บทที่2
ทฤษฎีของการวิเคราะห์สัญญาณ

2-1 บทนำ

การสั่นสะเทือน คือ ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุภายใต้แรงกระทำซึ่งอาจเป็นแรงภายในหรือแรงภายนอกก็ได้ การสั่นสะเทือนอาจเกิดจากสาเหตุหลายๆอย่าง เช่น การไม่สมดุลของเครื่องจักรที่หมุน การที่ชิ้นส่วนสองชิ้นเสียดสีกัน หรือการที่ชิ้นส่วนสองชิ้นที่เข้าคู่กันเกิดการหลุดหลวมทำให้เกิดการกระแทกกันของชิ้นส่วนเป็นต้น การสั่นสะเทือนเหล่านี้มักจะส่งผลถึงประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเครื่องจักร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนเพื่อจะได้สามารถจำกัดขนาดการสั่นสะเทือนให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

ในบทนี้จะเป็นกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการสั่นสะเทือน พารามิเตอร์ที่มีผลสำคัญต่อขนาดการสั่นสะเทือน และผลของการสนองของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพารามิเตอร์เหล่านั้นเพื่อเป็นพื้นฐานในการจำกัดขนาดของการสั่นสะเทือน

2-2 ประเภทของการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนมีหลายรูปแบบแต่จะแบ่งประเภทของการสั่นสะเทือนเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ

2-2-1) การสั่นสะเทือนแบบอิสระ(Free Vibration)

คือการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบภายใต้การกระทำของแรงภายในระบบโดยปราศจากแรงภายนอกกระทำ

2-2-2) การสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้น(Forced Vibration)

คือการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบอันเกิดจากแรงภายนอก และการสั่นสะเทือนนี้จะเป็นไปตามลักษณะของแรงภายนอกและความถี่ของแรงที่มากระตุ้นระบบ หากความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำนั้นตรงกับความถี่ธรรมชาติ(Natural Frequency)ของระบบเข้าก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์(Resonance) นั่นคือขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกขยายอย่างมากจนเกิดความเสียหายกับระบบได้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2-3 ชนิดของสัญญาณการสั่นสะเทือน (Type of Vibration Signal)

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องจักรจะสามารถนำมาช่วยในการบ่งบอกสภาพหรือข้อบกพร่องของเครื่องจักร พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดประกอบด้วย

2-3-1) ความถี่

2-3-2) ขนาดของการสั่นสะเทือน

2-3-3) มุมเฟส

2-3-1) ความถี่

ความถี่ในที่นี้หมายถึงความถี่ของการสั่นสะเทือน ซึ่งหากพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาก็จะหมายถึง จำนวนรอบของการสั่นสะเทือนต่อหน่วยเวลา ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้จะเป็น **CPM** (Cycle per Minute) พารามิเตอร์ความถี่นี้จะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงสภาพความเสียหายได้ถ้าหากนำพารามิเตอร์นี้ไปใช้กับสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

2-3-2) ขนาดของการสั่นสะเทือน

เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวที่ใช้บ่งบอกสภาพของเครื่องจักร โดยทั่วไปแล้วขนาดของการสั่นสะเทือนหากมีขนาดใหญ่ย่อมหมายถึงเครื่องจักรเริ่มมีปัญหา ขนาดการสั่นสะเทือนในปัจจุบันมีหลายชนิดแต่ที่นิยมใช้ได้แก่

1)การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement)

2)ความเร็ว (Velocity)

3)ความเร่ง (Acceleration)

2-3-3) มุมเฟส

จะเป็นค่าความแตกต่างของตำแหน่งชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนชิ้นหนึ่ง เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกชิ้นหนึ่ง มุมเฟสจะใช้เป็นข้อมูลบอกลักษณะการเคลื่อนที่ของตำแหน่งต่างๆบนเครื่องจักร

2-4 หน่วยวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

เมื่อสัญญาณการสั่นสะเทือนไม่ว่าจะเป็นการขจัด ความเร็ว หรือความเร่งนั้นอยู่ในรูปของคลื่นรูปไซน์หรือรูปเป็นคาบ ซึ่งจะมีทั้งค่าบวกและลบและมีค่าเปลี่ยนตามเวลา การบอกขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนในลักษณะโดยรวม (Overall Value of Vibration)ที่นิยมใช้กันมีดังต่อไปนี้คือ

1)ระดับยอดสูงสุด (Peak Level) เป็นการบอกค่าระดับสูงสุดของสัญญาณที่เบี่ยงเบนไปจากระดับศูนย์ ทั้งนี้มิได้คำนึงถึงลักษณะการสั่นสะเทือนอย่างอื่น

2)ระดับยอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดอีกยอดหนึ่ง(Peak to Peak Level) ซึ่งก็คือการบอกค่าขนาดของสัญญาณที่วัดจากจุดสูงสุดทางบวกกับจุดต่ำสุดทางลบ

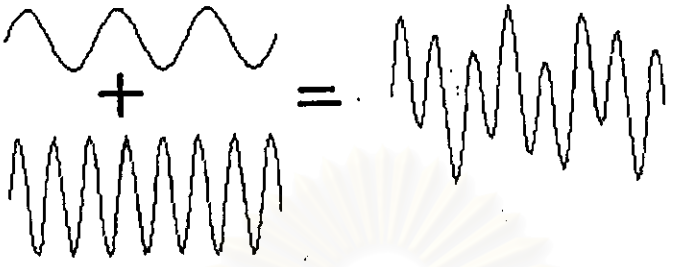
3)ค่าเฉลี่ย (Average Level) เป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งๆ ในกรณีทั่วๆไปที่สัญญาณการสั่นสะเทือนมีค่าเป็นทั้งบวกและลบเมื่อเทียบกับตำแหน่งสมดุล ซึ่งจะทำให้ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ค่าเฉลี่ยในกรณีนี้จะคิดโดยทำการเปลี่ยนเครื่องหมายของขนาดสัญญาณที่ลบให้เป็นบวก (Rectified)แล้วจึงคิดค่าเฉลี่ยออกมา

4)ค่าอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square,RMS)เป็นค่าที่ได้จากการนำสัญญาณที่วัดได้ในโดเมนเวลาที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งๆมายกกำลังสองแล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบและถอดรากที่สอง

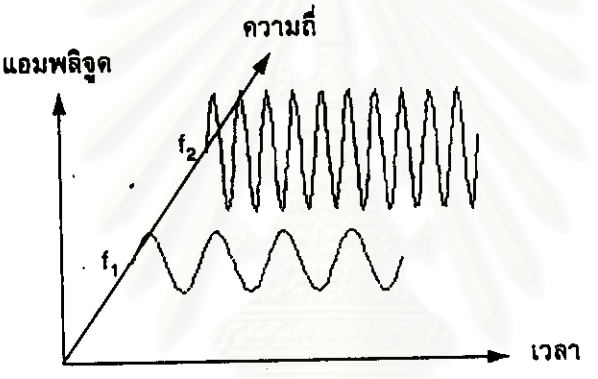
5)ค่าแฟกเตอร์เครสท์ (Crest Factor)เป็นค่าอัตราส่วนของ Peak Level กับ RMS Level ซึ่งค่าดังกล่าวจะให้ข้อมูลว่าลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้มีแนวโน้มเป็นการสั่นสะเทือนลักษณะแบบ กระแทก(Impulse)หรือแบบสุ่ม(Random) ในกรณีที่เป็นลักษณะแบบกระแทกค่าแฟกเตอร์เครสท์จะสูง ส่วนกรณีที่เป็นลักษณะสุ่มค่าแฟกเตอร์เครสท์จะต่ำ

2-5 โดเมนเวลาและโดเมนความถี่

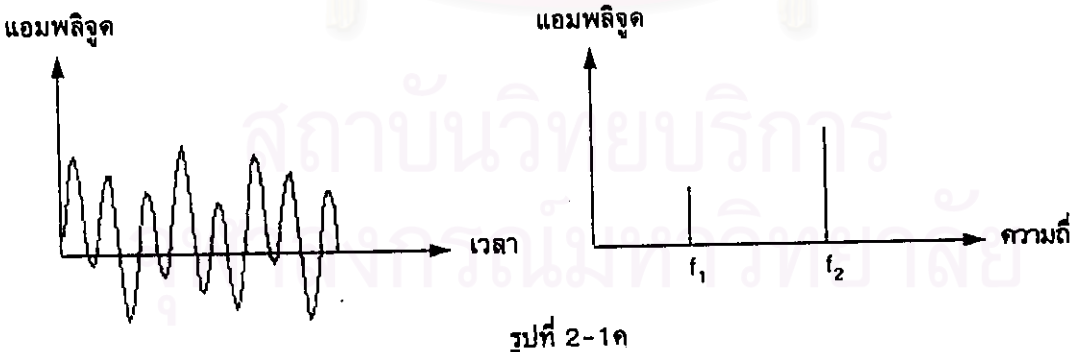
สัญญาณการสั่นสะเทือนที่แสดงบนจอภาพของออสซิโลสโคปนั้นแสดงอยู่บนโดเมนเวลาซึ่งมีแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดและแกนนอนเป็นเวลา เพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลของการสั่นสะเทือนมากขึ้นจึงมีอีกแนวทางหนึ่งซึ่งสัญญาณการสั่นสะเทือนถูกแสดงบนโดเมนความถี่ระหว่างแอมพลิจูดและความถี่ ฟูริเยร์(Fourier)พบว่าสัญญาณฮาร์มอนิก(Harmonic)ที่ซับซ้อนทุกชนิดสามารถแยกออกเป็นอนุกรม (series) ของคลื่นไซน์ง่ายๆได้ คลื่นไซน์แต่ละคลื่นมีแอมพลิจูด(Amplitude) และความถี่ต่างๆกัน รูปที่2.1 แสดงแนวคิดในการแยกคลื่นที่ซับซ้อนให้เป็นส่วนประกอบของคลื่นรูปไซน์ คลื่นไซน์สองคลื่นใน ก)รวมกันเป็นคลื่น ข)ในโดเมนเวลาดูแล้วซับซ้อนขึ้น รูป ค)แสดงคลื่นในสามมิติด้วยมุมมองต่างกันซึ่งแยกเป็นโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ สัญญาณหรือฟังก์ชันเป็นคาบ(Periodic Function)หนึ่งๆสามารถที่จะแยกออกเป็นคลื่นไซน์หลายๆคลื่นได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เอฟเอฟที (FFT analyzer) ซึ่งรับสัญญาณที่ซับซ้อนมาจากทรานส์ดิวเซอร์มาคำนวณ แล้วแสดงคลื่นไซน์แต่ละคลื่นด้วยแอมพลิจูด(Amplitude) บนโดเมนความถี่



รูปที่ 2-1ก



รูปที่ 2-1ข

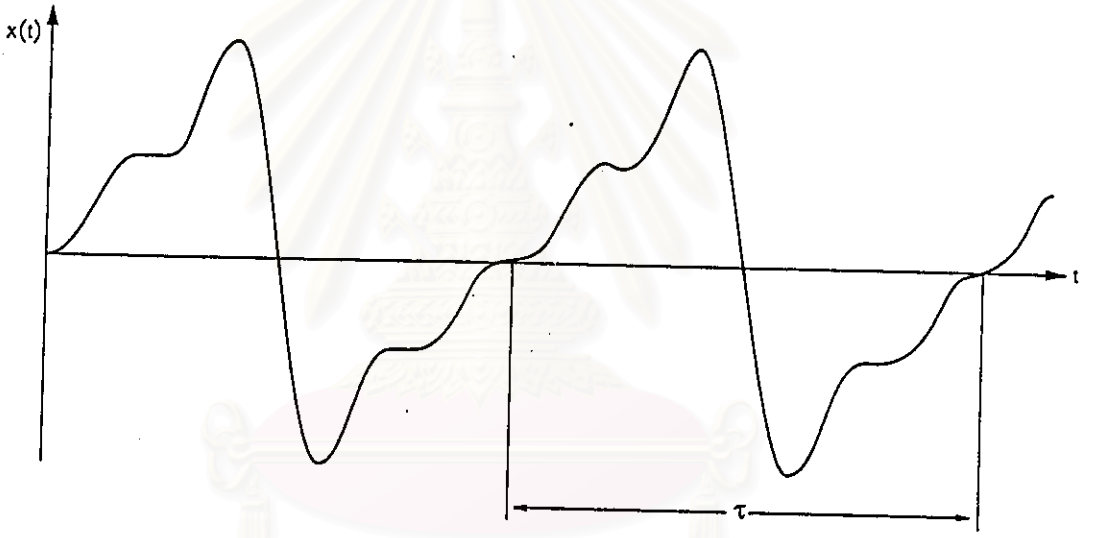


รูปที่ 2-1ค

รูปที่2-1 ความสัมพันธ์ในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

2-6 การแปลงแบบฟูริเยร์(Fourier Transform)

การสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้นนั้นแรงที่มากระตุ้นอาจจะเกิดจากสาเหตุต่างๆกัน ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก หรือไม่ใช่แบบฮาร์มอนิกก็ได้ แต่อาจเป็นการเคลื่อนที่แบบลักษณะเป็นคาบ (Periodic Motion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่มีรูปแบบเหมือนกันในแต่ละคาบ แต่ไม่ใช่รูปของคลื่นรูปไซน์



รูปที่ 2-2 การเคลื่อนที่แบบลักษณะเป็นคาบ

รูปการเคลื่อนที่แบบเป็นคาบนี้จะสามารถแยกเขียนออกมาเป็นผลรวมของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่างๆกันได้ โดยการใช้วิธีของฟูริเยร์ (Fourier)

อินทิกรัลของฟูริเยร์ทำให้สามารถแสดงฟังก์ชันทั่วๆไป f(t)ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆกันมากมายให้อยู่ในรูปของนิพจน์เดียวได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}F(\omega).e^{j\omega t}\,d\omega \qquad (2.1)$$

ปริมาณ $F(\omega)$ หาได้โดย

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t).e^{-j\omega t}\,dt \qquad (2.2)$$

เรียกสมการ (2.1) และ (2.2) ว่า อินทิกรัลของฟูริเยร์ (the Fourier intigral)หรือ การแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ของ f(t) ซึ่งเป็นการแปลงสัญญาณบนโดเมนเวลา f(t) ให้เป็นสัญญาณบน โดเมนความถี่ $F(\omega)$ สมการดังกล่าวมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) ซึ่งมีช่วงเวลาหรือคาบเข้าสู่อนันต์

ทฤษฎีอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) กล่าวว่าเราสามารถที่จะแยกฟังก์ชันทั่วไป f(t) ออกเป็นอนุกรมตรีโกณมิติภายในช่วงเวลา $(-\tau/2,\tau/2)$ ได้กล่าวคือ

ถ้าให้ x(t) ในรูปที่ 2-2 เป็นการเคลื่อนที่แบบเป็นคาบที่มีคาบเท่ากับ τ จะสามารถเขียน x(t) เป็นสมการอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) ได้ดังนี้

$$x(t)=\frac{a_0}{2}+a_1\cos\omega_1 t+a_2\cos\omega_2 t+....+b_1\cos\omega_1 t+b_2\cos\omega_2 t+.... \qquad (2.3)$$

โดยที่ $\omega_1=\frac{2\pi}{\tau},\omega_n=n\omega_1;n=1,2,3,....$

และค่าสัมประสิทธิ์ a_n และ b_n หาได้จาก

$$a_n=\frac{2}{\tau}\int_{\frac{-\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}}x(t)\cos\omega_n t\,dt \qquad (2.4)$$

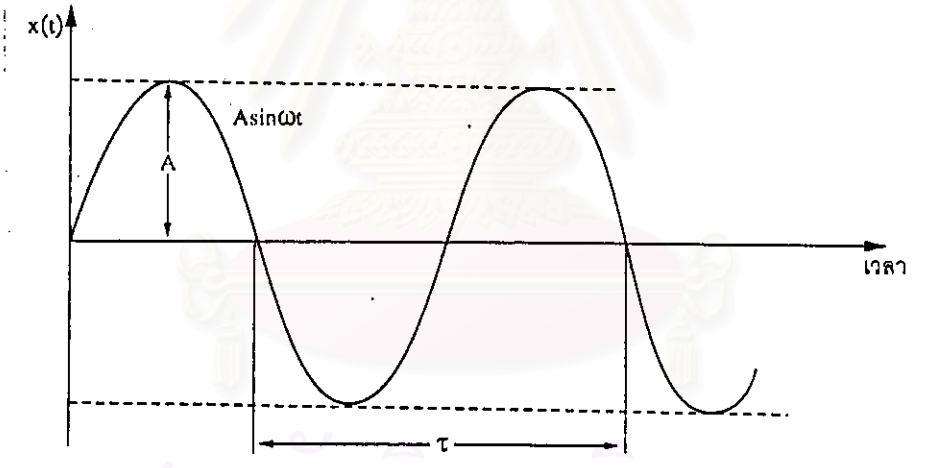
$$b_n=\frac{2}{\tau}\int_{\frac{-\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}}x(t)\sin\omega_n t\,dt \qquad (2.5)$$

และถ้าขยายผลลำดับนี้จนค่า τ เข้าสู่ค่าอนันต์แล้วจะได้ฟังก์ชัน f(t) เป็นอินทริกรัลตามสมการณ์ (2.1)

ในปัจจุบันด้วยวิทยาการที่ก้าวหน้าของคอมพิวเตอร์แบบดิจิตอล การแปลงสัญญาณลักษณะเป็นคาบมาเป็นสัญญาณบนแกนความถี่นั้นจะกระทำด้วยขั้นตอนที่เรียกว่า การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transfer ; FFT)

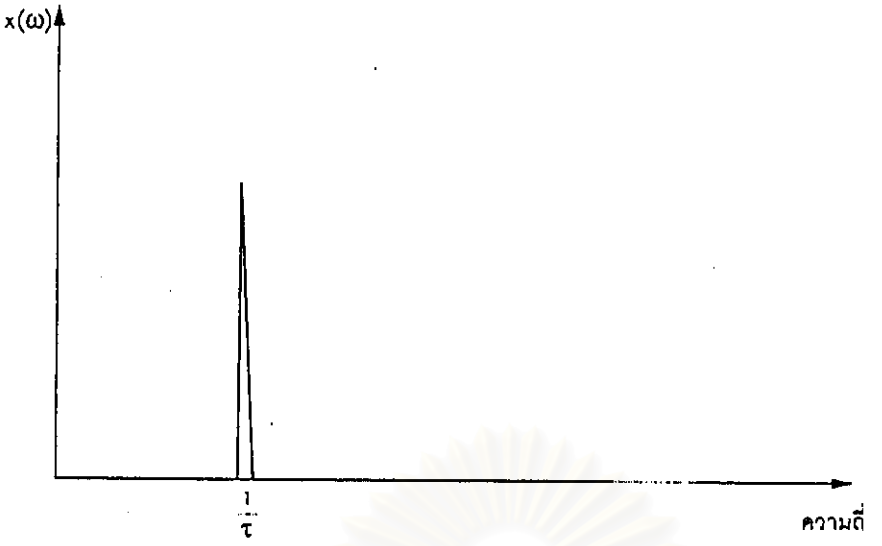
2-7 <u>การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม (Spectrum Analysis)</u>

การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม คือการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนของความถี่ ซึ่งการวิเคราะห์ลักษณะนี้หากนำมาใช้กับเครื่องจักรจะให้ข้อมูลของการสั่นสะเทือนได้มากกว่าข้อมูลจากการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาเพื่อเป็นการทำความเข้าใจให้ดีขึ้นสำหรับการวิเคราะห์แบบสเปกตรัมนี้สัญญาณคลื่นรูปไซน์บนโดเมนเวลาจะถูกพิจารณาเป็นกรณีแรก สัญญาณดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2-3 สัญญาณนี้จะมีความถี่ค่าเดียวซึ่งก็คือ $\frac{1}{\tau}$ เมื่อ τ คือคาบของสัญญาณที่ครบ 1 รอบดังนั้นเมื่อแปลงสัญญาณดังกล่าวนี้ไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ ก็จะมีสัญญาณเพียงค่าเดียวบนแกนความถี่ดังรูป 2-4



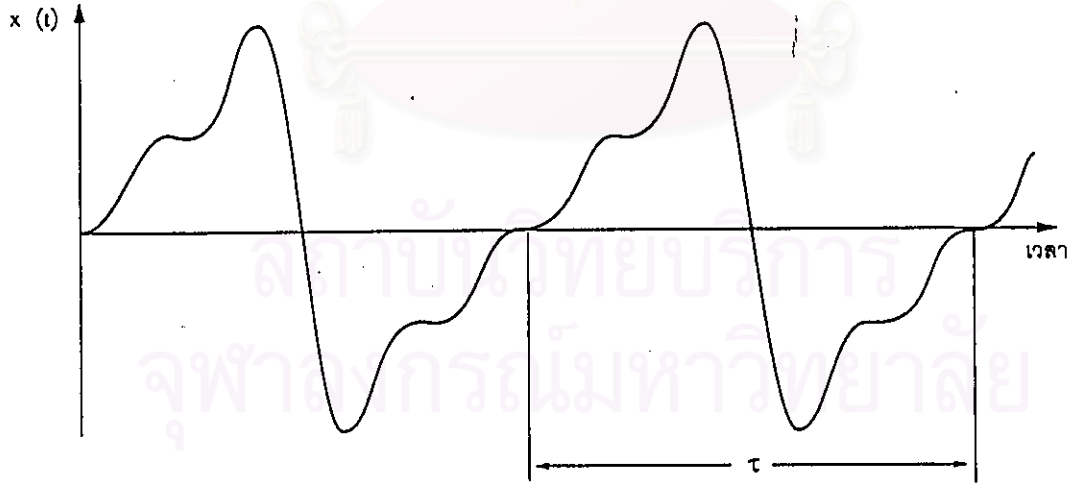
รูปที่ 2-3 สัญญาณบนโดเมนเวลา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

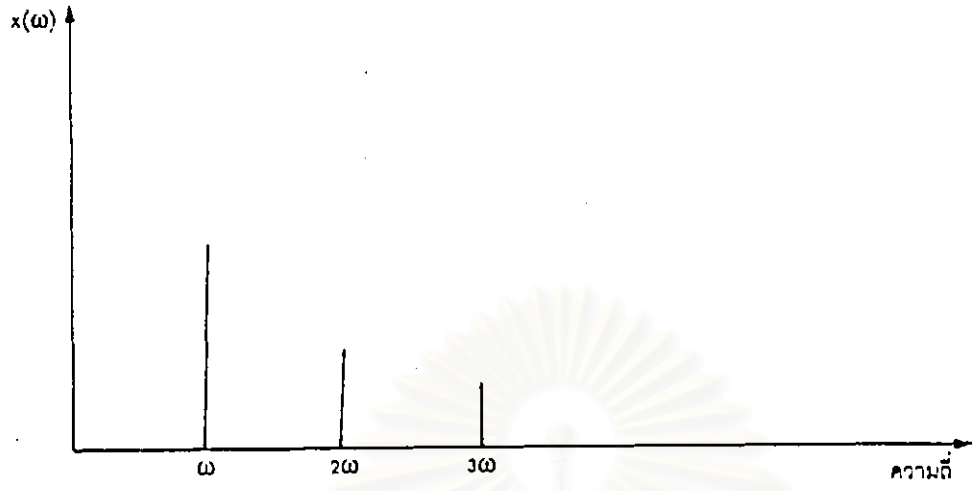


รูปที่ 2.4 สัญญาณบนโดเมนความถี่

ในกรณีที่สองเมื่อมีสัญญาณอยู่ในรูปของลักษณะเป็นคาบซึ่งเขียนอยู่บนโดเมนเวลา เมื่อใช้การแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) ค่าสัญญาณแบบเป็นคาบนี้จะสามารถถูกเขียนเป็นสัญญาณแบบฮาร์มอนิกได้หลายความถี่ โดยในแต่ละความถี่จะมีขนาดต่างกัน ซึ่งในกรณีนี้สัญญาณโดเมนเวลาสามารถเขียนเป็นสัญญาณฮาร์มอนิกที่ 3 ความถี่คือที่ ω,2ω และ 3ω ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-5 และ 2-6 โดยที่ $\omega = \frac{1}{\tau}$



รูปที่ 2-5 การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนเวลา



รูปที่ 2-6 การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนความถี่

2-8 <u>เรโซแนนซ์ (Resonance)</u>

เกิดจากการที่เครื่องจักรถูกกระตุ้นที่ความถี่ธรรมชาติที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้างหรือโดยรวมทั้งนี้เพราะโครงสร้างทุกประเภทสามารถประมาณและจำลองได้โดยรูปแบบของมวลกับสปริงเสมอ เมื่อแรงภายนอกมากระตุ้นที่ความถี่ธรรมชาติก็จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่เสริมกันทำให้ขนาดสูงขึ้น ความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักรอาจหาได้จากการกระแทกเครื่องจักรให้สั่นอิสระแล้ววัดความถี่ ถ้าการทำงานของเครื่องจักรมีรอบตรงกับความถี่ธรรมชาติก็คงจำเป็นต้องดัดแปลงความถี่ธรรมชาติด้วยการเสริมหรือลดความแข็งแกร่งของโครงสร้าง เพื่อขยับความถี่ธรรมชาติให้พ้นไปจากการกระตุ้น ลักษณะของการสั่นสะเทือนแบบเรโซแนนซ์ที่สำคัญคือ

1) ความถี่ของการสั่นสะเทือนคงที่ไม่จำเป็นต้องสัมพันธ์กับความเร็วรอบ
2) ขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าสูงมาก แต่จะลดลงทันทีเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยน
3) มุมเฟสไม่สม่ำเสมอเปลี่ยนไปเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยน