บทที่ 8
การวัดและการจัดการสัญญาณการสั่นสะเทือนเบื้องต้น

1. บทนำ

ในบทที่ผ่านๆ มา เราได้ศึกษาถึงหลักการของการเกิดการสั่นสะเทือน และลักษณะการสั่นสะเทือนเนื่องจากการกระตุ้นรูปแบบต่างๆ รวมถึงวิธีการที่จะควบคุมการสั่นสะเทือน ในการตรวจสอบถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์และการออกแบบระบบการสั่นสะเทือน การวัดและการทดสอบการสั่นสะเทือนจึงเป็นเรื่องจำเป็น สำหรับในบทนี้จะกล่าวนำให้รู้จักถึงวิธีการวัดและการจัดการสัญญาณการสั่นสะเทือน และตัวอย่างของประโยชน์ของการวัดการสั่นสะเทือนในระดับเบื้องต้นเท่านั้น โดยวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนหรือวิธีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งไม่ได้รวมอยู่ในขอบเขตของวิชา “การสั่นสะเทือนทางกลเบื้องต้น” จะไม่กล่าวถึงในที่นี้

2. ความสำคัญของการวัดการสั่นสะเทือน

การใช้ประโยชน์จากการทดสอบการสั่นสะเทือนอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ด้านใหญ่ๆ ได้แก่

1. การทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบการสั่นสะเทือน และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการสั่นสะเทือน: ในการศึกษาการสั่นสะเทือนมักจะต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการสั่นสะเทือน และสร้างสมการการเคลื่อนที่เพื่อทำนายลักษณะการสั่นสะเทือนของระบบ ดังที่ได้กล่าวถึงในบทก่อนๆ อย่างไรก็ตามการที่จะสามารถคำนวณตามสมการที่สร้างมาได้นั้น จำเป็นที่จะต้องทราบพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ก่อน บางพารามิเตอร์เช่น มวล (m) อาจหาได้โดยการชั่งน้ำหนักตรงอย่างไรก็ตามในหลายๆ กรณีพารามิเตอร์ เช่น ความหน่วง (c) โมเมนต์ความเฉื่อย (J) ค่าความแข็งเกร็ง (k) ไม่อาจหาได้โดยง่ายจึงจำเป็นที่จะต้องหาจากการทดสอบการสั่นสะเทือน เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะทำให้สามารถทำนายลักษณะการสั่นสะเทือน ความถี่ธรรมชาติ และ Mode shapes ของการสั่นสะเทือนได้ ซึ่งความถูกต้องของค่าความถี่ธรรมชาติและ Mode shapes ที่คำนวณได้ ก็สามารถตรวจสอบได้จากการวัดการสั่นสะเทือนเช่นกัน

2. ใช้เพื่อทดสอบความแข็งแรงทนทานของผลิตภัณฑ์ เช่น การทดสอบความเสียหายจากการกระแทก การทดสอบการตกกระแทก การทดสอบความล้าจากแรงที่กระทำกลับไปกลับมาซ้ำๆ

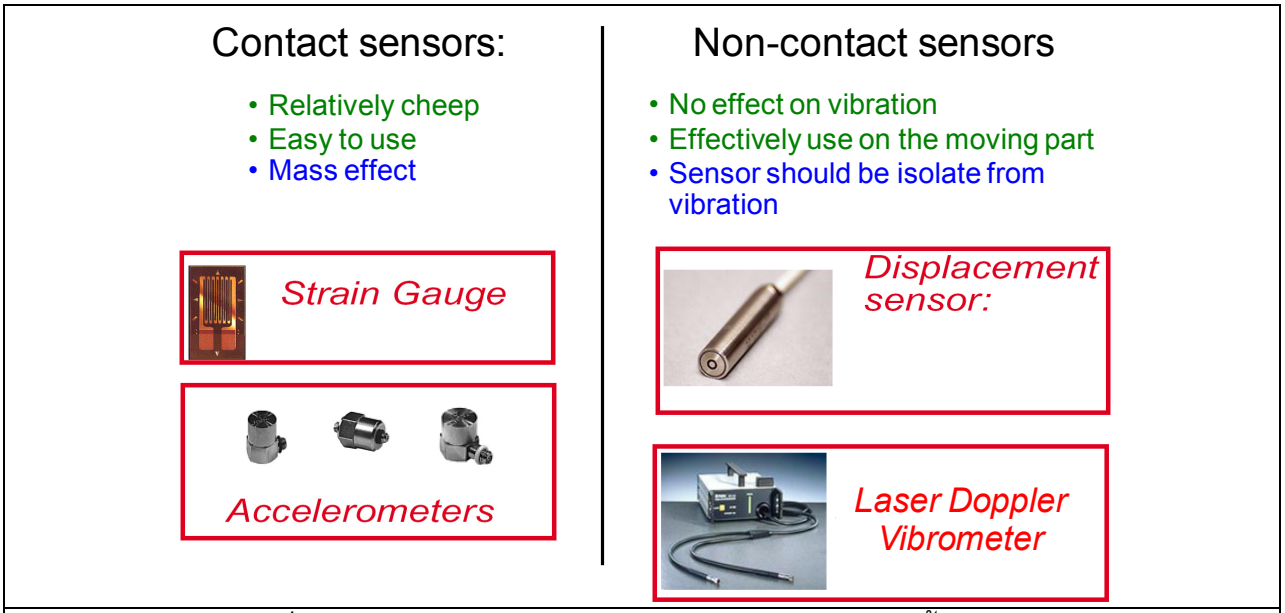
3. ใช้เพื่อตรวจสอบสภาพของเครื่องจักร โดยในสภาวะการทำงานปกติ เครื่องจักรอาจมีขนาดการสั่นสะเทือน และมีความถี่การสั่นสะเทือนอยู่ค่าหนึ่ง แต่หากมีความผิดปกติ หรือความเสียหายเกิดขึ้นจะส่งผลให้ขนาดการสั่นสะเทือนเพิ่มสูงขึ้น และอาจเกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม การวัดขนาดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรโดยสม่ำเสมอจึงเป็นการตรวจสอบสภาพของเครื่องจักร และทำให้ตรวจพบความเสียหายตั้งแต่ขณะเริ่มต้นได้

3. อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการวัดการสั่นสะเทือน

ระบบการวัดการสั่นสะเทือนประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ 1. ชิ้นงานที่ต้องการวัดการสั่นสะเทือน 2. เซ็นเซอร์ (Sensors) 3. ตัวกระตุ้น (Actuators) 4. เครื่องขยายสัญญาณ (Signal amplifiers) และ 5. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal analyzers) ในที่นี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบที่สำคัญบางส่วนดังนี้

3.1 <u>เซ็นเซอร์</u>

เซ็นเซอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้เปลี่ยนแรงหรือการเคลื่อนที่ทางกลให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนอาจวัดปริมาณที่เป็นการขจัด ความเร็ว หรือความเร่งก็ได้ขึ้นกับชนิดและหลักการของเซ็นเซอร์ เซ็นเซอร์อาจแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการติดตั้งได้แก่ เซ็นเซอร์ที่สัมผัสกับชิ้นงาน และเซ็นเซอร์ที่ไม่สัมผัสกับชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 8.1 โดยเซ็นเซอร์ที่สัมผัสกับชิ้นงานมักจะมีราคาถูก ใช้งานง่าย แต่เนื่องจากเซ็นเซอร์ติดอยู่กับชิ้นงาน มวลของเซ็นเซอร์จึงอาจมีผลต่อมวลรวมของระบบการสั่นสะเทือนได้ ดังนั้นการจะวัดการสั่นสะเทือนได้อย่างถูกต้องมวลของเซ็นเซอร์จึงต้องมีขนาดน้อยกว่ามวลของระบบมากๆ ตัวอย่างของเซ็นเซอร์ที่ติดกับชิ้นงานได้แก่ สเตรนเกจ (Strain gauge) Siesmic velocity transducer หรือที่พบเห็นกันมากที่สุดก็คือ Accelerometer สำหรับเซ็นเซอร์ที่ไม่สัมผัสกับชิ้นงานนั้นจะมีข้อดีคือตัวเซ็นเซอร์จะไม่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบ อย่างไรก็ตามการติดตั้งของเซ็นเซอร์ต้องระวังไม่ให้เซ็นเซอร์ได้รับผลของการสั่นสะเทือนของชิ้นงานด้วย ตัวอย่างของเซ็นเซอร์ชนิดนี้ได้แก่ proximity sensor ซึ่งใช้หลักการของการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง หรือ Laser Doppler vibrometer ซึ่งใช้หลักการของปรากฏการณ์ Doppler ในการวัดสัญญาณความเร็ว



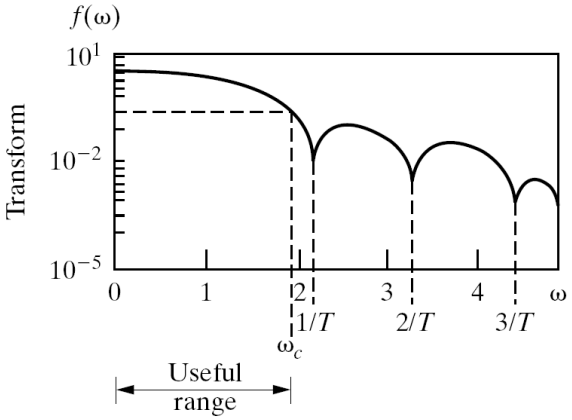
รูปที่ 8-1 ตัวอย่างเซ็นเซอร์ แบ่งตามลักษณะการสัมผัสกับชิ้นงาน [1]

3.2 ตัวกระตุ้นการสั่นสะเทือน (Actuators)

ตัวกระตุ้นการสั่นสะเทือนเป็นอุปกรณ์ที่ให้แรงกระตุ้นกับระบบ ตัวกระตุ้นที่พบเห็นกันบ่อยๆ ได้แก่ Impulse hammer ดังแสดงในรูปที่ 8.2 (ก) ซึ่งทำหน้าที่สร้างแรงกระตุ้นแบบ Impulse กับระบบ ทำให้ระบบสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของมัน โดยช่วงความถี่ที่กระตุ้นได้จะสัมพันธ์กับคาบเวลาที่เกิดการกระแทกดังแสดงในรูปที่ 8-2 (ข) ตัวกระตุ้นที่ใช้กันมากอีกชนิดหนึ่งได้แก่ Vibration shaker ตัวแสดงในรูปที่ 8-3 ตัวกระตุ้นนี้จะให้การกระตุ้นได้หลากหลาย ทั้งการกระตุ้นลักษณะเป็นคาบซึ่งปรับค่าความถี่หรือขนาดได้ หรือการกระตุ้นแบบสุ่ม

http://www.pcb.com/Products/model/086D05

(ก)



(ข)

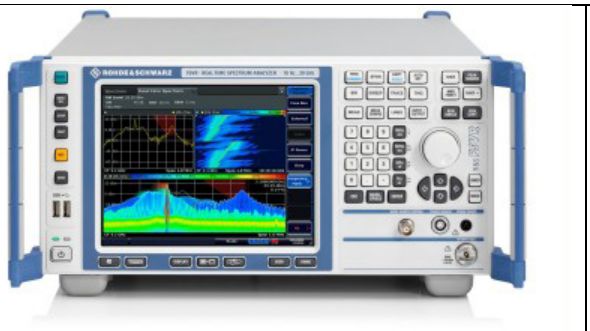
รูปที่ 8-2 Impulse hammer และช่วงใช้งาน [2], [3]

http://www.sentekdynamics.com/medium-force-shakers/

รูปที่ 8-3 Vibration shaker [4]

3.3 ตัววิเคราะห์สัญญาณ (Signal analyzers)

ตัววิเคราะห์สัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ใช้บันทึกสัญญาณ และจัดการสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ต่อไป โดยอาจมีส่วนขยายสัญญาณ (Signal amplifiers) รวมอยู่ด้วย ตัวอย่างเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแสดงในรูปที่ 8-4 ในปัจจุบันตัววิเคราะห์สัญญาณมีฟังก์ชั่นการทำงานที่หลากหลาย ซึ่งรวมถึง การบันทึกลักษณะสัญญาณในโดเมนเวลา การกรองสัญญาณ (filtering) การแปลงสัญญาณเป็นโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) การหาค่าฟังก์ชั่นการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response Function) เป็นต้น เครื่องวิเคราะห์สัญญาณบางรุ่นถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก และสามารถพกพาไปวัดการสั่นสะเทือนที่หน้างานได้ จึงเหมาะกับการวัดการสั่นสะเทือนในงานการตรวจสอบสภาพของเครื่องจักรในการซ่อมบำรุง

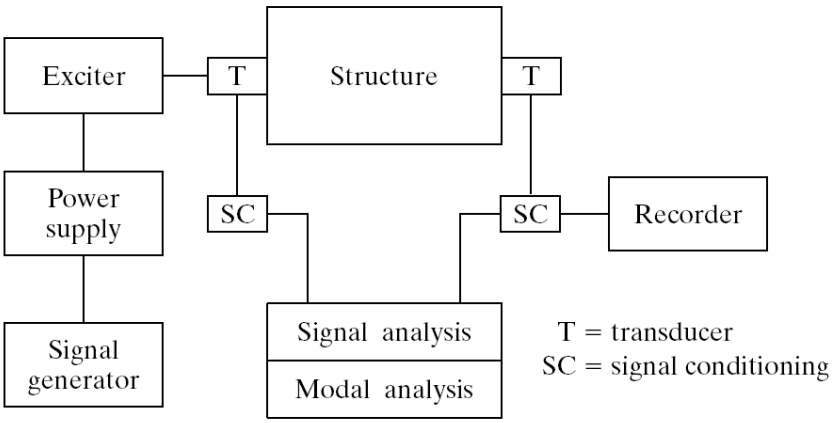


https://www.rohde-schwarz.com/us/product/fsvr-productstartpage_63493-11047.html

http://www.tek.com/spectrum-analyzer

รูปที่ 8-4 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ [5], [6]

ตัวอย่างระบบการวัดการสั่นสะเทือนที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ข้างต้นแสดงในรูปที่ 8-5 โดย structure ในรูปแสดงถึงชิ้นงานที่ต้องการวัดการสั่นสะเทือน ชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นโดย Exciter (Actuator) โดยรูปแบบการกระตุ้นถูกกำหนดโดยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) สำหรับการวัดสัญญาณเริ่มด้วย Transducer (sensors) ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณแรง หรือการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน และเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สัญญาณรบกวน หรือสัญญาณความถี่สูงที่ไม่เกี่ยวข้องจะถูกกรองออกด้วย Signal conditioner ก่อนที่จะถูกบันทึกด้วย Recorder หรือถูกวิเคราะห์ต่อด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ Signal analyzer โดยในตัวอย่างนี้ข้อมูลทั้งหมดจะถูกรวบรวมเพื่อทำการวิเคราะห์โมดัล (Modal analysis) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบต่อไป



รูปที่ 8-5 ตัวอย่างระบบการวัดการสั่นสะเทือน [3]

4. การวัดการสั่นสะเทือนเบื้องต้น

4.1 <u>การเลือกปริมาณการสั่นสะเทือนเพื่อวัด</u>

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่ได้กล่าวถึงในบทก่อนหน้าทั้งหมด ขนาดการสั่นสะเทือนจะแสดงออกมาในรูปของการขจัด อย่างไรก็ตามเนื่องจากการขจัดมีความสัมพันธ์กับความเร็วและความเร่ง การวัดความเร็วและความเร่งก็อาจใช้เพื่อแสดงการสั่นสะเทือนได้ พิจารณาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขจัด ความเร็วและความเร่ง ต่อไปนี้

$$x = X\cos(\omega t + \phi) \tag{8-1}$$

$$v = -\omega X\sin(\omega t + \phi) \tag{8-2}$$

$$a = -\omega^2 X\cos(\omega t + \phi) \tag{8-3}$$

1. เนื่องจากพลังงานเป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับความเร็ว เช่น พลังงานจลน์เป็นฟังก์ชั่นของความเร็วยกกำลังสอง ดังนั้นความเร็วจึงเป็นปริมาณพื้นฐานตัวหนึ่งที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือน

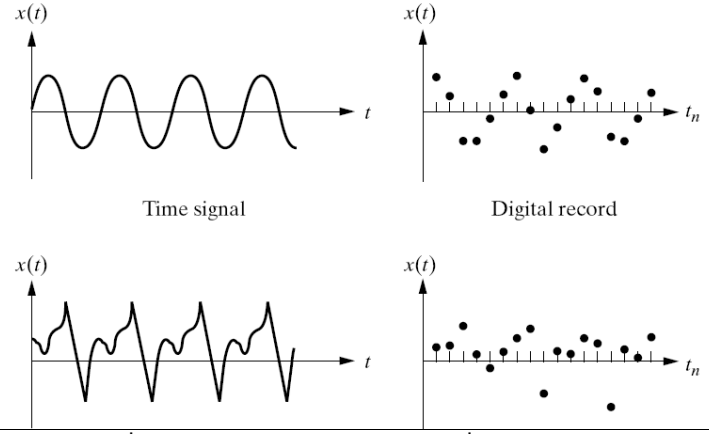
2. จากสมการจะพบว่าหากขนาดของการขจัดเป็น X ขนาดของความเร็วและความเร่งจะหาได้โดยคูณขนาดของการขจัดด้วย ความเร็วเชิงมุม ω หรือ ω^2 ตามลำดับ ดังนั้นหากการสั่นสะเทือนเกิดที่ความถี่สูง ขนาดความเร่งก็จะมีค่ามากกว่าความเร็วและการขจัด ด้วยเหตุนี้ในการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรโดยทั่วๆ ไปที่มักมีความถี่สูง (>1000 Hz) จึงวัดปริมาณที่เป็นความเร่ง ในทางตรงกันข้ามการวัดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำๆ (<10 Hz) เช่นการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว จึงอาจวัดขนาดของการขจัดแทน สำหรับการสั่นสะเทือนที่ความถี่ปานกลาง (10-1000 Hz) มักนิยมวัดความเร็ว

4.2 <u>สัญญาณดิจิตัลของการสั่นสะเทือน</u>

การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องวัดสัญญาณในปัจจุบันจะสุ่มวัดสัญญาณ โดยเวลาที่แต่ละจุดถูกสุ่มวัดจะห่างเท่าๆ กัน ลักษณะการสุ่มวัดสัญญาณแสดงดังรูปที่ 8-6 ความถี่ที่ใช้สุ่มวัดการสั่นสะเทือน

มีชื่อเรียกว่าความถี่สุ่มสัญญาณ Sampling frequency สำหรับช่วงเวลาที่แต่ละจุดข้อมูลห่างกันนั้นสามารถคำนวณได้จากความถี่สุ่มสัญญาณดังสมการ

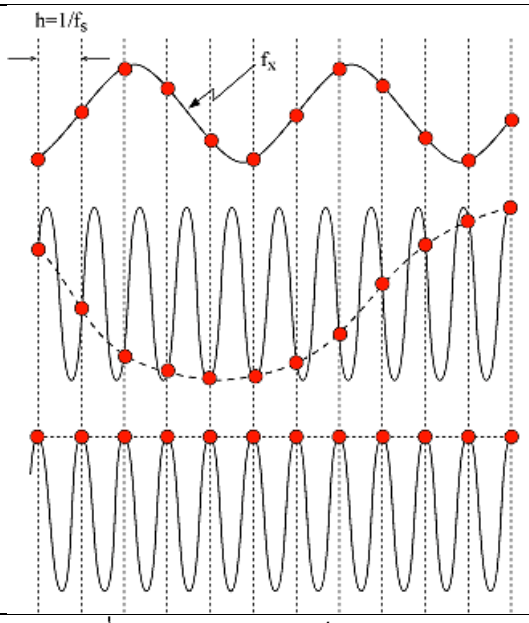
$$t = \frac{1}{\text{Sampling frequency}} \tag{8-4}$$



รูปที่ 8-6 ตัวอย่างการสุ่มวัดการสั่นสะเทือน [3]

จากรูปที่ 8-6 และสมการที่ (8-4) จะเห็นว่ายิ่งใช้ความถี่สุ่มสัญญาณสูงขึ้นเท่าใด ก็จะทำให้วัดสัญญาณได้ตรงกับลักษณะสัญญาณจริงมากขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามหากใช้ความถี่สุ่มสัญญาณสูงมากเกินไปก็จะส่งผลต่อจำนวนจุดข้อมูลที่ต้องจัดเก็บและดำเนินการต่อมากขึ้นเกินกว่าความจำเป็น โดยอาจได้รายละเอียดของข้อมูลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในทางตรงข้ามหากใช้จำนวนจุดความถี่สุ่มสัญญาณน้อยมากเกินไปแล้ว อาจจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Aliasing ขึ้นได้ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากสัญญาณที่สุ่มมีความถี่น้อยเกินไป จึงทำให้สัญญาณที่สร้างใหม่จากจุดข้อมูลที่สุ่มได้มีค่าความถี่ต่ำกว่าที่เกิดขึ้นจริง ตัวอย่างปรากฏการณ์นี้แสดงในรูปที่ 8-7 ในรูปที่ 8-7 จุดสีแดงแสดงจุดที่ทำการสุ่มสัญญาณส่วนเส้นทึบแสดงถึงสัญญาณที่ต้องการวัด รูปที่ 8-7 (บน) แสดงให้เห็นถึงการสุ่มสัญญาณที่มากเพียงพอ แนวของจุดสีแดงกับแนวของเส้นสัญญาณเป็นเช่นเดียวกันทำให้ทราบถึงลักษณะของสัญญาณตั้งต้นได้ แต่รูปกลางและรูปล่างจะพบว่าการสุ่มสัญญาณมีความถี่การสุ่มต่ำเกินไป เมื่อนำจุดข้อมูลที่สุ่มได้มาสร้างสัญญาณใหม่จึงได้สัญญาณที่ไม่ถูกต้อง และมีความถี่ต่ำกว่าความถี่สัญญาณจริง

การแก้ปัญหาการเกิด Aliasing นี้อาจทำได้โดยเลือกความถี่สุ่มสัญญาณให้มากกว่าความถี่ที่สนใจจะวัดไม่น้อยกว่า 2.5 เท่า ยกตัวอย่างเช่น หากทราบว่าความถี่สูงสุดที่อาจเกิดขึ้นในเครื่องจักรมีค่า 5000 Hz ก็ควรสุ่มสัญญาณที่ความถี่ไม่ต่ำกว่า $2.5 \times 5000 = 12500$ Hz นอกจากการเลือกความถี่สุ่มสัญญาณให้เหมาะสมแล้ว ก็อาจใช้ Antialiasing filter ซึ่งเป็น Low-pass filter แบบหนึ่งซึ่งจะตัดความถี่ที่สูงเกินกว่าที่สนใจออกไป



รูปที่ 8-7 ปรากฏการณ์ Aliasing [7]

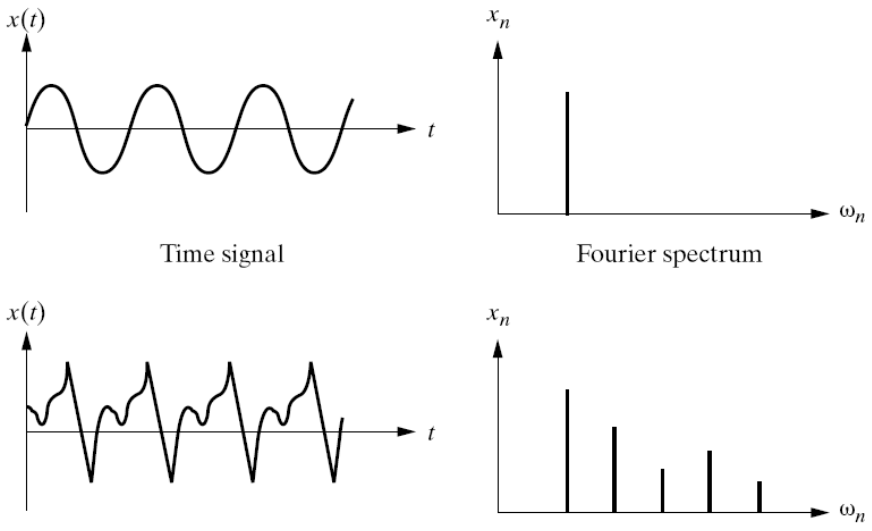
5. การวิเคราะห์ฟูเรียร์

การวิเคราะห์สัญญาณพื้นฐานที่ใช้กันมากคือ การเปลี่ยนสัญญาณในโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier transform) หลักการของการแปลงฟูเรียร์มีความคล้ายคลึงกับการเขียนสัญญาณที่เป็นฟังก์ชั่นคาบ ให้เป็นผลรวมของฟังก์ชั่นไซนูซอยด์ดังที่กล่าวมาในบทที่ 5 โดยสมการที่ใช้ในการแปลงฟูเรียร์คือ

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t}dt \qquad (8\text{-}5)$$

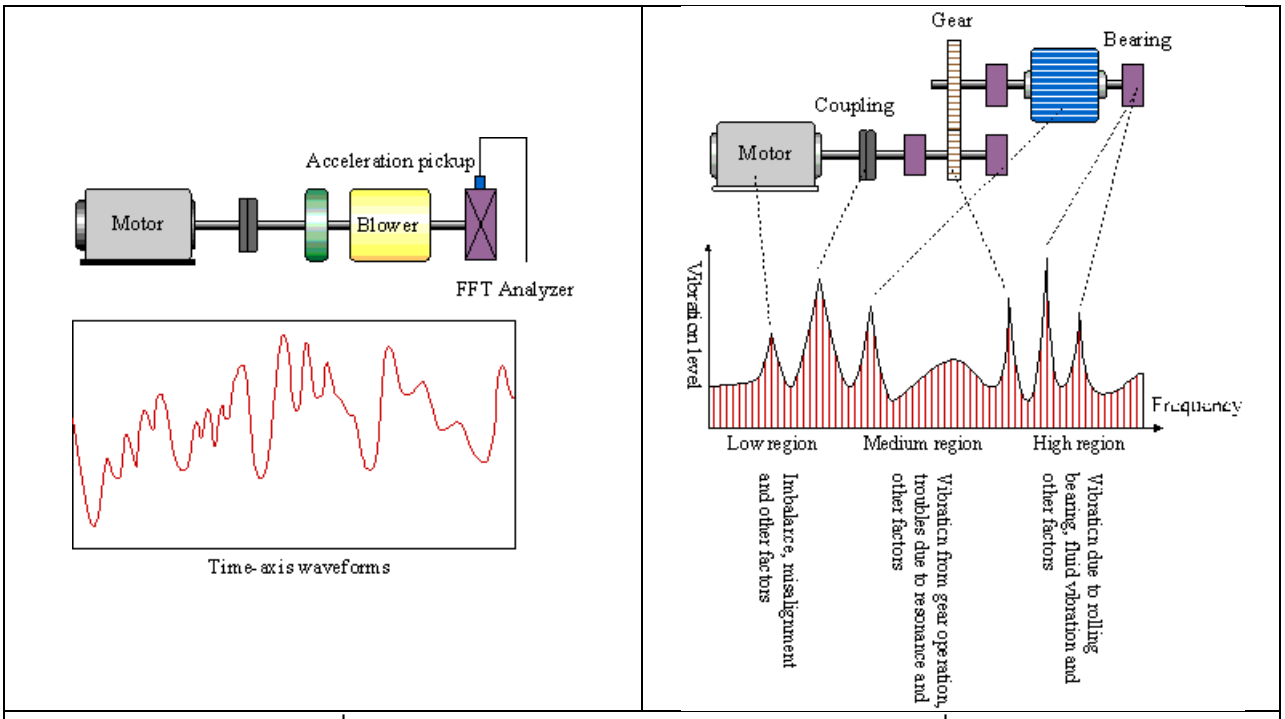
โดย $X(\omega)$ คือสัญญาณในโดเมนความถี่ และ $x(t)$ คือสัญญาณในโดเมนเวลา สำหรับตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 8-8 โดยสัญญาณที่เป็นฟังก์ชั่นไซนูซอยด์ในตัวอย่าง คือ $x(t) = X\cos(\omega t - \pi/2) = X\sin(\omega t)$ เมื่อแปลงเป็นโดเมนความถี่ จะแสดงด้วยเส้นในแนวดิ่ง ซึ่ความสูงของเส้นหมายถึงขนาดของสัญญาณ X และเกิดที่ตำแหน่งในแกนนอน ซึ่งเท่ากับความถี่ ω ของสัญญาณ จะสังเกตว่าข้อมูลเฟส จะไม่แสดงในสเปคตรัมในรูปที่ 8-8 อย่างไรก็ตามในการแปลงฟูเรียร์ จะได้ข้อมูลของค่าเฟสออกมาเช่นกัน ซึ่งอาจจะแสดงได้ด้วยกราฟของค่าเฟสในโดเมนความถี่

สำหรับตัวอย่างในรูปล่างแสดงให้เห็นว่า สัญญาณเป็นคาบในโดเมนเวลา แสดงได้ด้วยเส้นในแนวดิ่งหลายๆ เส้นที่ความถี่ต่างๆ กัน เมื่อแปลงเป็นโดเมนความถี่ ซึ่งหมายความว่า สัญญาณเป็นคาบในโดเมนเวลา เกิดจากผลรวมของฟังก์ชั่นไซนูซอยด์ หลายๆ ความถี่ ซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน



รูปที่ 8-8 สัญญาณในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ [3]

ตัวอย่างการใช้การแปลงฟูเรียร์เพื่อวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ในงานการตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักรแสดงดังรูปที่ 8-9 รูปทางด้านซ้ายมือแสดงการวัดการสั่นสะเทือนของระบบของเครื่องจักร และแสดงผลมาในโดเมนเวลา เนื่องจากการสั่นสะเทือนอาจเป็นผลมาจากเครื่องจักรต่างๆ และจากสาเหตุต่างๆ ผลการวัดในโดเมนเวลาจึงเป็นผลรวมของสัญญาณและมีความซับซ้อน ยากต่อการวิเคราะห์ สำหรับในตัวอย่างทางด้านขวามือ เป็นการแสดงข้อมูลในโดเมนความถี่ เนื่องจากยอดของสัญญาณแต่ละยอดที่แสดงในกราฟสเปคตรัม จะสอดคล้องกับความถี่ในการทำงานของชิ้นส่วนของเครื่องจักร จึงทราบได้ว่ายอดของสัญญาณแต่ละยอดเป็นผลมาจากเครื่องจักรตัวใด โดยในรูปยอดที่ความถี่ต่ำๆ เป็นผลมาจากการหมุนของมอเตอร์ การประกอบของคับปลิ้ง ส่วนยอดที่มีความถี่สูงๆ เป็นผลมาจากการขบกันของเฟือง และการทำงานของตลับลูกปืน เมื่อขนาดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ใดมีค่ามากผิดปกติ ก็อาจตรวจสอบย้อนกลับไปถึงชิ้นส่วนที่ทำงานนั้นๆ ได้



รูปที่ 8-9 ตัวอย่างการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ [7]

6. สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวนำให้เห็นถึงความสำคัญของการวัดและการทดสอบการสั่นสะเทือน โดยได้เริ่มกล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆ ของการวัดการสั่นสะเทือน ซึ่งได้แก่ เซ็นเซอร์ ตัวกระตุ้น เครื่องขยายสัญญาณ และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ จากนั้นได้กล่าวถึงการวัดการสั่นสะเทือนเบื้องต้น โดยการวัดสัญญาณที่มีความถี่ต่ำเหมาะที่จะวัดการขจัด ที่ความถี่กลางๆ จะวัดความเร็ว ส่วนที่ความถี่สูงมักจะวัดความเร่ง การวัดสัญญาณจะวัดออกมาเป็นสัญญาณดิจิตัล ซึ่งต้องมีการสุ่มความถี่วัดสัญญาณให้มากเพียงพอ ในส่วนท้ายของบทได้กล่าวถึงการแปลงสัญญาณในโดเมนเวลา ให้เป็นโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ และได้แนะนำให้เห็นประโยชน์ของการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ด้วย

References

1. Jintanawan, T., 2004, Introduction to Mechanical Vibration
2. http://www.pcb.com/Products/model/086D05
3. Inman, D. J., 2001, Engineering Vibration, 2nd edition, Prentice Hall.
4. http://www.sentekdynamics.com/medium-force-shakers/
5. https://www.rohde-schwarz.com/us/product/fsvr-productstartpage_63493-11047.html
6. http://www.tek.com/spectrum-analyzer
7. https://www.onosokki.co.jp/English/hp_e/whats_new/SV_rpt/SV_5/sv5.htm