาะที่ 212Hz:
(ก) สัญญาณความเสียหาย
(ข) ฟูริเยร์สเปกตรัม
(ค) เคอร์โทซิสที่ f_0,β ต่างๆ
(ง) แชนนอนเอนโทรปีที่ f_0,β ต่างๆ
(จ) เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่สอดคล้องกับจุดที่เคอร์โทซิสมีค่าสูงที่สุด
(ฉ) เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่สอดคล้องกับจุดที่แชนนอนเอนโทรปีมีค่าต่ำที่สุด

ไม่พบความถี่ลักษณะเฉพาะในเอ็นวีลอปสเปกตรัมดังกล่าว

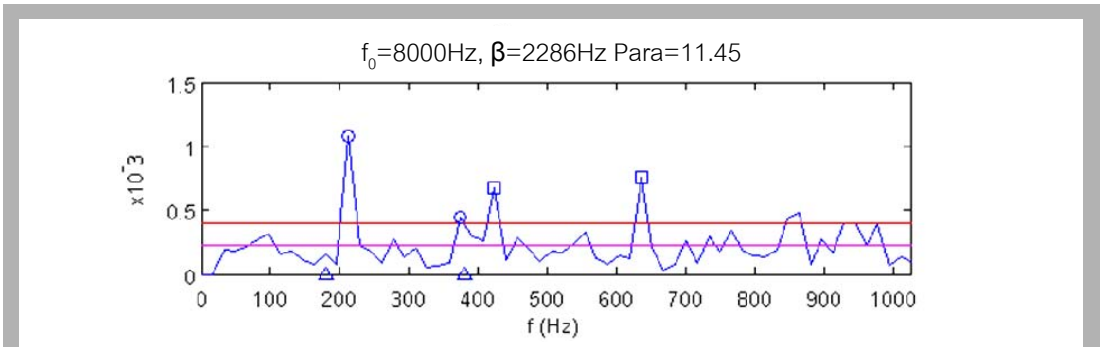
ด้วยเหตุดังกล่าว บทความนี้จึงนำเสนอตัวบ่งชี้ที่พิจารณาถึงความเด่นชัดของความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายและฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัม โดยหลักการในภาพรวมของตัวบ่งชี้นี้คือการหาชุดของ f_0,β ที่ให้อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของผลรวมของยอดสเปกตรัมในช่วงความถี่ระหว่าง ball spin frequency (BSF) ball pass inner race (BPIR) และฮาร์มอนิกของความถี่เหล่านั้น ต่อค่าเฉลี่ยของเอ็นวีลอปสเปกตรัมในช่วงที่กำหนด ดังแสดงในสมการ (14)

$$Ind(f_0,\beta)=\max\left(\frac{\sum_i HF_i^j(f_0,\beta)}{\overline{S(f)}(f_0,\beta)}\right) \quad (14)$$

เมื่อ Ind คือตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ HF_i^j คือฮาร์มอนิกที่ i-1 ของตระกูลความถี่ที่ j ที่พบในเอ็นวีลอปสเปกตรัม และ $\overline{S(f)}$ คือค่าเฉลี่ยของเอ็นวีลอปสเปกตรัมในช่วงความถี่ที่กำหนด โดยมีรายละเอียดของวิธีการดังต่อไปนี้

1. เมื่อได้เอ็นวีลอปสเปกตรัมจากพารามิเตอร์ f_0,β แล้ว จะสร้างเกณฑ์ในการพิจารณายอดสเปกตรัม โดยจะคำนวณค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานในส่วนความถี่ต่ำของเอ็นวีลอปสเปกตรัม เนื่องจากที่ความถี่สูงขึ้นไปเอ็นวีลอปสเปกตรัมจะมีค่าลดลงซึ่งในการศึกษานี้จะพิจารณาในช่วง 0 ถึง 1024Hz ค่าของเกณฑ์จะถูกสร้างจากค่าทั้งสอง โดยในการศึกษานี้จะกำหนดให้เกณฑ์มีค่าเท่ากับผลรวมของค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยค่ายอดที่สูงกว่าเกณฑ์ดังกล่าวจะถูกเก็บไว้พิจารณาต่อไป โดยในรูปที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเกณฑ์ของเอ็นวีลอปสเปกตรัมด้วยเส้นสีบานเย็นและเส้นสีแดงตามลำดับ
2. หลังจากระบุยอดที่มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว ต่อมาจะพิจารณายอดที่พบในช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง BSF และ BPIR บวกค่าความเผื่ออีก 5% ดังแสดงด้วยเครื่องหมายสามเหลี่ยมบนแกนนอน จะได้ความถี่ที่พื้นฐานที่ถูกวงด้วยวงกลมในรูปที่ 5

3. หลังจากได้ความถี่พื้นฐานแล้วจะหาฮาร์มอนิกของความถี่พื้นฐานดังกล่าว โดยฮาร์มอนิกจะถูกวางไว้ด้วยสี่เหลี่ยมในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้ค่าความเผื่อในการหาฮาร์มอนิกมีค่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างของหนึ่งเส้นสเปกตรัม จากนั้นหาอัตราส่วนระหว่างผลรวมของยอดในแต่ละตระกูลฮาร์มอนิกกับค่าเฉลี่ยของเอ็นวีลอปสเปกตรัม เลือกค่าที่มากที่สุดเป็นตัวบ่งชี้สำหรับชุดพารามิเตอร์ f_0,β ของตัวกรองนั้น ในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าตระกูลความถี่ 212Hz มีผลรวมมากกว่าตระกูลความถี่ 375Hz ที่ไม่มีฮาร์มอนิกทำให้ ค่าอัตราส่วนของตระกูล 212Hz มีค่ามากที่สุด จึงถูกเลือกเป็นตัวบ่งชี้ ซึ่งในที่นี้มีค่าเป็น 11.45
4. ปรับค่า f_0,β ของตัวกรองใหม่ ทำซ้ำข้อ 1 ถึง 3 แล้วเลือกพารามิเตอร์ f_0,β ที่ให้ค่าตัวบ่งชี้มากที่สุดเป็นชุดที่ใช้กรองสัญญาณเพื่อวิเคราะห์ความเสียหาย



รูปที่ 5
ตัวอย่างการคำนวณหาตัวบ่งชี้สำหรับปรับพารามิเตอร์ของเวฟเลต

โดยรูปที่ 6 เป็นผังลำดับขั้นตอนการคำนวณหาตัวบ่งชี้เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ f_0,β ที่เหมาะสมที่สุด

เนื่องจากขั้นตอนที่นำเสนอมาในข้างต้นประกอบไปด้วยการแปลงเวฟเลตเลตซึ่งสามารถถือว่าเป็นการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองผ่านช่วง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเงื่อนไขเพิ่มไขเพิ่มเติมในการเลือกค่า f_0,β ดังต่อไปนี้

1. เวฟเลตแม่ต้องมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์

$$\Psi(0)=\int_{-\infty}^{\infty}\psi(t)dt=0 \tag{15}$$

ในความเป็นจริงแล้วมอร์เลต์เวฟเลตไม่ได้มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ $f_0/\beta \geq 3.5$ ค่าเฉลี่ยจะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์มาก [9] ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้เงื่อนไข $f_0/\beta \geq 3.5$

2. ขอบด้านความถี่สูงของแถบความถี่ผ่านจะต้องมีค่าสอดคล้องกับทฤษฎีการชักตัวอย่างสัญญาณ

$$f_0+\frac{\beta}{2}<\frac{f_s}{2} \tag{16}$$

เมื่อ f_s คือความถี่ในการชักตัวอย่างสัญญาณ

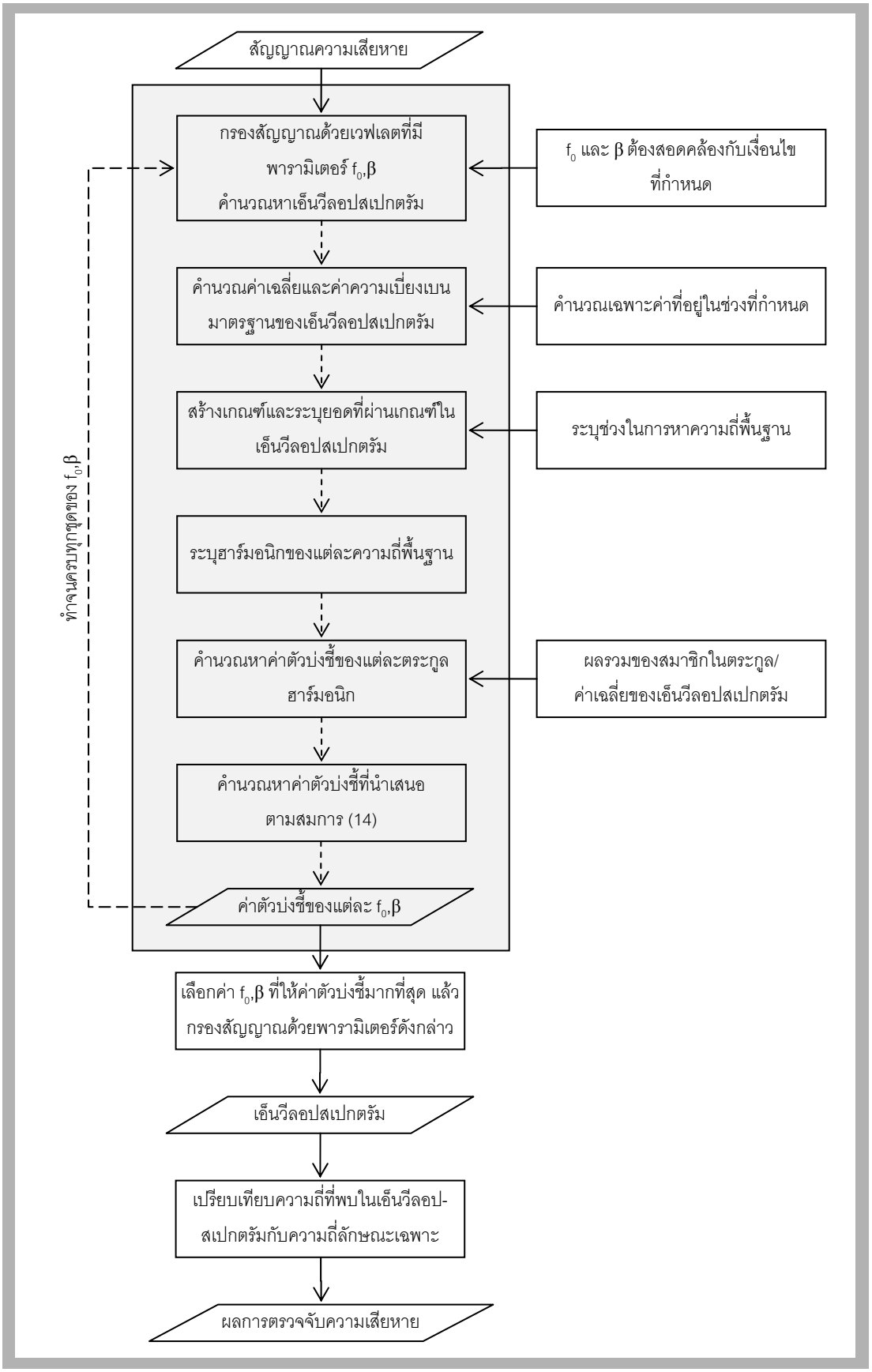
3. ขอบด้านความถี่ต่ำของแถบความถี่ผ่านควรจะมีค่าสูงพอที่จะไม่รวมเอาผลการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำเข้ามาด้วย

$$f_0-\frac{\beta}{2}>N\times f_r \tag{17}$$

เมื่อ f_r คือความถี่ในการหมุนของเพลา และ N คือจำนวนเต็ม ในการศึกษานี้กำหนดให้ N=20

4. ความกว้างแถบความถี่ของตัวกรองควรจะกว้างพอที่จะครอบคลุมแถบความถี่ข้างที่เกิดขึ้นจากชุดของอิมพัลส์ ดังนั้นจึงเลือกความกว้างแถบความถี่เป็น $\beta \geq 500$Hz

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

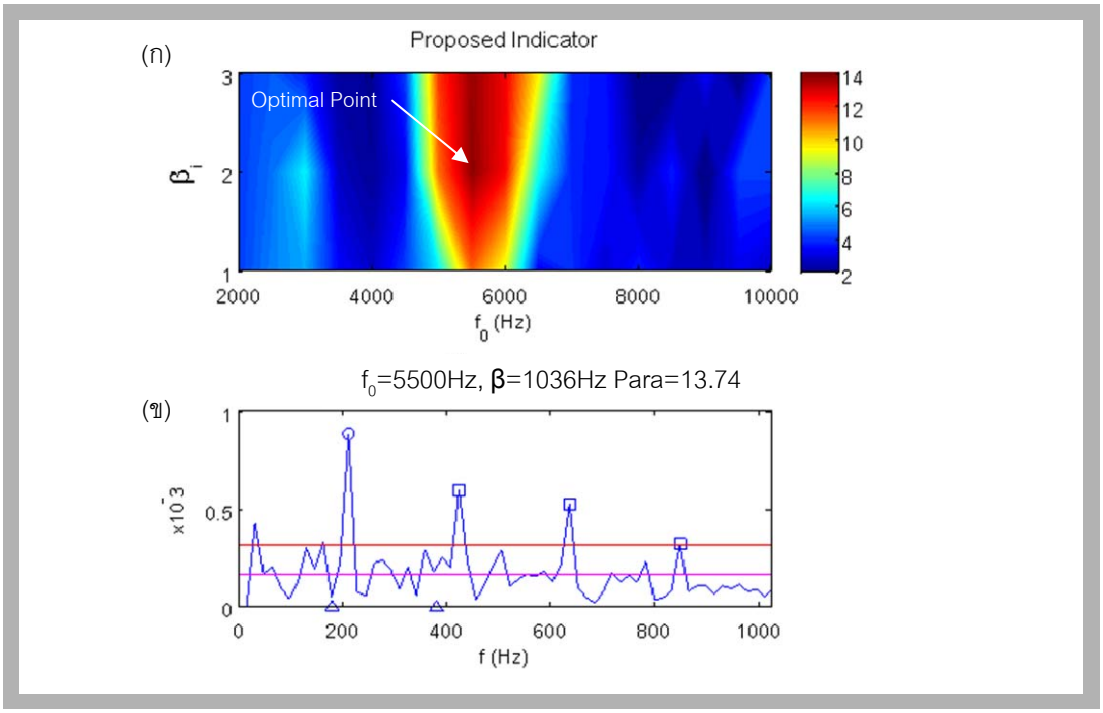


รูปที่ 6
ลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าตัวบ่งชี้สำหรับปรับพารามิเตอร์ของมอร์เลต์เวฟเลตในการตรวจจับความเสียหายของตลับลูกปืน

ในรูปที่ 7(ก) จะเป็นการแสดงค่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอของสัญญาณในรูปที่ 4(ก) ที่ค่า f_0,β ต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่า f_0 ที่ทำให้ตัวบ่งชี้มีค่าสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติแบบมีความหน่วงของระบบซึ่งจะพบแถบความถี่ข้างในฟูริเยร์สเปกตรัมดังรูปที่ 4(ข) และบริเวณความถี่ดังกล่าวเป็นบริเวณที่สัญญาณความเสียหายยกตัวขึ้นมาจากพื้นสัญญาณรบกวนมากที่สุด เมื่อนำค่า f_0,β ที่ให้ค่าตัวบ่งชี้มากที่สุดในรูปที่ 7(ก) มากรองสัญญาณ จะได้เอ็นวีลอปสเปกตรัมดังรูปที่ 7(ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพบความถี่ลักษณะเฉพาะและฮาร์มอนิกทำให้

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

สามารถตรวจจับความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ในขณะที่เคอร์โทซิสและแชนนอนเอนโทรปีไม่สามารถแสดงผลการตรวจจับที่ถูกต้องได้ ดังแสดงในรูปที่ 4(จ) และ (ฉ) ตามลำดับ



รูปที่ 7
ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอสำหรับการปรับพารามิเตอร์ของเวฟเลต:
(ก) ค่าของตัวบ่งชี้ที่นำเสนอที่ f_0,β ต่างๆ
(ข) เอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ได้จากการกรองสัญญาณด้วยมอร์เลต์เวฟเลตที่มีพารามิเตอร์ f_0,β ที่ให้ค่าตัวบ่งชี้สูงที่สุด จะเห็นได้ว่าจะพบความถี่ 212Hz ซึ่งเป็นความถี่ลักษณะเฉพาะและฮาร์มอนิกของความถี่ดังกล่าว

V. การประเมินความสามารถของตัวบ่งชี้ต่างๆ โดยการใช้แบบจำลองสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืน

หัวข้อนี้จะประเมินความสามารถในการตรวจจับความเสียหายด้วยการกรองสัญญาณโดยใช้เวฟเลตในกรณีที่มีเคอร์โทซิส แชนนอนเอนโทรปี หรือตัวบ่งชี้ที่นำเสนอเป็นตัวบ่งชี้ โดยจะใช้สัญญาณความเสียหายจากแบบจำลองในสมการ (10) และ (11) มาปรับขนาดให้มีค่า RMS เป็น 1 แล้วจึงนำมารวมกับสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (white noise) จำนวน 100 ชุดที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ค่า signal to noise ratio (SNR) (RMS ของสัญญาณ / RMS ของสัญญาณรบกวน) ต่างๆตามที่ต้องการ จากนั้นนำสัญญาณความเสียหายที่รวมกับสัญญาณรบกวนแล้วไปใช้ประเมินความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายของตัวบ่งชี้ต่างๆต่อไป โดยค่าของพารามิเตอร์ต่างๆในสมการ (10) และ (11) จะถูกปรับดังตารางที่ 1 โดยมีวัตถุประสงค์ของการปรับพารามิเตอร์ ดังนี้

1. ปรับ ξ เพื่อดูกระทบของอัตราส่วนการหน่วงของระบบที่มีต่อความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหาย
2. ปรับ f_n เพื่อดูกระทบของความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีต่อความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหาย
3. ปรับ SNR เพื่อดูกระทบของระดับของสัญญาณรบกวนที่มีต่อความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหาย

เมื่อได้เอ็นวีลอปสเปกตรัมจากการกรองสัญญาณด้วยมอร์เลต์เวฟเลตพารามิเตอร์ f_0,β ที่ตัวบ่งชี้แต่ละแบบเลือกมาให้แล้ว จะประเมินว่าเอ็นวีลอปสเปกตรัมเหล่านั้นแสดงถึงลักษณะความเสียหายหรือไม่ โดยแบ่งผลการตรวจจับออกเป็น 4 ประเภท ตามการพิจารณา f_0 ของตัวกรองและความถี่ที่พบในเอ็นวีลอปสเปกตรัม ดังนี้

1. เวฟเลตตัวที่ถูกเลือกมีความถี่กึ่งกลาง (f_0) มีค่าแตกต่างจากความถี่ธรรมชาติแบบมีการหน่วง (f_d) อยู่ไม่เกิน 250Hz (ครึ่งหนึ่งของขั้นการปรับความถี่กึ่งกลาง) และตระกูลของฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปที่ให้ผลรวมมีค่าสูงสุดมีค่าแตกต่างจากความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายที่จำลองขึ้น (212Hz) ไม่เกิน 8Hz (ครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างสเปกตรัมที่ติดกันในเอ็นวีลอปสเปกตรัม) ดังตัวอย่างในรูปที่ 7 (ข)

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

2. ตระกูลของฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปที่ให้ผลรวมมีค่าสูงสุดมีค่าแตกต่างจากความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายที่จำลองขึ้น (212Hz) ไม่เกิน 8Hz เช่นเดียวกับในกรณี 1 แต่ว่าเวฟเลตตัวที่ถูกเลือกมีความถี่กึ่งกลาง (f_0) แตกต่างจากความถี่ธรรมชาติแบบมีการหน่วง (f_d) มากกว่า 250Hz
3. เวฟเลตตัวที่ถูกเลือกมีความถี่กึ่งกลาง (f_0) มีค่าแตกต่างจากความถี่ธรรมชาติแบบมีการหน่วง (f_d) อยู่ไม่เกิน 250Hz แต่ตระกูลของฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปที่ให้ผลรวมมีค่าสูงสุดมีค่าแตกต่างจากความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายที่จำลองขึ้น (212Hz) มากกว่า 8Hz
4. เวฟเลตตัวที่ถูกเลือกมีความถี่กึ่งกลาง (f_0) มีค่าแตกต่างจากความถี่ธรรมชาติแบบมีการหน่วง (f_d) มากกว่า 250Hz และตระกูลของฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปที่ให้ผลรวมมีค่าสูงสุดมีค่าแตกต่างจากความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายที่จำลองขึ้น (212Hz) มากกว่า 8Hz

ตารางที่ 1
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการประเมินความสามารถของตัวบ่งชี้

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
ξ	0.2, 0.4, 0.6
$f_n = \left(\omega_d / \sqrt{1-\xi^2}\right)/2\pi$	4000, 6000, 8000, 10000Hz
A_k	1
T_r	4.717 ms (1/212Hz)
Sampling time	15μs
จำนวนจุดข้อมูล	4096
SNR	-10, -13, -15dB

f_0, β (Hz)

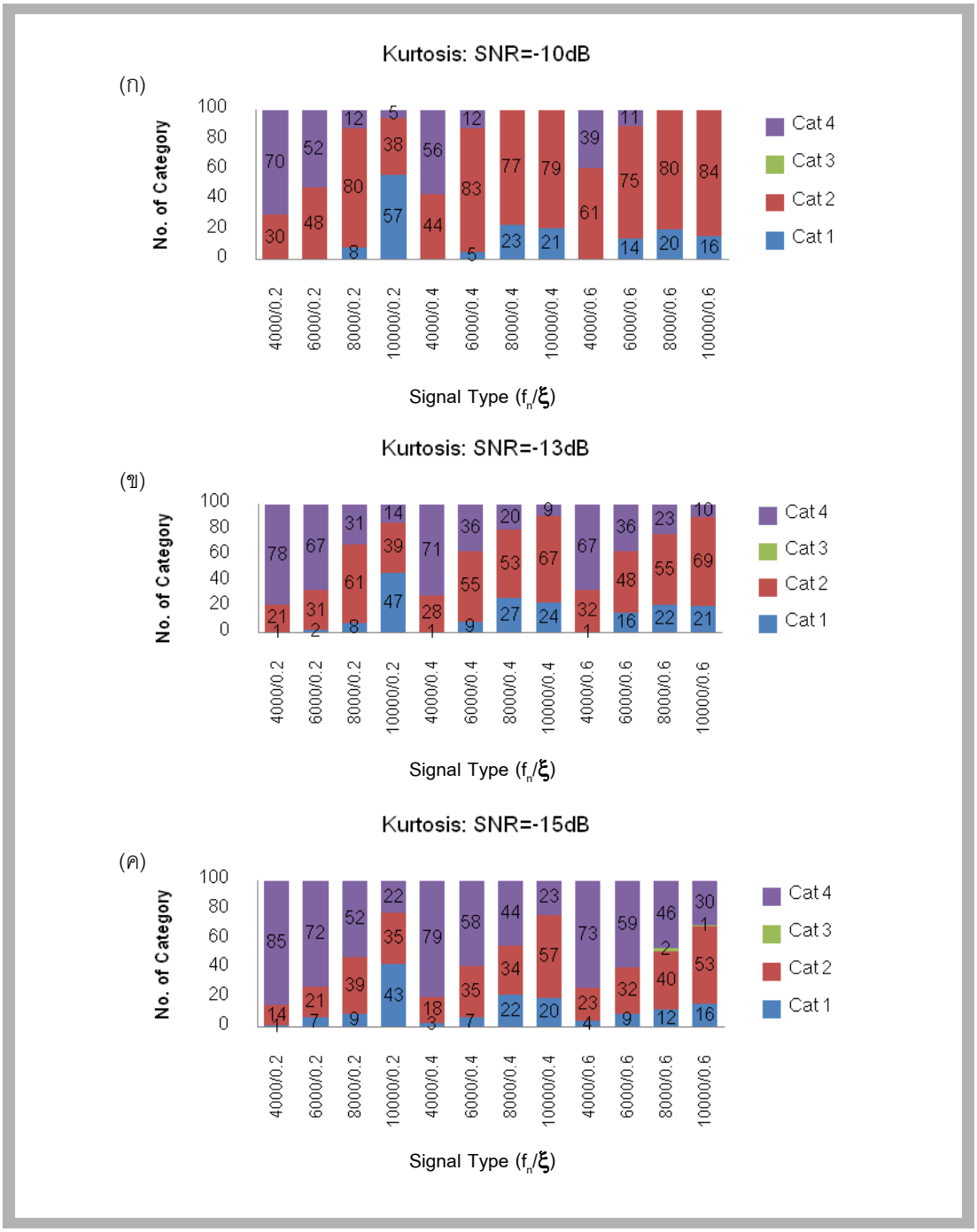
f_0	β_1	β_2	β_3	f_0	β_1	β_2	β_3	f_0	β_1	β_2	β_3
2000	500	536	571	5000	500	964	1429	8000	500	1393	2286
2500	500	607	714	5500	500	1036	1571	8500	500	1464	2429
3000	500	679	857	6000	500	1107	1714	9000	500	1536	2571
3500	500	750	1000	6500	500	1179	1857	9500	500	1607	2714
4000	500	821	1143	7000	500	1250	2000	10000	500	1679	2857
4500	500	893	1286	7500	500	1321	2143				

การตรวจจับกระทำโดยวิธีการระบุยอดในเอ็นวีลอปสเปกตรัมจะใช้วิธีการเดียวกับที่ใช้ในวิธีการหาตัวบ่งชี้ที่นำเสนอกับเอ็นวีลอปสเปกตรัมที่ได้จากการเลือกเมื่อใช้เคอร์โทซิสและแซนนอนเอนโทรปี จากผลการตรวจจับทั้ง 4 ประเภท จะเห็นได้ว่า จะพบความเสียหายเมื่อได้ผลการตรวจจับประเภทที่ 1 หรือ 2 ในขณะที่ไม่พบความเสียหายในกรณีที่ 3 หรือ 4 ผลของประเภทการตรวจจับของสัญญาณความเสียหายประเภทต่างๆที่ SNR ต่างๆกัน เมื่อใช้เคอร์โทซิส แซนนอนเอนโทรปี และตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ แสดงไว้ในรูปที่ 8 – 10 ตามลำดับ

ในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าในทุกๆ SNR ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนการหน่วงเท่ากัน เคอร์โทซิสจะมีความถูกต้องในการตรวจจับมากขึ้นเมื่อระบบมีความถี่ธรรมชาติ (f_n) เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความถี่ธรรมชาติเพิ่มขึ้น จุดที่เหมาะสมสำหรับเป็นความถี่กึ่งกลางของตัวกรอง (f_0) ควรจะมีค่าขยับสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากเงื่อนไขของเวฟเลต คือ $f_0/\beta \geq 3.5$ ดังนั้นจึงสามารถใช้ β ได้กว้างขึ้น ทำให้สามารถครอบคลุมแถบความถี่ข้างที่เกิดจากความเสียหายได้มากขึ้น ส่งผลให้เอ็นวีลอปที่ได้มีความเป็นยอดแหลมมากขึ้น จึงให้ค่าเคอร์โทซิสที่สูง ในขณะที่กรณีเมื่อความถี่ธรรมชาติมีค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการหน่วงจะไม่มีผลต่อการตรวจจับมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากแม้ว่าอัตราส่วนการหน่วงที่สูงจะให้แถบความถี่ข้างในฟูริเยร์สเปกตรัมมากกว่า แต่ในกรณีที่สัญญาณมีค่า RMS เท่ากัน ขนาดของยอดก็จะน้อยกว่าทำให้สัญญาณความเสียหายไม่สูงโดดเด่นขึ้นมาจาก

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

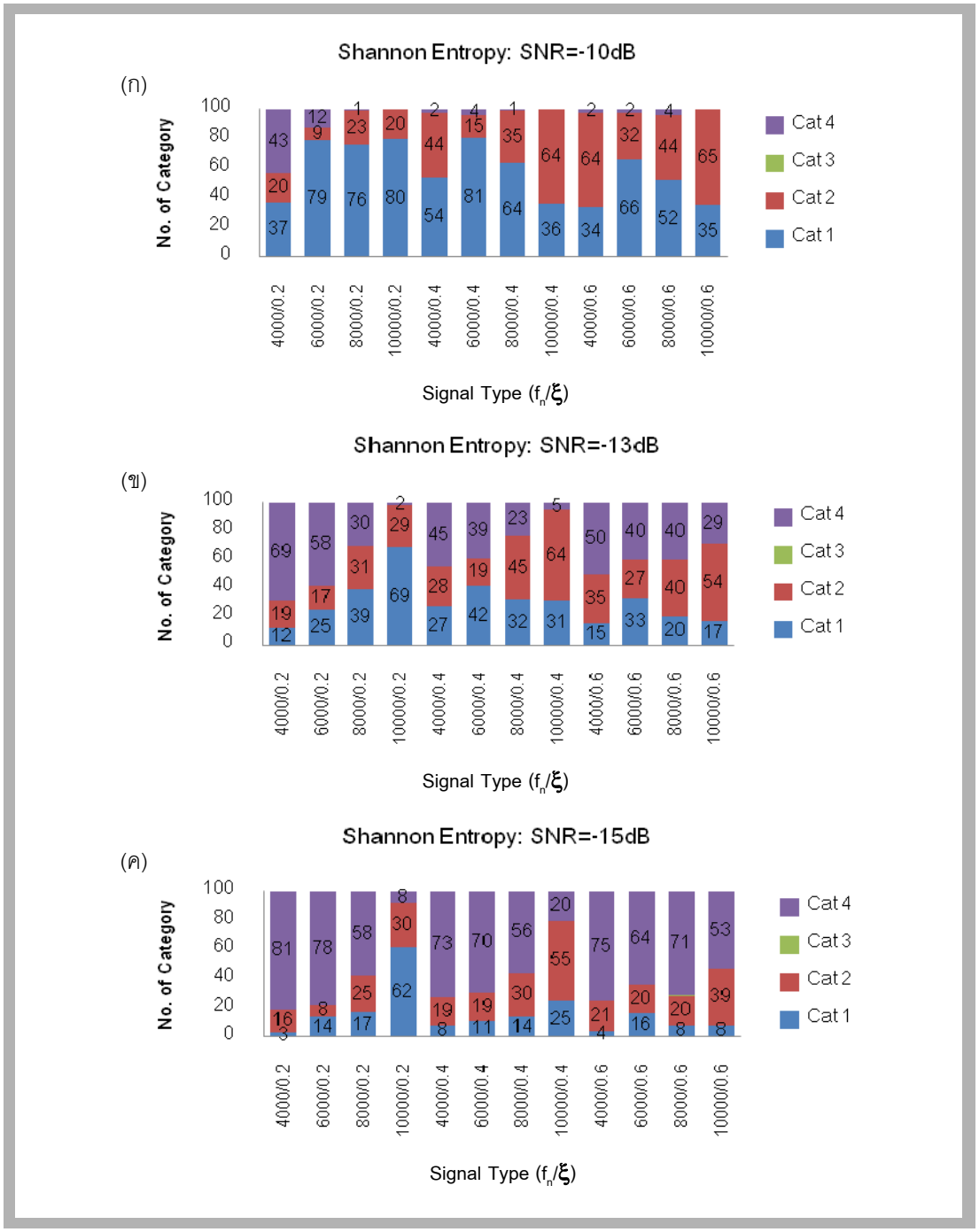
พื้นสัญญาณรบกวน โดยสรุปจะเห็นได้ว่าความสามารถในการตรวจจับของเคอร์โทซิสขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหายค่อนข้างมาก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่สามารถที่จะปรับลักษณะของสัญญาณความเสียหายให้เข้ากับตัวบ่งชี้ได้ นอกจากนี้การใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้ในกรณีที่ระดับของสัญญาณรบกวนมีค่าสูงจะมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 8
จำนวนผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหายประเภทต่างๆ เมื่อใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้:
(ก) SNR=-10dB
(ข) SNR=-13dB
(ค) SNR=-15dB

สำหรับผลของการใช้แชนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ ในรูปที่ 9 มีลักษณะที่คล้ายกับการใช้เคอร์โทซิสเป็นตัวบ่งชี้ คือขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหาย โดยเป็นไปในทิศทางเดียวกับเคอร์โทซิส เนื่องจากแชนนอน-เอนโทรปีและเคอร์โทซิสเป็นการมองลักษณะเฉพาะที่ของสัญญาณที่คล้ายคลึงกันในมุมมองที่แตกต่างกันคือ เคอร์โทซิสพิจารณาความเป็นยอดแหลมของเอ็นวีลอปของสัญญาณที่ถูกกรอง แชนนอนเอนโทรปีพิจารณาจำนวนจุดข้อมูลที่เก็บค่าส่วนใหญ่ของสัญญาณไว้เทียบกับจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด ในกรณี SNR=-10dB แชนนอนเอนโทรปีจะให้ผลในภาพรวมที่ดีกว่า แต่ที่ SNR=-13 และ-15dB ผลที่ได้จะไม่แตกต่างกันมากนัก คือมีความถูกต้องในการตรวจจับที่ต่ำเช่นเดียวกัน

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17



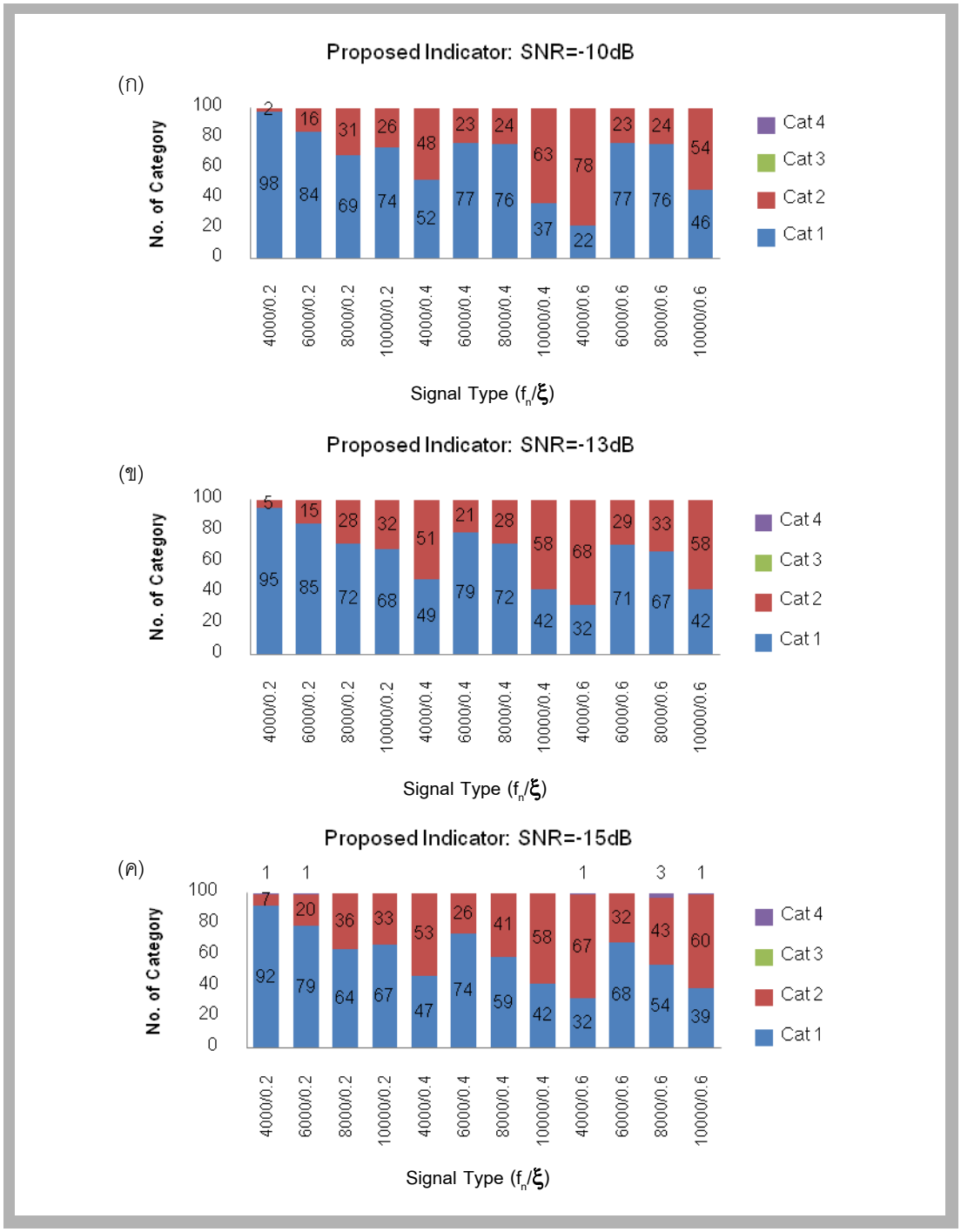
รูปที่ 9
จำนวนผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหายประเภทต่างๆ เมื่อใช้แชนนอนเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้:
(ก) SNR=-10dB
(ข) SNR=-13dB
(ค) SNR=-15dB

ในกรณีของตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าความถูกต้องในการตรวจจับของตัวบ่งชี้ไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหายคือสามารถตรวจจับความถี่ลักษณะเฉพาะ 212Hz ของความเสียหายจำลองจากสัญญาณที่ถูกรบกวนที่ระดับ SNR ต่างๆได้ดี แม้ว่าอัตราส่วนการหน่วงและความถี่ธรรมชาติของระบบจะเปลี่ยนไป เนื่องจากตัวบ่งชี้ดังกล่าวพิจารณาถึงฮาร์มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัม ไม่ได้พิจารณาที่เอ็นวีลอปที่ได้จากสัญญาณที่ผ่านการกรองเหมือนตัวบ่งชี้ทั้งสองตัวที่ผ่านมา แม้ SNR จะต่ำถึง -15dB แต่ก็ยังมีความถูกต้องในการตรวจจับความเสียหายมากกว่า 97%

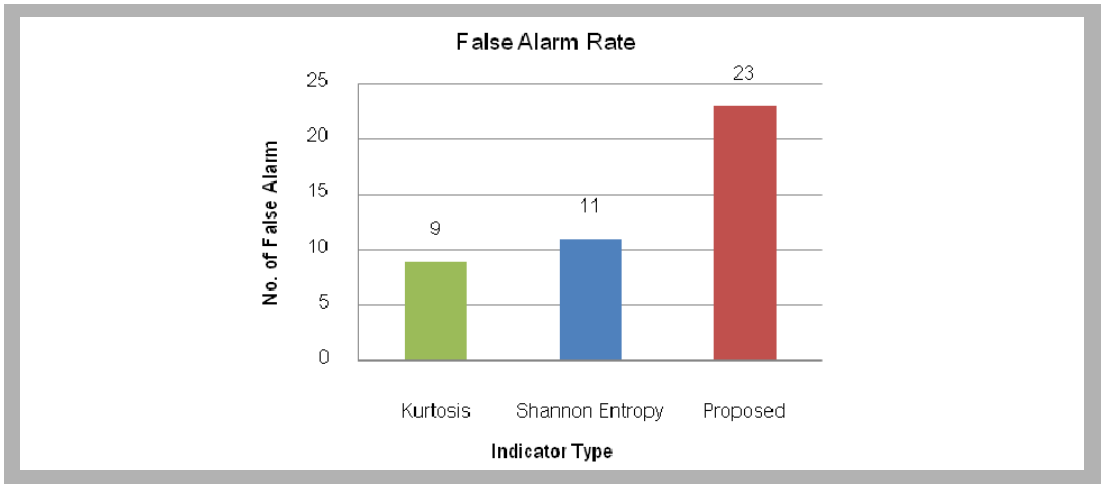
ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการทดสอบอัตราการเกิดการเตือนหลอก (false alarm) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผลการตรวจจับของตัวบ่งชี้แต่ละตัวแสดงค่าความถี่ที่ตรงกับความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายของตลับลูกปืนทั้งๆที่ไม่มีสัญญาณความเสียหาย โดยในการศึกษาจะใช้สัญญาณรบกวนชุดเดียวกับที่ใช้รวมกับสัญญาณความเสียหายโดยนำสัญญาณรบกวนดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการเช่นเดียวกับที่ใช้กับสัญญาณความเสียหาย จากนั้นนับจำนวนครั้งที่ความถี่ที่ได้จากการตรวจจับตรงกับความถี่ลักษณะเฉพาะของความเสียหายของตลับลูกปืน ได้ผล

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

อัตราการเตือนหลอกดังแสดงในรูปที่ 11 โดยจะพบว่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอมีอัตราการเตือนหลอกที่สูงกว่าเคอร์โท-ซิสและแชนนอนเอนโทรปี



รูปที่ 10
จำนวนผลการตรวจจับสัญญาณความเสียหายประเภทต่างๆ เมื่อใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ:
(ก) SNR=-10dB
(ข) SNR=-13dB
(ค) SNR=-15dB



รูปที่ 11
อัตราการเกิดการเตือนหลอกของตัวบ่งชี้ต่างๆ

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 8-10 ประกอบ จะพบว่าตัวบ่งชี้ดังกล่าวยังคงมีความน่าสนใจเพราะมีความถูกต้องในการตรวจจับที่สูงในกรณีที่ระดับของสัญญาณรบกวนสูง และความถูกต้องของการตรวจจับยังไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหาย นอกจากนี้การประยุกต์ในการตรวจวัดตลับลูกปืนของเครื่องจักรสามารถวัดค่าสัญญาณความเสียหายซ้ำหลายๆครั้งเพื่อเพิ่มความมั่นใจว่าผลการตรวจจับที่ได้นั้นเป็นการเตือนหลอกหรือไม่ เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะสุ่มจะเกิดการเตือนหลอกขึ้นแบบสุ่ม ในขณะที่สัญญาณความเสียหายจริงจะให้ผลการตรวจจับที่แสดงถึงความเสียหายซ้ำๆกันด้วยการใช้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอ

V. สรุปผล

ในการศึกษานี้ได้นำเสนอตัวบ่งชี้สำหรับปรับความถี่กึ่งกลางและแถบความถี่ผ่านของตัวกรองมอร์เลต์เวฟเลตที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายที่เกิดขึ้นแบบเฉพาะที่ในตลับลูกปืน โดยอาศัยแบบจำลองสัญญาณความเสียหายที่เป็นฟังก์ชันการตอบสนองอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นคาบ ตัวบ่งชี้ดังกล่าวพิจารณาถึงการเกิดฮาร์-มอนิกในเอ็นวีลอปสเปกตรัมซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดของอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นคาบในสัญญาณ โดยจะมีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของผลรวมของยอดสเปกตรัมในช่วงความถี่ระหว่าง BSF กับ BPIR และฮาร์-มอนิกของความถี่เหล่านั้น ต่อค่าเฉลี่ยของเอ็นวีลอปสเปกตรัมในช่วงที่กำหนด ตัวบ่งชี้ดังกล่าวได้ถูกประเมินความสามารถในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายเปรียบเทียบกับตัวบ่งชี้อื่นๆ คือ เคอร์โทซิส และแชนนอน-เอนโทรปี โดยการใช้แบบจำลองสัญญาณความเสียหายที่เป็นฟังก์ชันการตอบสนองอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นคาบที่มีความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนการหน่วง และระดับของสัญญาณรบกวนต่างๆ กัน พบว่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอสามารถตรวจจับสัญญาณความเสียหายได้ถูกต้องมากกว่า 97% แม้ในระดับ SNR=-15dB และความถูกต้องในการตรวจจับไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของสัญญาณความเสียหาย ในขณะที่เคอร์โทซิสและแชนนอนเอนโทรปีมีความถูกต้องในการตรวจจับที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเสียหายและมีความถูกต้องลดลงอย่างมากเมื่อระดับของสัญญาณความเสียหายเพิ่มขึ้น แม้ว่าตัวบ่งชี้ที่นำเสนอให้อัตราการเตือนหลอกที่มากกว่าตัวบ่งชี้อีกสองตัว แต่การประยุกต์ในการตรวจวัดตลับลูกปืนของเครื่องจักรสามารถตรวจวัดซ้ำหลายๆครั้งเพื่อยืนยันผลได้ นอกจากนี้ตัวบ่งชี้ที่นำเสนอใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าเคอร์โทซิสและแชนนอนเอนโทรปีเนื่องจากต้องมีการระบุยอดในเอ็นวีลอปสเปกตรัม จึงควรมีการปรับปรุงระเบียบวิธีในการหาตัวบ่งชี้เพิ่มเติมเพื่อให้การตรวจจับความเสียหายมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น และควรมีการพัฒนาระเบียบวิธีเพื่อให้ได้ตัวบ่งชี้สำหรับปรับเวฟเลตที่สามารถตรวจจับลักษณะของสัญญาณความเสียหายที่มีรูปแบบซับซ้อนในกรณีของที่เกิดความเสียหายที่รางวิ่งในหรือเม็ดลูกปืนได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

หมายเหตุ ในการศึกษานี้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการสร้างสัญญาณความเสียหายจำลอง รวมไปถึงการประมวลผลสัญญาณทั้งหมด

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาด้วยระเบียบวิธีเวฟเลตในการตรวจจับสัญญาณความเสียหายแบบเฉพาะที่ของตลับลูกปืนทรงกระบอกในระยะเริ่มต้น” ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

doi:10.4186/ejth.2011.3.1.17

บรรณานุกรม

[1] P. D. McFadden and J. D. Smith, "Vibration monitoring of rolling element bearings by the high frequency resonance technique - A review," *Tribology International*, Vol. 17, pp. 1-18, 1984.

[2] C. J. Li and J. Ma, "Wavelet decomposition of vibrations for detection of bearing-localized defects," *NDT&E International*, Vol. 30, No. 3, pp. 143-149, 1997.

[3] N. G. Nikolaou and I. A. Antoniadis, "Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings using complex shifted Morlet wavelet," *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 16, No. 4, pp. 677-694, 2002.

[4] C. T. Yiakopoulos and I. A. Antoniadis, "Wavelet based demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings," *Shock and Vibration*, Vol. 9, pp. 293-306, 2002.

[5] H. Qiu, J. Lee, J. Lin, and G. Yu, "Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 289, pp. 1066-1090, 2006.

[6] J. Shiroishi, Y. Li, S. Liang, S. Danyluk, and T. Kurfess, "Vibration analysis for bearing outer race condition diagnostics," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. 21, No. 3, 1999.

[7] Y. T. Sheen, "On the study of applying Morlet wavelet to the Hilbert transform for the envelope detection of bearing vibrations," *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 23, pp. 1518-1527, 2009.

[8] W. Su, F. Wang, H. Zhu, Z. Zhang, and Z. Guo, "Rolling element bearing faults diagnosis based on optimal Morlet wavelet filter and autocorrelation enhancement," *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 24, pp. 1458-1472, 2010

[9] W. He, Z. N. Jiang, K. Feng, "Bearing fault detection based on optimal wavelet filter and sparse code shrinkage," *Measurement*, 2009.

[10] P. S. Addison, *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*, Taylor and Francis, New York, 2002.

[11] W. Yang and X. Ren, "Detecting impulses in mechanical signals by wavelets," *EURASIP Journal of Applied Signal Processing*, pp. 1156-1162, 2004.

[12] C. Junsheng, Y. Dejie, and Y. Yu, "Application of an impulse response wavelet to fault diagnosis of rolling bearing," *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 920-929, 2007.

[13] T.A. Harris, *Rolling Bearing Analysis*, 4th Edition, Wiley, New York, 2001.