

บทที่ 2

หลักการ เหตุผล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

Vibration analysis เป็นวิชาการที่สำคัญสาขาหนึ่ง ซึ่งได้ถูกประยุกต์และพัฒนานำมาใช้ในงานซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล โดยเฉพาะงานซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลแบบ predictive maintenance ซึ่งจะมีการตรวจสอบสภาพเครื่องจักรตามระยะเวลาที่กำหนด องค์ประกอบหลักที่สำคัญซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนซึ่งควรกล่าวถึงคือ ขั้นตอนสำคัญในการทำ vibration analysis การแปลงสัญญาณแบบ Fast Fourier Transform ความถี่ที่เกิดจากเครื่องจักรกล ลักษณะการชำรุดที่อายุความล้าของแบร้งแบบลูกกลิ้ง ความถี่ที่เกิดจากแบร้ง หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ (signal conditioner) แบบ envelope demodulation หัววัดความเร่งและการติดตั้ง สุดท้ายคือเรื่อง window function และการเลือกให้

2.1 ขั้นตอนสำคัญในการทำ Vibration Analysis

Vibration analysis เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งเป็นเครื่องมือในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลแบบ predictive maintenance ซึ่งมีขั้นตอนที่สำคัญ 8 ข้อ ดังต่อไปนี้ (8, 9)

- 2.1.1 ทำการวัดค่า vibration (measuring)
- 2.1.2 ทำการบันทึกข้อมูลการวัด (recording)
- 2.1.3 ทำการค้นหาจุดบกพร่อง (fault detection)
- 2.1.4 ทำการวิเคราะห์จุดบกพร่อง (fault diagnosis)
- 2.1.5 ทำการแปลผล (interpreting data)
- 2.1.6 ทำการคาดการณ์การชำรุด (failure prediction)
- 2.1.7 ทำการวางแผนงานซ่อมบำรุง (job planning)
- 2.1.8 ทำแผนปฏิบัติการซ่อมบำรุง (repaired job planning)

2.2 การแปลงสัญญาณ Time Domain และ Frequency Domain

ขั้นตอนซึ่งสำคัญในการแปลงค่าการสั่นสะเทือนจาก time domain มาเป็น frequency domain ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์โดยวิธี Fast Fourier Transform หรือ FFT. เนื่องจากการวัดการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนทางกล ซึ่งมีการหมุนและชิ้นส่วนทางกลดังกล่าวประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อยจำนวนมาก เมื่อมีการเคลื่อนที่โดยการหมุนก็จะเกิดการสั่นสะเทือนในรูปแบบของผลรวมซึ่งเกิดจากหลาย ๆ ความถี่รวมกัน ดังนั้นการวิเคราะห์โดยวิธี time domain จึงทำได้ยาก เนื่องจาก time waveform ที่ปรากฏ เป็นผลจากการรวมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งไม่สามารถแยกออกมาได้ชัดเจนว่าเกิดจากความถี่ใดบ้าง

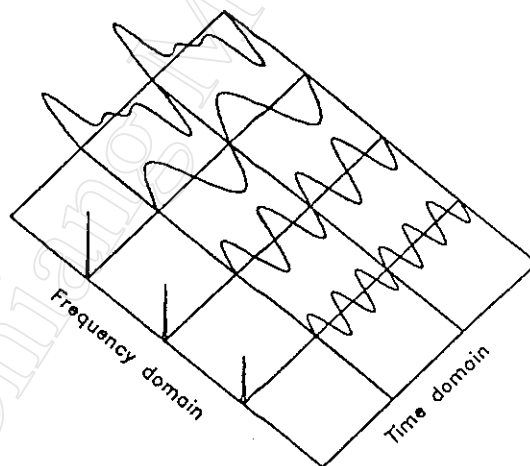
ความสัมพันธ์ระหว่าง time domain และ frequency domain ได้ถูกพัฒนาจาก Fourier มาใช้งาน โดย Wiener และ Khinchin (7) ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน (function) ได้ดังนี้

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

$$\text{และ } g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f)e^{+j2\pi ft} df$$

โดย f คือ ความถี่
 t คือ เวลา

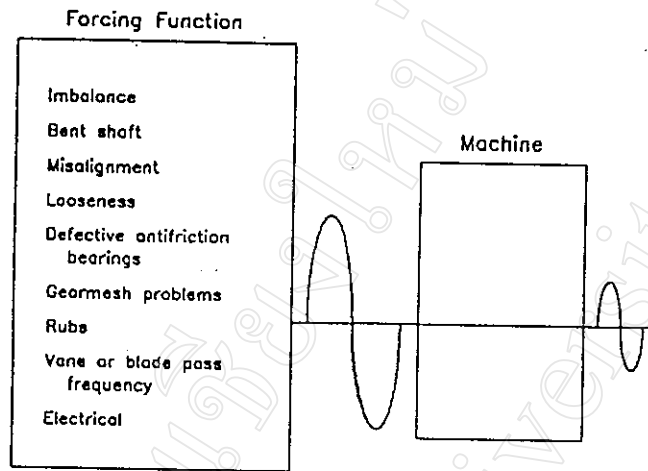
ลักษณะของการแปลงสัญญาณระหว่าง time domain และ frequency domain ดังแสดงในรูป 2.1 เมื่อ time domain ซ้ายมือสุดประกอบกันขึ้นจาก time domain 3 ชุดทางขวามือ FFT จะแสดงให้เห็นเป็น 3 ความถี่ ทำให้สะดวกต่อการวิเคราะห์



รูป 2.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง frequency และ time domain ใน FFT

2.3 ความถี่ที่เกิดจากเครื่องจักรกล

การสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกลเป็นเหมือนปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ ซึ่งมีสาเหตุให้เกิดการสั่นสะเทือนหลายสาเหตุ ดังแสดงในรูป 2.2

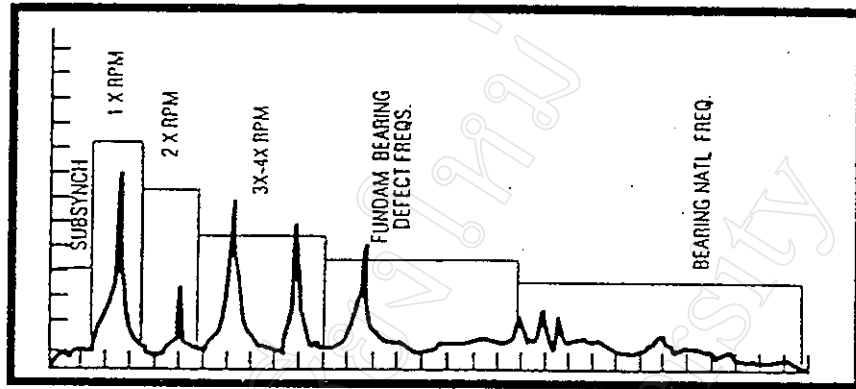


รูป 2.2 สาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกล

ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน จะวิเคราะห์หองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนคือ แอมพลิจูด และความถี่ ความถี่ของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการหมุนของเครื่องจักรกล แบ่งได้เป็น 3 ข้อใหญ่ (27) คือ

2.3.1 Generated Frequencies : คือความถี่ ซึ่งเกิดจากการทำงานของเครื่องจักรกลและเป็นเหตุการณ์ตามปกติ ไม่มีผลกระทบต่อเครื่องจักรกลแต่ก็มีข้อจำกัดว่าระดับของแอมพลิจูด (amplitude) ต้องไม่สูงเกินไป เช่น unbalance, vane pass frequencies, blade pass frequencies และ gear mesh frequencies ซึ่งความถี่ดังกล่าวข้างต้นสามารถคำนวณได้จากรอบการหมุนของเครื่องจักรและจำนวนใบพัด หรือจำนวนเฟืองเกียร์ เป็นต้น

โดยทั่วไปการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลในโดเมนความถี่จะแบ่งช่วงความถี่ออกเป็น 5 กลุ่ม ดังแสดงในรูป 2.3 โดยกลุ่ม 1 x RPM (จำนวนหนึ่งเท่าของรอบการหมุนของเครื่องจักร) เป็นลักษณะของความผิดปกติของการ unbalance กลุ่ม 2 x RPM เป็นลักษณะของการเยื้องศูนย์ กลุ่ม 3 x RPM เป็นต้นไป เป็นลักษณะของความถี่ที่เกิดจากใบพัดหรือการขบกันของเฟืองเกียร์ กลุ่มที่ 4 เป็นลักษณะของความถี่พื้นฐานของ BPF จากแบริ่ง และกลุ่มสุดท้ายทางขวามือสุดเป็นลักษณะของความถี่ธรรมชาติของแบริ่งหรือของระบบ



รูป 2.3 ลักษณะทั่วไปในการแบ่งช่วงความถี่ เพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกล

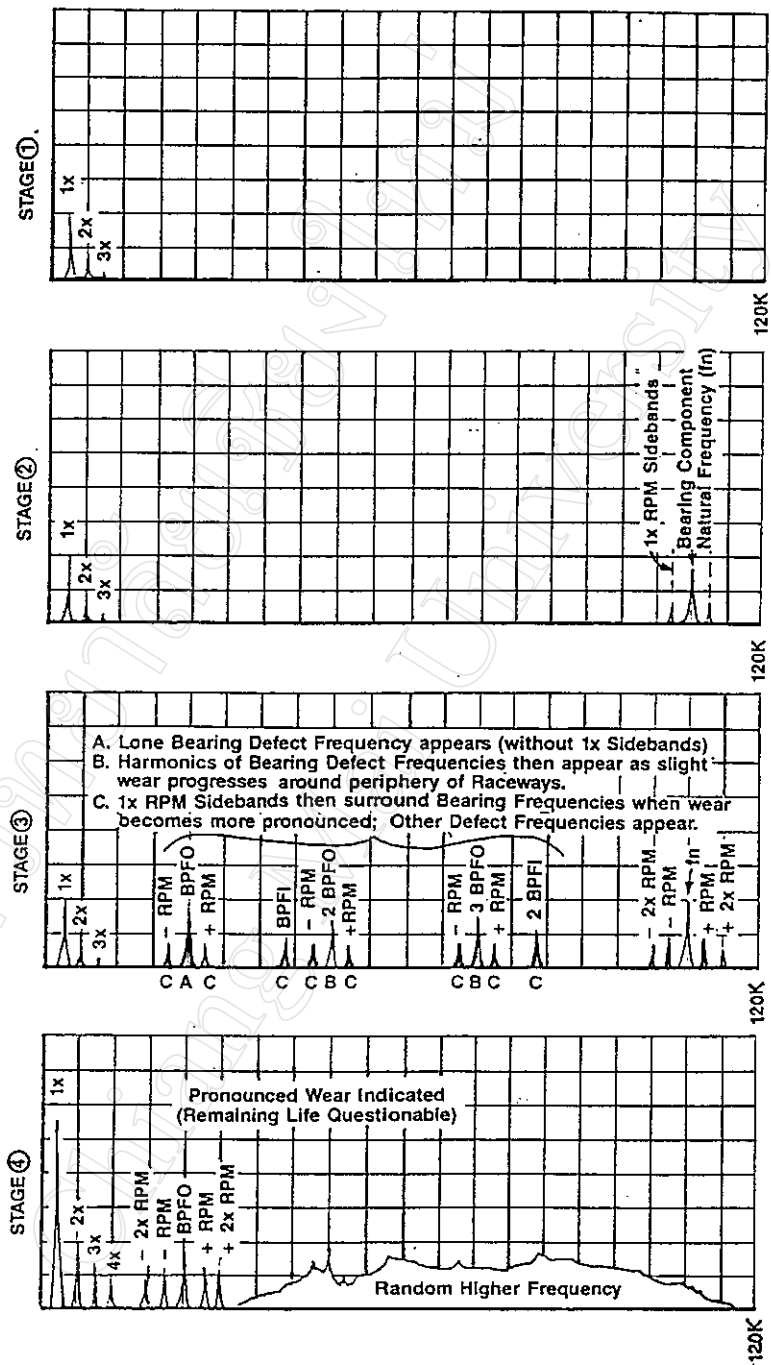
ความถี่ที่สามารถคำนวณได้ทำนองเดียวกับข้างต้น ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะแสดงว่าเครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วนภายในเครื่องจักรกลเริ่มเกิดหรือเกิดการชำรุดขึ้นแล้ว เช่น BPFI, BPFO, BSF หรือ FTF ซึ่งจะมีลักษณะของ spectrum เป็นไปตามขั้นตอนการชำรุดของแบริ่ง ดังแสดงตามรูป 2.4 ซึ่ง Berry, J. E. (6) ได้ประมาณอายุที่เหลือของแบริ่งในช่วง 20 % สุดท้ายเป็น 4 ช่วง (stage) คือ ช่วงที่หนึ่ง 10 - 20 % ช่วงที่สอง 5-10 % ช่วงที่สาม 1-5 % และช่วงที่สี่มีโอกาสเกิดการชำรุดรุนแรงได้ตลอดเวลา อายุแบริ่งเหลือประมาณ 1 ชั่วโมง ถึง 1 %

รูป 2.5 แสดงลักษณะของ spectrum ที่เกิดในเครื่องจักรกล ซึ่งมีทั้งเฟืองเกียร์และแบริ่งอยู่ด้วยกัน ค่าแอมพลิจูดของ GMF และ GMF harmonic มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดของ 1RPM และ 1RPM harmonic และยังมีความสูงมากขึ้นเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดของ BPF ดังนั้นในการติดตามสภาพของเครื่องจักร จึงมักนิยามกำหนดค่าแกนแอมพลิจูดเป็น logarithm scale เพื่อให้สะดวกในการอ่านค่าและติดตามเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูป 2.6

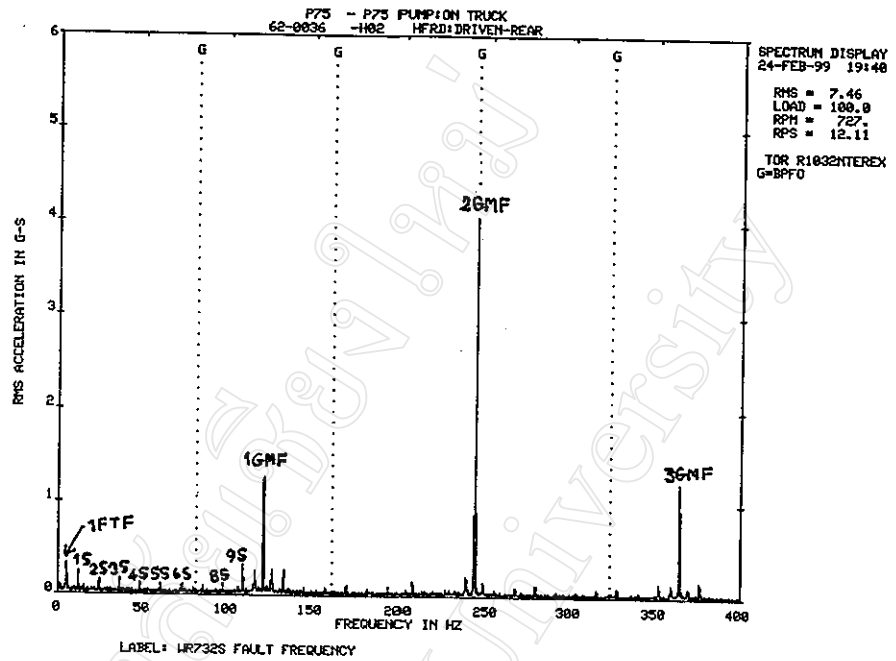
2.3.2 Excited Frequencies : คือความถี่ที่เกิดจากการถูกกระตุ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของระบบ เช่น ระบบถูกกระตุ้นให้มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) การสั่นสะเทือนก็จะถูกขยายขึ้นจนเกิด resonance (1) ซึ่งจะขยายระดับความรุนแรงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพการหน่วง (damping) ของระบบ

ความถี่ธรรมชาติสำหรับระบบที่มีความซับซ้อนของโครงสร้างและประกอบขึ้นด้วยชิ้นส่วนหลาย ๆ ชิ้นจะคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติได้ยากมาก แต่ความถี่ธรรมชาติสามารถระบุและแยกได้ชัดเจนจากความถี่ที่สามารถคำนวณได้ เพราะว่าความถี่ธรรมชาติจะเกิดจากการ กระตุ้นหรือถูกปรับเปลี่ยนไป (modulated) จากความถี่ที่สามารถคำนวณได้ เช่น ความเร็วรอบ การเยื้องศูนย์ แบริ่งชำรุดและเกียร์ชำรุด เป็นต้น

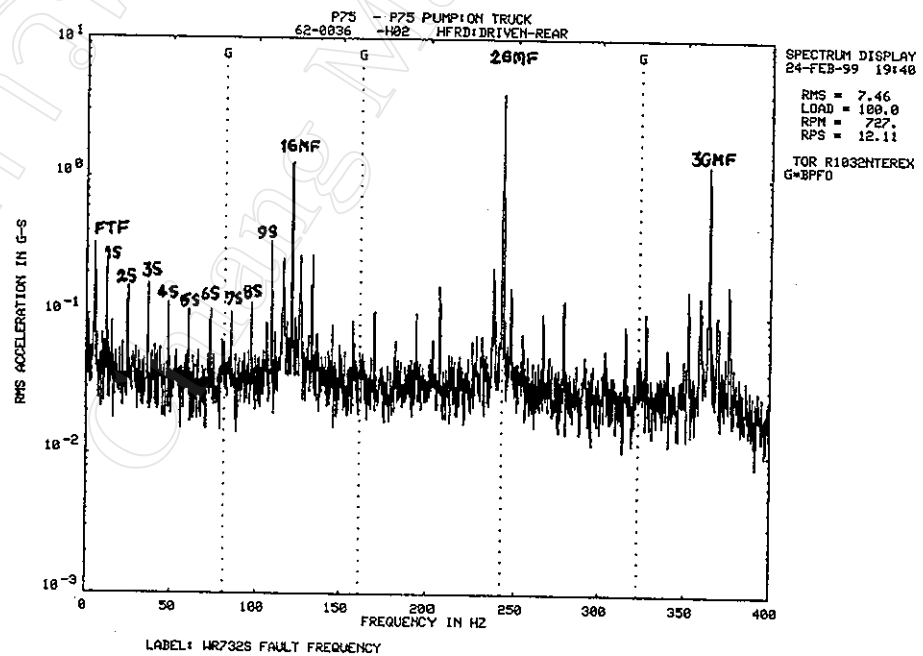
รูป 2.7 แสดงตัวอย่าง spectrum ในช่วงความถี่สูงถึง 30 kHz และเกิด resonance ขึ้นในระบบ เมื่อแบริ่งเริ่มเกิดการชำรุดเป็นหลุมเล็ก ๆ ที่รางนอกของแบริ่ง



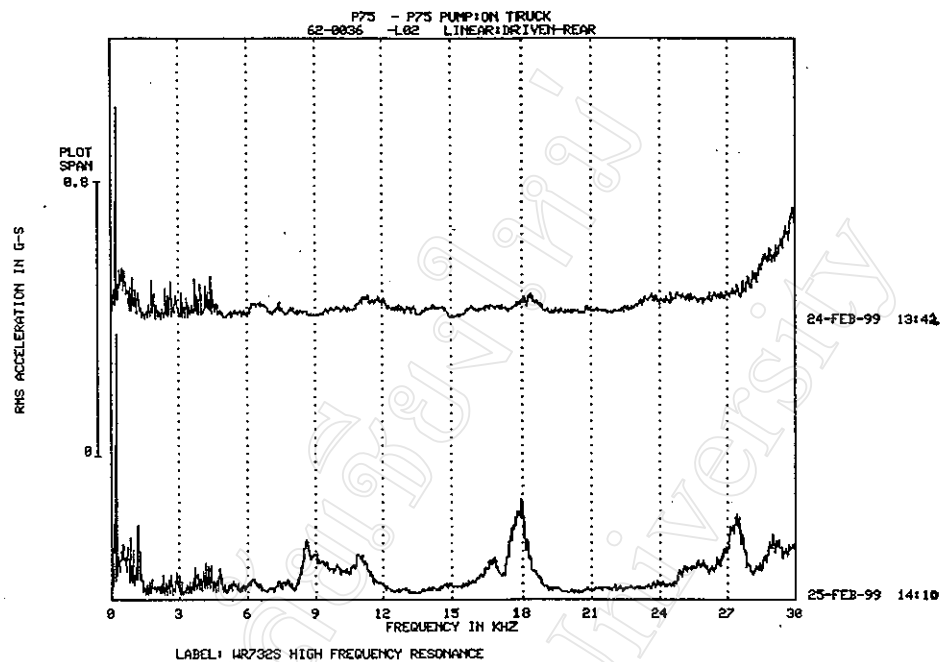
รูป 2.4 ลักษณะของ spectrum ที่เกิดจากการชำรุดของแบริ่ง
ตั้งแต่เริ่มต้น stage 1 จนถึงระยะสุดท้าย stage 4



รูป 2.5 GMF, BPF และ running speed (S) บนแกน linear



รูป 2.6 GMF, BPF และ running speed (S) บนแกน logarithm



รูป 2.7 เปรียบเทียบ spectrum ก่อนเกิด (บน) และหลังเกิด resonance (ล่าง) เมื่อแบริ่งเริ่มชำรุด

2.3.3 Frequencies Caused by Electronic Phenomena : คือความถี่ที่มักจะเป็นความผิดพลาดจากการนำสัญญาณหรือการบิดเบี้ยวของสัญญาณ (distortion) ซึ่งจะไม่บอกกล่าวถึงในส่วนของการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่ค่อยเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

2.4 ลักษณะการชำรุดที่อายุความล้าของแบริ่งแบบลูกกลิ้ง (37)

ลักษณะการชำรุดของแบริ่งที่สำคัญสรุปได้ 4 ข้อคือ การชำรุดที่อายุความล้า (rolling-element fatigue) การแตกร้าวตามแนวขวาง (transverse cracking) การไหลในช่วงพลาสติก (plastic flow) และการสึกหรอ (wear) ทั้งนี้ลักษณะการชำรุดที่อายุความล้าเป็นการชำรุดที่เกิดขึ้นมากที่สุด ซึ่งการชำรุดลักษณะนี้แบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

2.4.1 การชำรุดที่อายุความล้าเริ่มต้นที่บริเวณใต้ผิว (subsurface origin spalling) ซึ่งเกิดจาก 2 สาเหตุคือ ความล้าที่เกิดใต้ผิวบริเวณที่มีความเค้นเฉือนสูงสุด และกรณีมีสารปนเปื้อนแข็ง (hard inclusions) อยู่ใต้ผิว บริเวณที่มีความเค้นเฉือนสูงสุดหรือใกล้เคียง

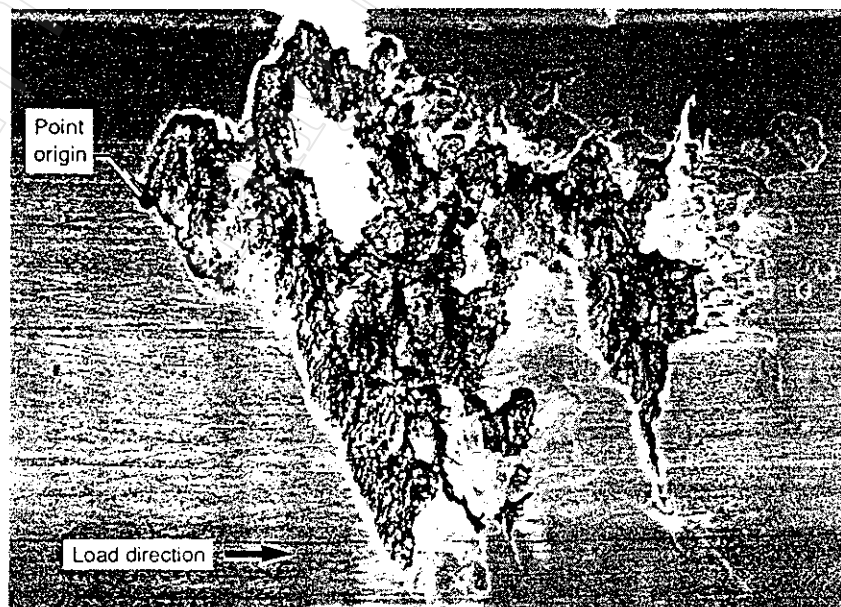
2.4.2 การชำรุดที่อายุความล้าเริ่มต้นที่ผิว (surface origin spalling) ซึ่งเกิดจากสาเหตุต่าง ๆ คือ สภาพผิวไม่ดีหรือมี inclusion ที่ผิว การรับแรงที่ด้านปลายของเม็ดแบริ่งไม่เท่ากัน สภาพผิวสึกหรอจากความขรุขระของผิว หรือจากสาเหตุการหล่อลื่นไม่ดี

การชำรุดของทั้ง 2 แบบข้างต้นเมื่อผ่านจุดเริ่มแรกของการชำรุด เศษของรอยแตกก็จะหลุดออกมาจากผิวเดิมของแบริ่ง และมีขนาดหลุมของรอยแตกขนาดประมาณ 100 ถึง 1,000 ไมครอน เป็นต้นไป ตาม

ตัวอย่างในรูป 2.8 และรูป 2.9 รอยแตกนี้เมื่อเกิดขึ้นก็จะเป็นจุดที่เมตแบริงวิ่งผ่านซึ่งอาจจะทำให้เกิด resonance ขึ้นกับโครงสร้างของระบบที่ทำการวัดค่าการสั่นสะเทือน หรือกำเนิดความถี่ที่เกิดจากการหมุนของแบริงผ่านบริเวณที่เกิดการชำรุดขึ้นกับชิ้นส่วนของแบริง เช่น รางใน รางนอก เมตแบริง หรือ cage ของแบริง ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 2.5



รูป 2.8 รอยแตกได้ผิวของเมตแบริง ขนาด 0.5 นิ้ว ซึ่งชุบแข็งโดย case - carburized



รูป 2.9 การเริ่มต้นแตกที่ผิวจากสาเหตุ stress concentration ที่ผิวของแบริง

2.5 ความถี่ที่เกิดจาก Anti-friction Bearing (25, 27)

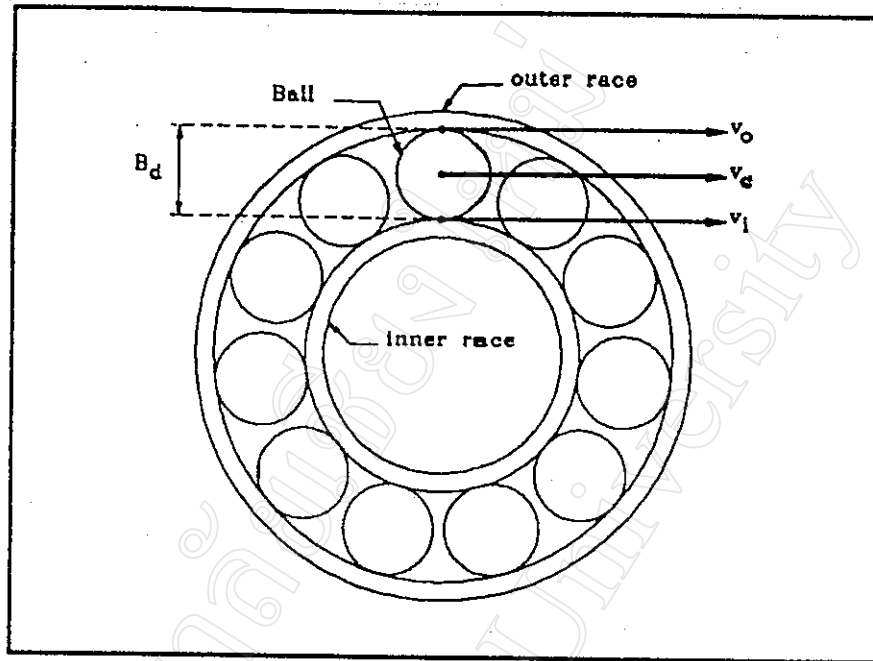
การสั่นสะเทือนในแบริ่งโดยปกติจะมีอยู่แล้ว จากสาเหตุที่แบริ่งเป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่ประกอบอยู่ในชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและทำหน้าที่รองรับการหมุนของชิ้นส่วนอื่น ๆ ดังนั้นชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ประกอบกันเป็นระบบของแบริ่ง จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ในการประกอบหรือติดตั้งแบริ่ง เช่น เลื้อยของแบริ่งที่มีความเบี้ยว เหล่าที่มีความโค้งหรือคด นอกจากนี้ความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นจากตัวแบริ่งเอง แม้ว่าแบริ่งยังอยู่ในสภาพที่ใหม่หรือยังดีอยู่ เช่น ความเบี้ยวของเม็ดแบริ่ง ความเบี้ยวของวงแหวนในหรือรางใน หรือสภาพผิวที่ไม่เรียบของวงแหวนนอกหรือรางนอก นอกจากนี้เมื่อแบริ่งมีการรับภาระและเกิด contact stress ก็จะมีการยุบตัวของผิวแบริ่ง ซึ่งมีผลในทิศทางเพิ่มการสั่นสะเทือน อย่างไรก็ตามในการใช้งานของแบริ่งจะมีสารหล่อลื่นซึ่งเป็นฟิล์มอยู่ระหว่างผิวของแบริ่ง ช่วยลดแรงเสียดทานและลดการสั่นสะเทือนได้ระดับหนึ่ง

ปกติการวัดค่าการสั่นสะเทือนของแบริ่งจะทำการวัดที่เลื้อยของแบริ่ง ซึ่งอาจจะไม่ได้สัมผัสกับรางนอกของแบริ่ง หรือตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความเร่งอาจไม่ได้อยู่ที่เลื้อยของแบริ่งโดยตรง หรืออาจไม่อยู่ในทิศทางการส่งผ่านของแรง (transmission path) โดยตรง ดังนั้นการชำรุดของชิ้นส่วนในแบริ่งแต่ละชิ้นไม่ได้หมายความว่า จะมีสัญญาณความถี่ของ BPF ผ่านออกมาได้อย่างดีและชัดเจนทุกครั้งไป เช่น การชำรุดของรางในจะส่งผ่านแรงมายังเม็ดแบริ่งโดยผ่านฟิล์มน้ำมัน และจากเม็ดแบริ่งส่งไปยังรางนอกก็ผ่านฟิล์มน้ำมันอีกชั้นหนึ่ง ก่อนจะผ่านตัวรางนอกและรอยต่อระหว่างรางนอกกับเลื้อยแบริ่ง แล้วผ่านตัวเลื้อยแบริ่งเข้าสู่หัววัดความเร่งเป็นจุดสุดท้าย ดังนั้นโอกาสที่จะได้รับสัญญาณอย่างสมบูรณ์จึงน้อยมาก การปรากฏของแอมพลิจูดของ BPF ใน spectrum จึงต้องให้ความสนใจและติดตาม

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการชำรุดซึ่งจะเกิดขึ้นที่รางนอกของแบริ่ง ซึ่งจะเป็นค่าความถี่ BPFO อย่างไรก็ตาม การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะของ non-linear vibration ซึ่งอาจมีปรากฏการณ์ต่าง ๆ เกิดขึ้นประกอบ เช่น modulation, high frequency riding on low frequency ฯลฯ ดังนั้น จึงขอเสนอความถี่ของ BPF ทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้น เพื่อให้ประกอบในการวิเคราะห์

Anti-friction bearings ที่ใช้อยู่ในเครื่องจักรกล เมื่อเกิดการชำรุดจะทำให้กำเนิดความถี่อย่างน้อย 5 ความถี่ คือ

- ก) Rotating unit frequency or speed (S)
- ข) Fundamental train frequency (FTF)
- ค) Ball pass frequency of the outer race (BPFO)
- ง) Ball pass frequency of the inner race (BPFI)
- จ) Two time ball spin frequency (2XBSF)



รูป 2.10 Axial View of Bearing (27)

การคำนวณความถี่ FTF, BPFO, BPFI และ BSF จากรูป 2.10 และ 2.11 ประกอบ ซึ่งจะแสดงภาพตัดของ bearing ตามแนวแกนและภาคตัดขวาง ที่มาของสูตรในการคำนวณ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

สรุปสูตรสำหรับคำนวณ BPF ในแบร์ริงมีดังนี้คือ

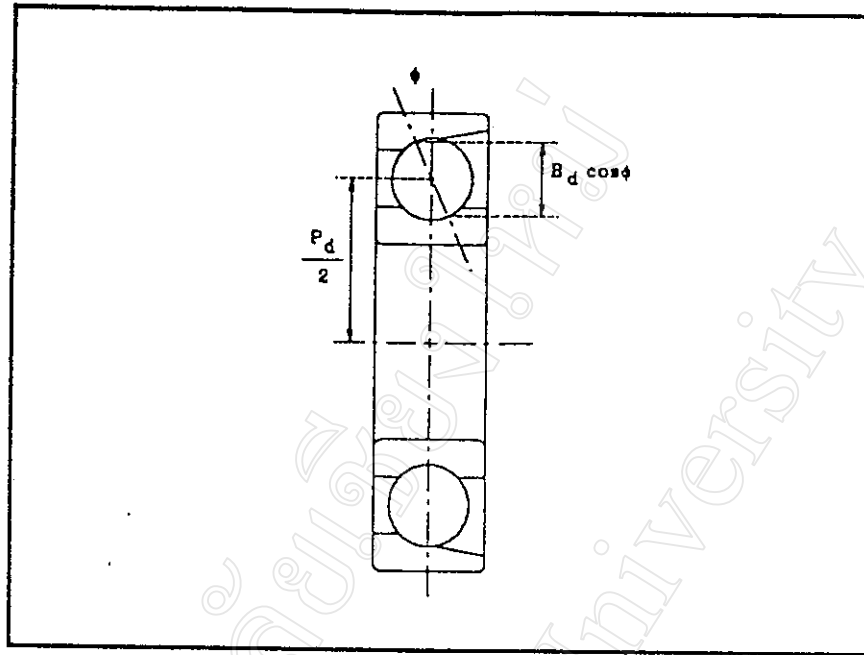
$$\text{FTF} = \frac{1}{2} \left[\omega_i \left(1 - \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) + \omega_o \left(1 + \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) \right] \quad (1)$$

$$\text{BPFO} = \frac{N_b}{2} (\omega_i - \omega_o) \left(1 - \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) \quad (2)$$

$$\text{BPFI} = \frac{N_b}{2} (\omega_i - \omega_o) \left(1 + \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) \quad (3)$$

$$\text{BSF} = \frac{P_d}{2B_d} (\omega_i - \omega_o) \left(1 - \frac{B_d^2 \cos^2 \phi}{P_d^2} \right) \quad (4)$$

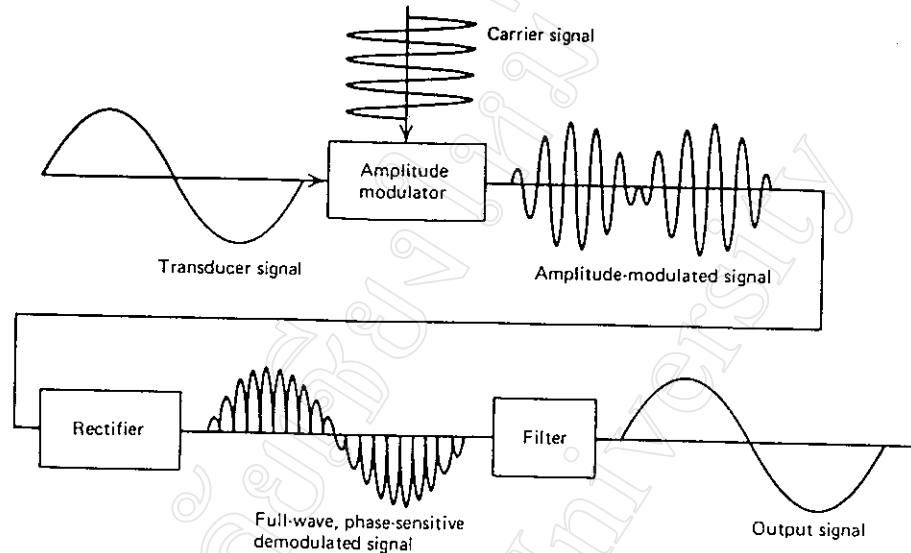
สำหรับแบร์ริงที่ใช้ในการทดสอบ มีค่า $P_d = 45.70$ มม., $B_d = 7.60$ มม. และค่ามุม $\phi = 0.0$ องศา เมื่อแทนค่า $\omega_o = 0$ จะได้ BPF เป็นจำนวนเท่าของ ω_i หรือรอบต่อวินาทีของ inner race ของแบร์ริงในปั๊มไฮดรอลิก คือ FTF = 0.417, BSF = 2.920, BPFO = 6.670 และ BPFI = 9.330



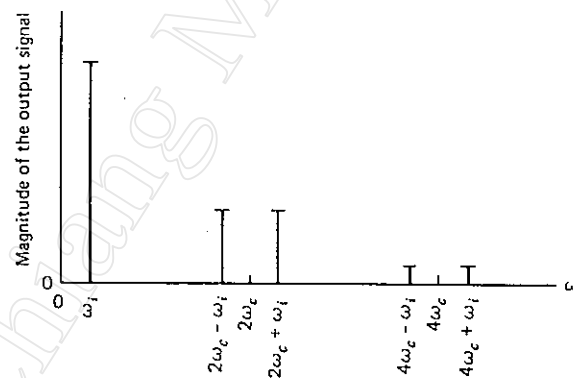
รูป 2.11 Cross-sectional view of bearing (27)

2.6 การปรับปรุงสัญญาณแบบ Envelope Demodulation

สัญญาณที่เกิดขึ้นจากระบบที่มีการสั่นสะเทือนแบ่งได้ 3 แบบ (13) คือ แบบ periodic แบบ transient และแบบ random โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีความซับซ้อนและประกอบขึ้นด้วยหลายชิ้นส่วนในเครื่องจักรกล จะมีลักษณะเป็น random vibration ซึ่งจะประกอบขึ้นด้วยความถี่ทั้งหมดที่เกิดขึ้นและมี phase ที่ไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามหากมีสัญญาณที่มีลักษณะของ periodic ผสมอยู่ สัญญาณดังกล่าวอาจมีการปรับเปลี่ยนให้ต่างไปจากเดิม เมื่อรวมเข้ากับสัญญาณอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัญญาณที่มีระดับความแรงต่ำมาก ๆ เช่นกรณีการเริ่มต้นขำรถของแบริ่ง ดังนั้น การจะนำเอาสัญญาณที่มีความถี่และความแรงต่ำออกมาจึงต้องอาศัยวิธีการ demodulate ซึ่งโดยหลักการ ตามรูป 2.12 ที่แสดง เมื่อมีการผสมกันของสัญญาณความถี่ต่ำ (transducer signal) และสัญญาณความถี่สูง (carrier signal) เกิดเป็น amplitude modulated signal เมื่อนำสัญญาณที่ผ่านตัว rectifier แบบ full wave, phase sensitive demodulate signal ก็จะได้สัญญาณเป็นรูปครึ่งของ sine wave ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณความถี่ต่ำและมีรูปร่างของ frequency spectrum ตามรูป 2.13 ซึ่งยังคงปรากฏค่าความถี่สูงอยู่ ซึ่งจะไม่สะดวกและยากต่อการวิเคราะห์ จึงต้องทำการกรองสัญญาณที่มีความถี่สูงออก ดังเช่นในการใช้งานในวงการอุตสาหกรรม ตามรูป 2.14 ที่แสดง เป็นตัวอย่างหนึ่งที่ทำกรปรับปรุงสัญญาณตามหลักการข้างต้น แต่จะมีขั้นตอน preamplifier เพื่อขยายสัญญาณให้แรงขึ้น แล้วทำการกรองสัญญาณความถี่ต่ำออก และขยายสัญญาณอีกครั้งก่อนเข้าสู่การ rectify หรือ demodulate และสุดท้ายทำการกรองสัญญาณความถี่สูงออก เพื่อความสะดวกและความละเอียดในการตั้งค่าความถี่ให้เหมาะสม ตามที่ต้งการจะทำการวิเคราะห์



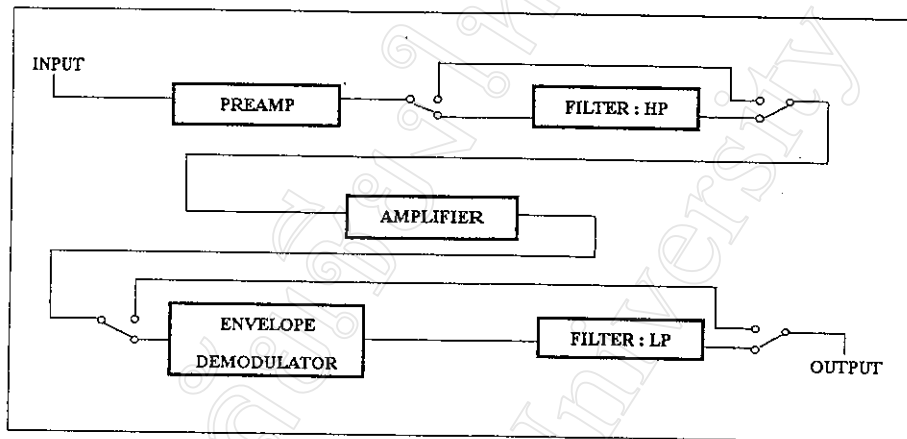
รูป 2.12 Amplitude modulation and demodulation ในรูปของ time domain



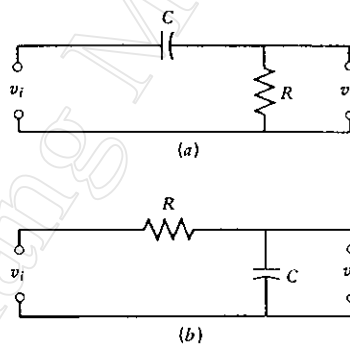
รูป 2.13 Frequency spectrum จากการทำ demodulate แบบ full wave, phase sensitive rectifier

อย่างไรก็ตามในการเลือกกรองสัญญาณ เพื่อจะขจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการหรือสัญญาณที่ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์หรือออก ก็ต้องเลือกช่วงความถี่ที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ไม่ว่าจะเป็นตัวกรองสัญญาณแบบ HP หรือ LP ตามรูป 2.15 แสดงวงจรทั่วไปของ RC filter ซึ่งนิยมใช้กัน และรูป 2.16 แสดง response curve ของ RC filter แบบ HP ซึ่งในการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบนี้ ค่า ωRC ควรมากกว่า 5 เพื่อให้สัญญาณที่ต้องการให้ผ่านมีค่าเกิน 98 % ส่วนรูปที่ 2.17 แสดง response curve ของ RC filter แบบ LP ซึ่ง

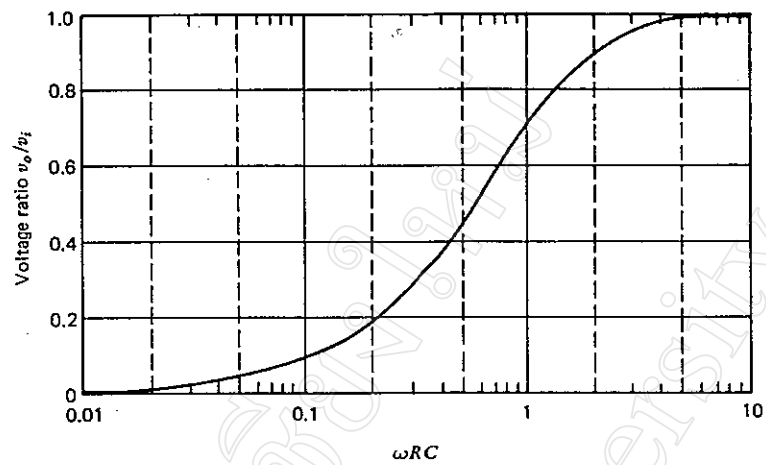
ในการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบนี้ค่า ωRC ควรต่ำกว่า 0.203 สัญญาณที่ต้องการจึงจะผ่านเกิน 98 % และนำไปใช้ประโยชน์ได้ตามต้องการ



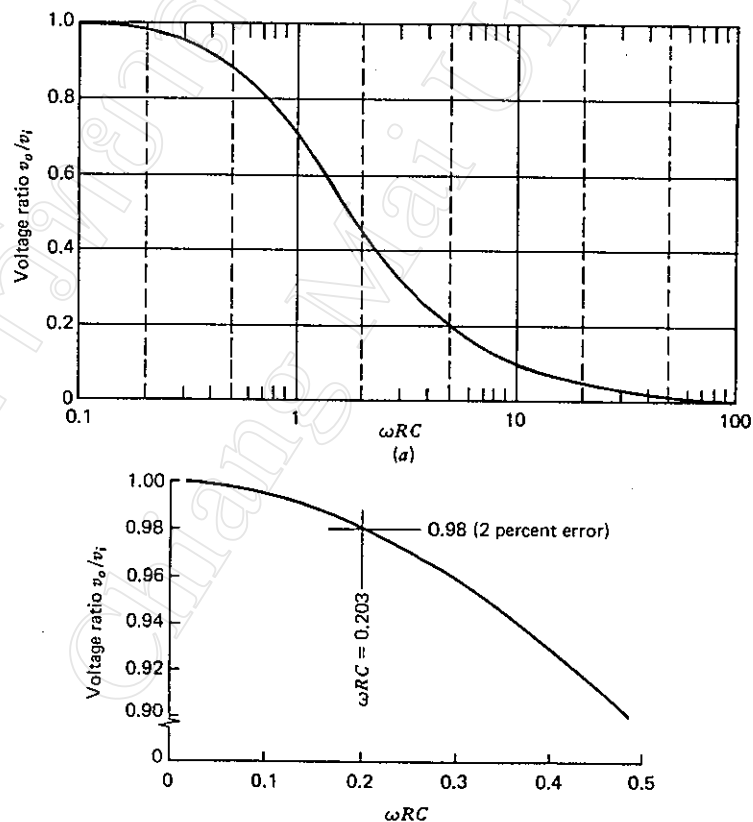
รูป 2.14 Functional block diagram ซึ่งเพิ่มชุดขยายสัญญาณและตัวกรองสัญญาณก่อนทำการ demodulate



รูป 2.15 วงจรพื้นฐาน RC filter, high-pass filter (บน) และ low-pass filter (ล่าง)



รูป 2.16 Response curve ของ RC filter แบบ HP



รูป 2.17 Response curve ของ RC filter แบบ LP และกราฟแสดงค่าผิดพลาด 2 %

2.7 หัววัดความเร่ง การติดตั้งและการเลือกหน่วยวัด

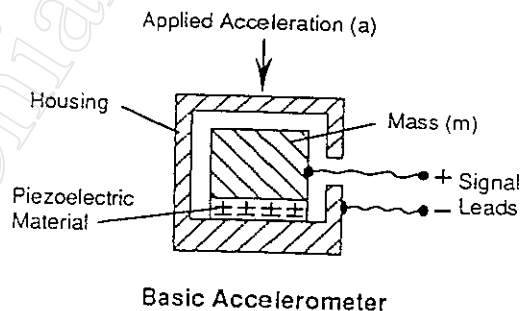
หัววัดความเร่ง (accelerometer) เป็นเครื่องมือที่รับสัญญาณความเร่งจากการสั่นสะเทือนแปลงเป็นค่าทางไฟฟ้าให้วัดค่าได้ง่าย ปัจจุบันหัววัดความเร่งจะทำจากสารผลึกของควอตซ์หรือเซรามิค ซึ่งมี

คุณสมบัติในการเกิดประจุไฟฟ้าเมื่ออยู่ภายใต้แรงกดดันหรือ piezoelectric effect ตามหลักการที่แสดงในรูป 2.18 การออกแบบหัววัดความเร่งแบบ piezoelectric แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แบบการอัดกด (compression) และแบบเฉือน (shear) ภายในตัวหัววัดจะมีวงจรขยายสัญญาณแบบ ICP (Integrated Circuit Piezoelectric amplifier) ดังแสดงตามรูป 2.19 ในการวัดการสั่นสะเทือนเพื่อติดตามแนวโน้มซึ่งใช้ในงานบำรุงรักษาเครื่องจักรกล เพื่อให้การวัดค่าถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือในการใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจและวางแผนงานที่สำคัญ มีหลักสำคัญที่เกี่ยวข้องกับหัววัดความเร่ง 3 ข้อ (30) คือ

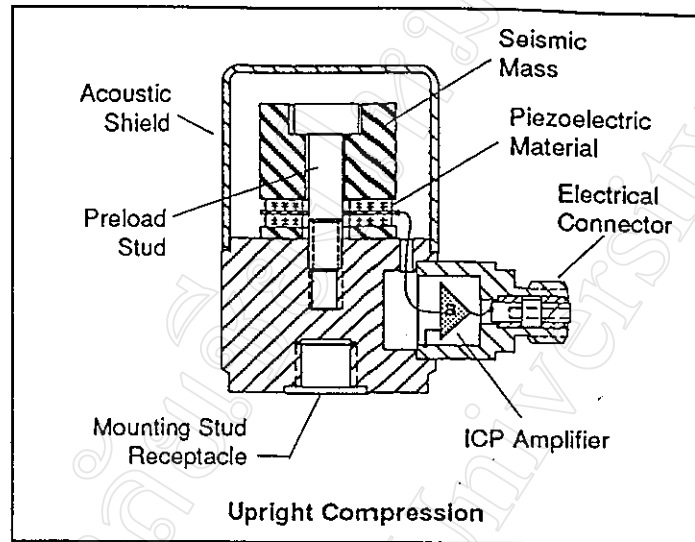
2.7.1 การเลือกหัววัดความเร่ง ต้องคำนึงถึงลักษณะการออกแบบของหัววัด ช่วงของความสามารถที่วัดได้ เช่น ความถี่ แอมพลิจูด แรงกระแทกสูงสุด ฯลฯ สภาพแวดล้อมในการนำไปใช้งาน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรดหรือด่าง เพื่อให้มีอายุการใช้งานได้นาน ๆ

2.7.2 รอบการปรับแต่งหรือตรวจสอบหัววัด ควรพิจารณาลักษณะการใช้งาน ระยะเวลาของการใช้งานและสภาพแวดล้อมในการใช้งาน เป็นองค์ประกอบที่ต้องคำนึงถึงในการกำหนดระยะเวลาเพื่อทำการตรวจสอบความเที่ยงตรงของหัววัด เช่น หัววัดความเร่งที่มีการใช้งานทุกวัน ควรมีการตรวจสอบทุก 3 เดือนหรือทุก 6 เดือน

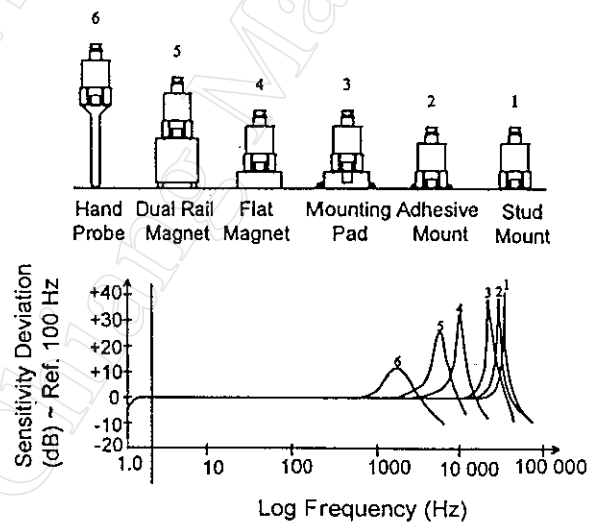
2.7.3 การติดตั้ง การติดตั้งหัววัดความเร่งแบ่งวิธีการสำคัญ ๆ ได้ 4 อย่างคือ การติดตั้งโดยใช้สลักเกลียว (stud) การติดตั้งโดยใช้กาวประเภทต่าง ๆ การติดตั้งโดยใช้แม่เหล็ก และการใช้มือถือหัววัดขณะทำการวัด การติดตั้งหัววัดตัวเดียวกัน แต่แตกต่างกันในวิธีการ จะให้ค่า frequency response ที่ต่างกัน เนื่องจากการติดตั้งที่แตกต่างกันจะให้ค่า mounted resonance ที่ต่างกันตามรูป 2.20 หรือโดยสรุปคือ หัววัดความเร่งยิ่งห่างจากผิวที่ทำการวัดมากเท่าใด ค่า mounted resonance ก็ยิ่งต่ำลงเท่านั้น การใช้ประโยชน์ในการวัดที่ความถี่สูงก็จะต่ำลงไปด้วย



รูป 2.18 หลักการพื้นฐานของหัววัดความเร่งที่ทำจากวัสดุ piezoelectric material



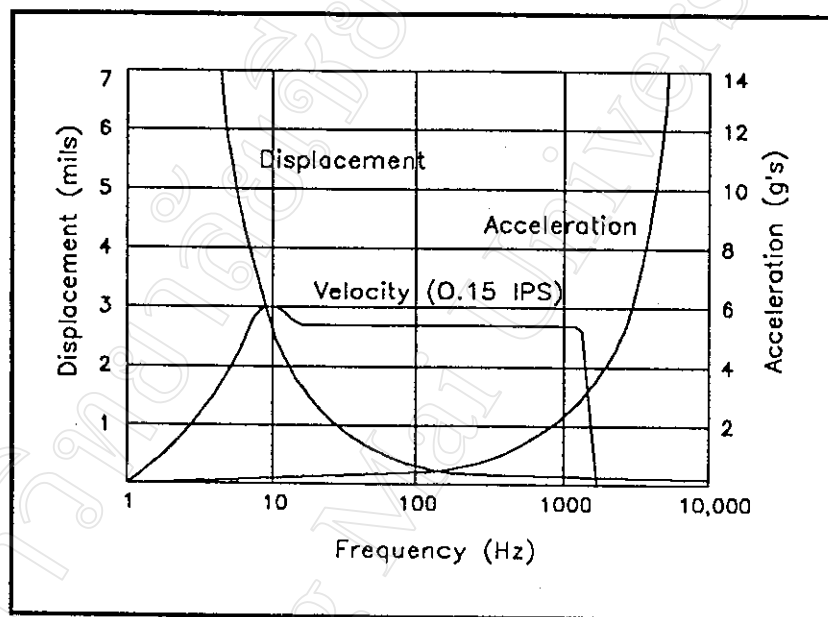
รูป 2.19 โครงสร้างภายในหัววัดความเร่งแบบ piezoelectric แบบกดอัด (compression)



รูป 2.20 Mounted resonance เปลี่ยนแปลงตามวิธีการติดตั้งหัววัดความเร่ง

นอกจากนี้การเตรียมผิวสำหรับติดตั้งหัววัดก็จะมีผลต่อค่า frequency response ด้วย สภาพผิวควรมีสภาพที่ราบเรียบ สะอาด และรูเจาะสลักเกลียวต้องฉากกับผิว การใช้จารบีแบบซิลิโคน(silicone grease)หรือฟิล์มบาง ๆ ของน้ำมันหล่อลื่นจะช่วยให้การส่งผ่านสัญญาณดีขึ้น และช่วยเพิ่ม frequency response ให้สูงขึ้นอีกเล็กน้อยด้วย

การใช้หัววัดความเร่งในการวัดค่าการสั่นสะเทือน ยังต้องคำนึงถึงหน่วยวัดที่ใช้ในการวัด หลักการโดยทั่วไป จะวัดระยะขจัดในช่วงความถี่ 0-200 Hz และวัดในหน่วยความเร็วในช่วงความถี่ 10-2,000 Hz สำหรับการวัดในหน่วยความเร่ง ควรวัดในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2,000 Hz สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรจะวัดในหน่วยของความเร่งหรือความเร็ว การวัดในหน่วยวัดของความเร่งจะมีข้อดีคือ ข้อมูลที่วัดได้เป็นข้อมูลโดยตรง ไม่ต้องมีขั้นตอนการ integrate ซึ่งจะทำให้ข้อมูลบางส่วนขาดหายไปได้ รูป 2.21 แสดง frequency response curves เปรียบเทียบหน่วยการวัดระหว่างระยะขจัด ความเร็วและความเร่ง และในภาคผนวก ผ ได้ แสดง spectrum จากการวัดจริง ซึ่งได้ผลทำนองเดียวกันกับรูป 2.21



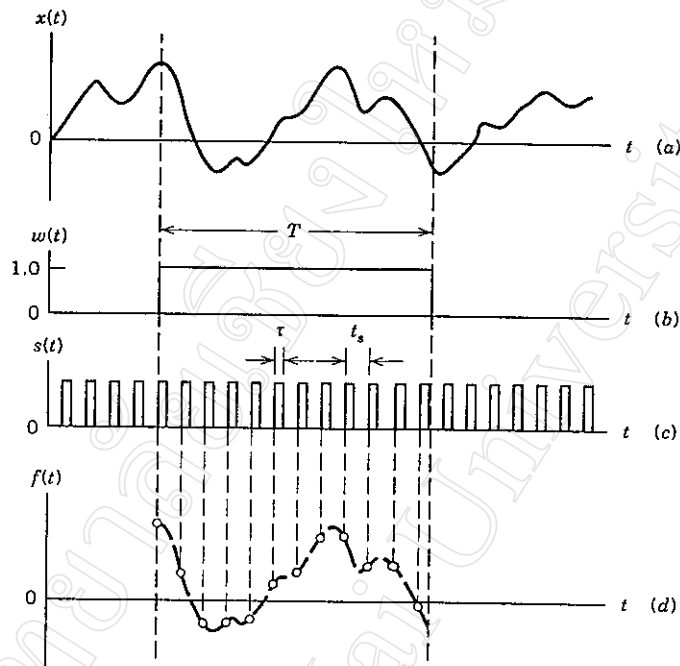
รูป 2.21 Frequency response curves เปรียบเทียบระยะขจัด ความเร็ว และความเร่ง

2.8 Window Functions และการเลือกใช้ (13, 15)

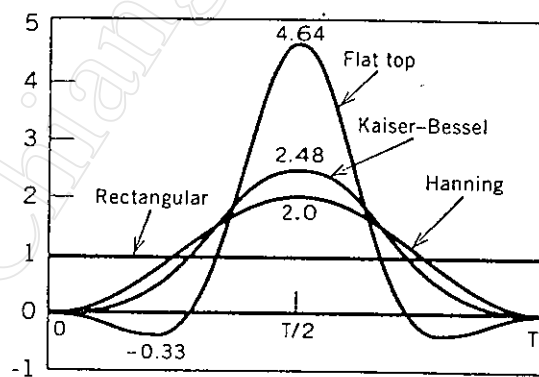
ในเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนแบบ digital frequency analyzer มีขั้นตอนการเก็บตัวอย่างข้อมูล (time sampling process) 4 ขั้นตอน คือ เริ่มที่ analog signal, window function, sampling function และ digitized function ตามที่แสดงในรูป 2.22

ในเครื่องมือ FFT analyzer ใช้ window function เพื่อต้องการให้จุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของการเก็บข้อมูลมีค่าแอมพลิจูดเป็นศูนย์ เพื่อลดการรั่วของสัญญาณในช่วงเก็บข้อมูล window function จึงเป็นเหมือนการบังคับ ข้อมูลให้เป็นไปตามที่ต้องการ จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลได้ ดังแสดงตามรูป 2.23 ซึ่งแสดง characteristic ของ window function ทั้ง 4 แบบ โดยแต่ละแบบเหมาะกับการใช้งานแตกต่างกัน เช่น Hanning window เหมาะกับการวัดการสั่นสะเทือนทั่วไปและมีลักษณะสัญญาณเป็นคาบ Kaiser-Bessel window เหมาะกับงานที่มีความถี่ใกล้เคียงกันมาก แต่ค่าแอมพลิจูดแตกต่างกันมาก flat-top window เหมาะกับงานที่สนใจค่าแอมพลิจูด แต่ไม่ต้องการรายละเอียดในการแยกความถี่ ส่วน rectangular

หรือ uniform window เหมาะกับสัญญาณที่เป็น transient เช่น ใช้ในการทำ bump test หรือ impact test เพราะ window แบบนี้ส่งผ่านสัญญาณทั้งหมดโดยไม่ให้น้ำหนักเท่ากันตลอดช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่าง



รูป 2.22 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างข้อมูล 4 ขั้นตอนใน digital frequency analyzer



รูป 2.23 Characteristic ของ window function ทั้ง 4 แบบ ใน time domain