

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สองของระบบไม่เชิงเส้น
ที่มีตัวหน่วงแบบฮิสเตอเรซิส

THE FIRST AND SECOND ORDER TRANSFER FUNCTION OF
HYSTERESIS DAMPING NON-LINEAR SYSTEM

ปริญา บุญมาเลิศ¹ และ ธนู จุ้ยฉาย²

^{1,2}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

¹parinya.boo@kbu.ac.th, ²thanuchouychai@gmail.com

Parinya Boonmalert¹ and Thanu Chouychai²

^{1,2}Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Kasem Bundit University 1761 Pattanakarn Rd. Suanluang, Bangkok 10250, Thailand,

¹parinya.boo@kbu.ac.th, ²thanuchouychai@gmail.com

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการแยกสัญญาณของระบบไม่เชิงเส้นออกเป็นส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นออกจากกัน แล้วจึงนำส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อนำไปทำการวิเคราะห์โหมดต่อไปและได้แสดงให้เห็นถึงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยการเทียบกับอนุกรมของวอลเตอร์รา จากผลการทดสอบหาพารามิเตอร์ของระบบแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนที่แยกส่วนที่ไม่เชิงเส้นออกไปแล้ว จะมีค่าผิดพลาดจากระบบทางทฤษฎี 0.1% ส่วนฟังก์ชันถ่ายโอนที่ไม่แยกส่วนไม่เชิงเส้นจะมีความผิดพลาดจากทฤษฎี 2.1% ทั้งนี้ความผิดพลาดของกรณีหลังจะแปรผันไปตามความไม่เป็นเชิงเส้นด้วย

คำสำคัญ: ฟังก์ชันถ่ายโอน, การวิเคราะห์โหมด, อนุกรมวอลเตอร์รา

ABSTRACT

This research presents a method of separating the nonlinear system as a combination of linear and nonlinear parts. The linear part is then calculated to find the transfer function for further modal analysis. It also presents the finding of the nonlinear transfer function by comparing with the Volterra series. The results of system's parameters show when the

transfer function is separated the nonlinear parts there will be 0.1% theoretical error. The transfer function is not separated the nonlinear parts will have 2.1% theoretical error. However, the errors that occur will vary according to nonlinearity.

KEYWORDS: Transfer function, Modal analysis, Volterra series

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมจะต้องมีการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้มีความแข็งแรงและคงทนต่อการใช้งาน ซึ่งโดยปกติจะทำการออกแบบทางสถิติศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) และทำการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์โมดัล (Modal analysis) แต่มักจะพบเสมอว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ผลิตออกมานั้น เมื่อทำการวิเคราะห์โมดัลโดยการทดลองแล้วจะให้ผลที่ผิดพลาดมากเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ซึ่งสาเหตุของความผิดพลาดนั้นเกิดจากความไม่เชิงเส้น (Non-linear) ของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

โดยปกติการหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของระบบด้วยวิธีการวิเคราะห์โมดัล จะทำการวัดสัญญาณออกและสัญญาณเข้าของระบบแล้วนำสัญญาณทั้งสองไปทำการแปลงด้วยฟูริเยร์ (Fourier transform) ให้เป็นโดเมนความถี่ (Frequency domain) แล้วนำสัญญาณออกหารด้วยสัญญาณเข้าในโดเมนความถี่ก็ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเทียบสองจุดระหว่างจุดที่สัญญาณเข้าและจุดที่สัญญาณออก หลังจากนั้นจะนำฟังก์ชันถ่ายโอนนั้นไปคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ เช่น ความถี่ธรรมชาติ และค่าอัตราส่วนการหน่วง เป็นต้น ซึ่งบางครั้งจะพบว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเดียวกันที่จุดวัดเดียวกันในการวัดแต่ละครั้งจะไม่เท่ากัน นั้นแสดงว่าระบบนั้นเป็นระบบไม่เชิงเส้น ถ้านำฟังก์ชันถ่ายโอนที่วัดได้ไปคำนวณหาพารามิเตอร์ของระบบแล้วจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการแยกสัญญาณส่วนที่เป็นเชิงเส้นของระบบออกมาตามกระบวนการตั้งที่กล่าวมาแล้ว จากนั้นจึงนำสัญญาณออกอันดับที่หนึ่งไปคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนและไปคำนวณหาพารามิเตอร์ของระบบเชิงเส้นต่อไป

ในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิของวอลเตอร์รา (Volterra series) [1] แทนสัญญาณออกของระบบและทำการแยกสัญญาณออกของระบบออกเป็นอันดับต่างๆ ที่สอดคล้องกับอันดับของอนุกรม โดยที่อันดับที่หนึ่งแทนสัญญาณออกของระบบเชิงเส้นและตั้งแต่อันดับที่สองเป็นต้นไปแทนสัญญาณออกของระบบส่วนที่ไม่เชิงเส้น ทำให้สามารถนำส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบโมดัลเชิงเส้นได้อย่างถูกต้อง และส่วนที่ไม่เชิงเส้นก็สามารถนำไปวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธีที่เหมาะสมต่อไป ในงานวิจัยได้ทำการทดลองทำการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระดับความเสียดทานเดียวของระบบที่มีสปริงไม่เชิงเส้นอันดับที่สองที่มีตัวหน่วงแบบฮิสเทอเรซิส (Hysteresis damping) และได้แสดงรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สองไว้ให้เป็น

แนวทางเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ส่วนฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สามและสูงกว่าไม่ได้แสดงไว้เนื่องจากเป็นการยากที่จะแสดงด้วยกราฟหลายมิติ

2. งานที่เกี่ยวข้อง

Haoui A [2] ได้แสดงวิธีการแยกฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นออกจากกันโดยใช้การแปลงของฮิลเบิร์ต

Fei BJ [3] ได้เสนอวิธีการคำนวณฮิลเบิร์ตอย่างรวดเร็วโดยอาศัยการแปลงของฟูรีเยร์ และได้เสนอเทอมแก้ความผิดพลาดที่เกิดจากการตัดสัญญาณ ของการแปลงของฮิลเบิร์ตอีกด้วยและทั้งสองท่านนี้ได้ใช้การแปลงของฮิลเบิร์ต สร้างฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นเทียบเท่า

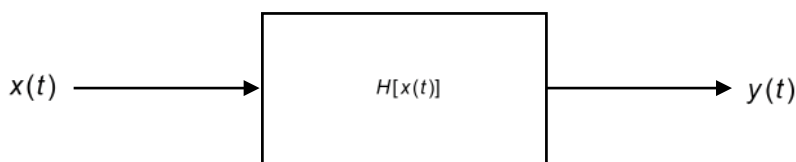
Semidor-Signoret C [4] ได้เสนอวิธีการแยกสัญญาณออกของระบบออกเป็นส่วนๆ เพื่อให้สอดคล้องกับอนุกรมของวอลเตอร์รา โดยการทดลองซ้ำๆ กันหลายครั้ง โดยใช้สัญญาณเข้าของระบบในรูปแบบเดิมทุกครั้งแต่ปรับแอมพลิจูดให้แตกต่างกันทุกครั้ง แล้วนำสัญญาณออกที่วัดได้กับแอมพลิจูดของแรงไปทำการคำนวณแบบเมตริกซ์เพื่อแยกสัญญาณออกของระบบออกเป็นอันดับต่างๆ ที่สอดคล้องกับอนุกรมของวอลเตอร์รา

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาในงานวิจัยนี้จะพิจารณาระบบเป็นระบบแบบไม่เชิงเส้นระดับความเสถียรขั้นเดียวที่มีตัวหน่วงแบบฮิสเตอเรซิสในรูปของสปริงเชิงซ้อนที่ไม่เชิงเส้นในรูปของสมการพหุนามกำลังสองดังสมการที่ (1) โดยแผนผังของระบบแสดงดังรูปที่ 1

$$m\ddot{y}(t) + ay(t) + by^2(t) = x(t) \quad (1)$$

โดยที่ m เป็นมวลของระบบ, $a = k + jh$; $j = \sqrt{-1}$, k เป็นค่าความแข็งตึงของสปริง และ h เป็นค่าคงที่ของตัวหน่วงแบบฮิสเตอเรซิส, b เป็นค่าคงที่เชิงซ้อนของเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 1 แผนผังของระบบ

สัญญาณออกของระบบในสมการที่ (1) สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของโอเปอเรเตอร์ได้เป็น

$$y(t) = H[x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} H_n[x(t)] \tag{2}$$

และถ้ากำหนดให้สัญญาณเข้าของระบบเป็น

$$x(t) = BF(t) \tag{3}$$

ถ้า $B = 1$; สัญญาณออกของระบบจะได้

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} H_n[x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} H_n[F(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) \tag{4}$$

และที่ B ใดๆ สัญญาณออกของระบบจะเป็น

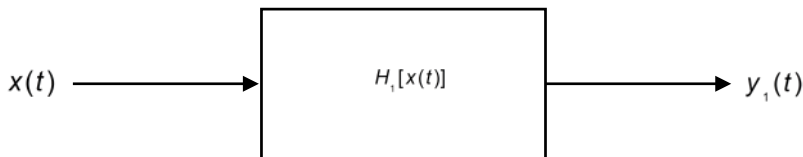
$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} H_n[BF(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} B^n y_n(t) \tag{5}$$

แทน สมการที่ (5) ในสมการที่ (1) และเทียบสัมประสิทธิ์ ของ B ยกกำลังหนึ่งได้

$$m\dot{y}_1(t) + ay_1(t) = F(t) \tag{6}$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปของโอเปอเรเตอร์ได้ดังสมการที่ (7) และมีแผนผังของระบบเชิงเส้น ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2

$$y_1(t) = H_1[F(t)] = H_1[m\dot{y}_1(t) + ay_1(t)] \tag{7}$$



รูปที่ 2 แผนผังของระบบเชิงเส้น

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเชิงเส้นในสมการ (6) เมื่อ $\frac{a}{m} = \omega_n^2(1 + j\gamma_n)$ คือ

$$H_1(\omega) = \frac{A}{\omega_n^2 - \omega^2 + j\gamma_n \omega_n^2} \quad (8)$$

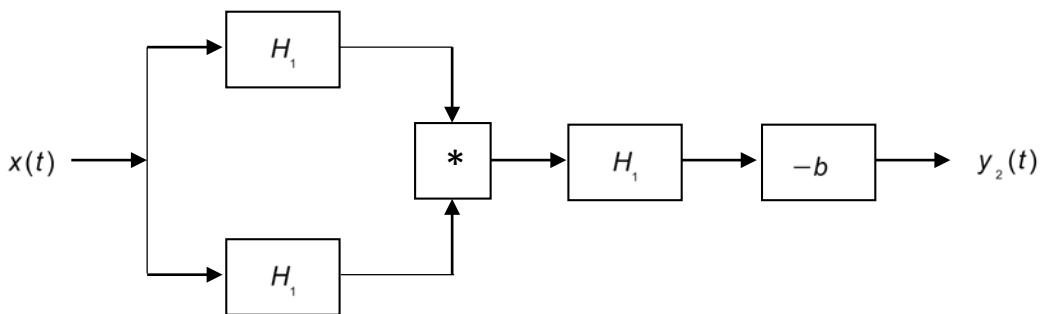
$$\text{โดยที่ } \omega_n^2 = \frac{k}{m}, \gamma_n = \frac{h}{k} \text{ และ } A = \frac{1}{m}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนไม่เชิงเส้นอันดับสอง สามารถหาได้โดยการแทนสมการที่ (5) ในสมการที่ (1) และเทียบสัมประสิทธิ์ของ B ยกกำลังสองจะได้

$$m\ddot{y}_2(t) + ay_2(t) = -by_1^2(t) \quad (9)$$

โดยแผนผังการตอบสนองอันดับที่สองของระบบแสดงดังรูปที่ 3 และสัญญาณออกของระบบอันดับที่สองเป็น

$$y_2(t) = -bH_1[y_1^2(t)] \quad (10)$$



รูปที่ 3 แผนผังการตอบสนองอันดับที่สองของระบบ

สัญญาณออกของระบบไม่เชิงเส้น จะเขียนเป็นอนุกรมของวอลเตอร์รา (Volterra series) ได้เป็น

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i \quad (11)$$

หรือการตอบสนองอันดับที่ n ใดๆ เขียนได้เป็น

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i \quad (12)$$

การตอบสนองของระบบเชิงเส้นจะเขียนในรูปของอนุกรมของวอลเตอร์ราได้เป็นการประสาน (Convolution) ที่ $n = 1$ คือ

$$y_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\sigma)x(t - \sigma)d\sigma \quad (13)$$

และการตอบสนองของระบบไม่เชิงเส้นอันดับที่สองจากสมการที่ (10) เป็น

$$y_2(t) = -b \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)h_1(\sigma_1)h_1(\sigma_2)x(t - \tau - \sigma_1)x(t - \tau - \sigma_2)d\tau d\sigma_1 d\sigma_2 \quad (14)$$

กำหนดให้ $\zeta_1 = \tau - \sigma_1$ และ $\zeta_2 = \tau - \sigma_2$ จะได้

$$y_2(t) = -b \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)h_1(\tau - \zeta_1)h_1(\tau - \zeta_2)x(t - \zeta_1)x(t - \zeta_2)d\tau d\zeta_1 d\zeta_2 \quad (15)$$

แต่รูปแบบมาตรฐานของการตอบสนองอันดับที่สองของอนุกรมวอลเตอร์ราในสมการที่ (12) จะเป็น

$$y_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2)x(t - \tau_1)x(t - \tau_2)d\tau_1 d\tau_2 \quad (16)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (15) และ (16) จะได้อิมพัลส์เรสปอนส์อันดับที่สองเป็น

$$h_2(\zeta_1, \zeta_2) = -b \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)h_1(\tau - \zeta_1)h_1(\tau - \zeta_2)d\tau \quad (17)$$

และเมื่อใช้การแปลงของฟูริเยร์สองมิติจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองของระบบเป็น

$$H_2(\omega_1, \omega_2) = -b \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)h_1(\tau - \zeta_1)h_1(\tau - \zeta_2)e^{-j(\omega_1\zeta_1 + \omega_2\zeta_2)} d\tau d\zeta_1 d\zeta_2 \quad (18)$$

จากการเปลี่ยนตัวแปร $\sigma_1 = \tau - \zeta_1$, $\sigma_2 = \tau - \zeta_2$ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองเป็น

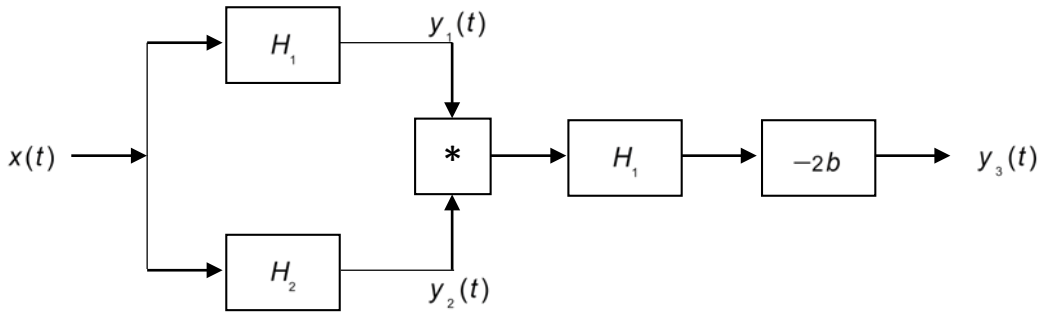
$$H_2(\omega_1, \omega_2) = -bH_1(\omega_1 + \omega_2)H_1(\omega_1)H_1(\omega_2) \tag{19}$$

ในทำนองเดียวกันฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สาม จะหาได้จากแทน สมการที่ (4) ใน สมการที่ (1) และเทียบสัมประสิทธิ์ ของ B กำลังสามจะทำให้ได้สัญญาณออกอันดับที่สาม โดยมีแผนผังการตอบสนองอันดับที่สามของระบบแสดงดังรูปที่ 4

$$y_3(t) = -2bH_1[y_1(t)y_2(t)] \tag{20}$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สามเป็น

$$H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = -2bH_1(\omega_1)H_2(\omega_2, \omega_3)H_1(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \tag{21}$$



รูปที่ 4 แผนผังการตอบสนองอันดับที่สามของระบบ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าเมื่อทำการวัดสัญญาณของระบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน มักจะพบปัญหาฟังก์ชันถ่ายโอนเปลี่ยนรูปร่างไปเมื่อขนาดของสัญญาณเข้าของระบบเปลี่ยน เนื่องจากระบบที่ทำการทดสอบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเพื่อทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอน อันดับหนึ่ง และอันดับที่สอง ที่ถูกต้องจะทำการแยกสัญญาณส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นออกจากกัน ในทางปฏิบัติ การจะหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบไม่เชิงเส้นจะทำได้โดยการวัดสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบ ที่มีการปรับแอมพลิจูดของสัญญาณเข้าของระบบให้มีขนาดต่างๆ กัน ถ้า $x(t)$ เป็นสัญญาณเข้าของระบบมีรูปแบบเป็น

$$x(t) = B_i f(t) \tag{22}$$

โดยที่ B_i เป็นแอมพลิจูดของสัญญาณเข้าครั้งที่ i และสัญญาณออกครั้งที่ i ใดๆ เป็น

$$y^{(i)}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_i^n y_n(t) \quad (23)$$

สมการที่ (23) เขียนในรูปของเมตริกซ์ สำหรับการวัดสัญญาณ p ครั้งได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} y^{(1)}(t) \\ y^{(2)}(t) \\ \vdots \\ y^{(p)}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & B_1^2 & \dots & B_1^p \\ B_2 & B_2^2 & \dots & B_2^p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_p & B_p^2 & \dots & B_p^p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_p(t) \end{Bmatrix} \quad (24)$$

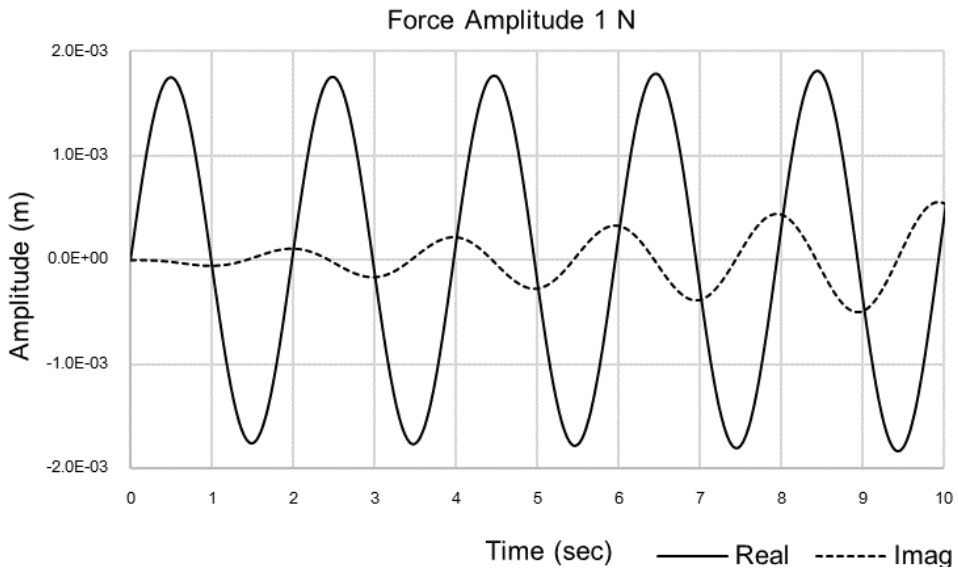
เมื่อ $y^{(i)}(t)$ เป็นสัญญาณออกของระบบที่มีสัญญาณเข้าเป็น $x(t) = B_i f(t)$ เมื่อ $y^{(i)}(t)$ เป็นสัญญาณออก และ B_i เป็นขนาดของแอมพลิจูดที่ทราบค่าของสัญญาณเข้า ดังนั้นสัญญาณออกของระบบไม่เชิงเส้นจะแยกออกเป็นอันดับต่างๆ ได้จากการแก้สมการเชิงเส้นของสมการที่ (24) และฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งจะหาได้จาก

$$H_1(\omega) = \frac{Y_1(\omega)}{F(\omega)} \quad (25)$$

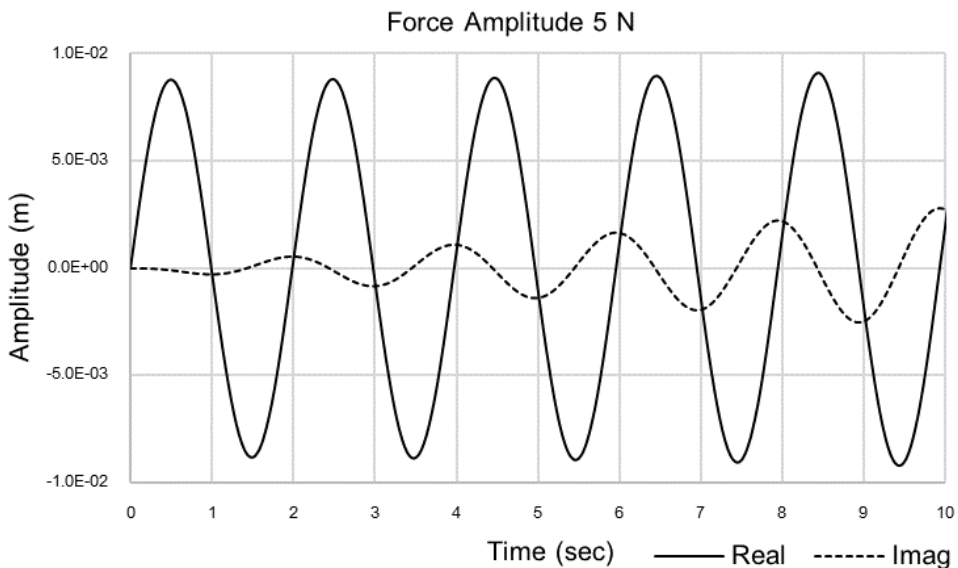
4. ผลการทดลอง

ในการทดสอบความเป็นไปได้ของหลักการตามทฤษฎีข้างต้นจะทำได้โดย จำลองระบบที่มีตัวหน่วงแบบฮิสเทอเรซิส ที่มีมวลเท่ากับ 1 kg, $\omega_n = 10$ rad/s, $\gamma_n = 0.02$, $b = 1 + 0.1j$, และมีสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณแบบดล $x(t) = F_i \delta(t)$ ที่มีขนาดของแอมพลิจูดที่ไม่เท่ากันสามค่าคือ $F_1 = 1$ N, $F_2 = 5$ N, $F_3 = 10$ N เพื่อให้แยกสัญญาณออกมาได้เป็นสามอันดับและเมื่อทำการคำนวณสัญญาณออกทั้งสามจากสมการ (1) โดยใช้ระเบียบวิธีรุงเง-คุดตา (Runge-Kutta Method) [5] แล้วนำสัญญาณออกทั้งสามดังที่แสดงในรูปที่ 5-7 แทนในสมการที่ (24) แล้วคำนวณสัญญาณอันดับที่หนึ่งถึงสามได้ดังแสดงในรูปที่ 8-10 ตามลำดับ เมื่อนำสัญญาณออกอันดับที่หนึ่งไปคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 11 และฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองซึ่งเป็นส่วนที่แสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบแสดงในรูปที่ 12 เมื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งไปคำนวณหาพารามิเตอร์ของระบบ โดยใช้วิธีเทียบกับวงกลมใน

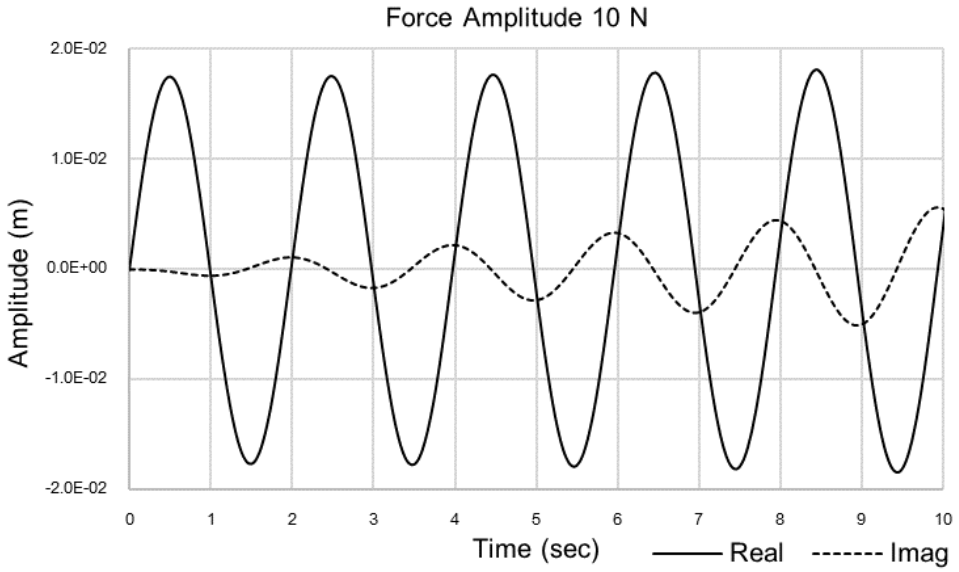
ในควิพล็อต (Nyquist plot) จะได้พารามิเตอร์ของ ω_n และ γ_n มีความผิดพลาดจากค่าที่กำหนด 0.1% ส่วนพารามิเตอร์ที่คำนวณจากฟังก์ชันถ่ายโอนที่คำนวณจากสมการ (1) จะมีค่าผิดพลาด 2.1% ทั้งนี้ความผิดพลาดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ b มากขึ้น ส่วนค่าของ b ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้น จะต้องใช้วิธีการของระบบไม่เชิงเส้นในการหาต่อไป



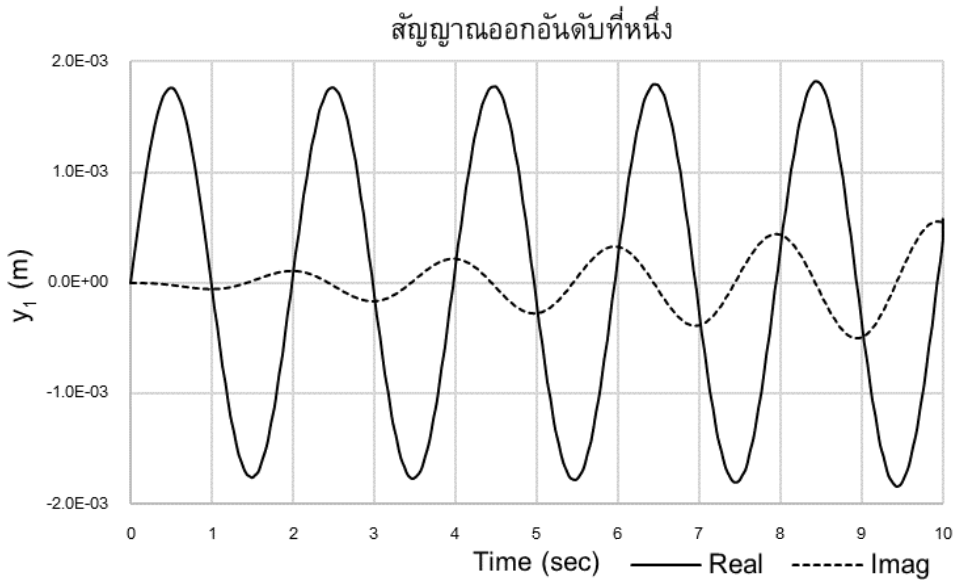
รูปที่ 5 สัญญาณออกของระบบที่ถูกกระทำด้วยแรงขนาด 1 N



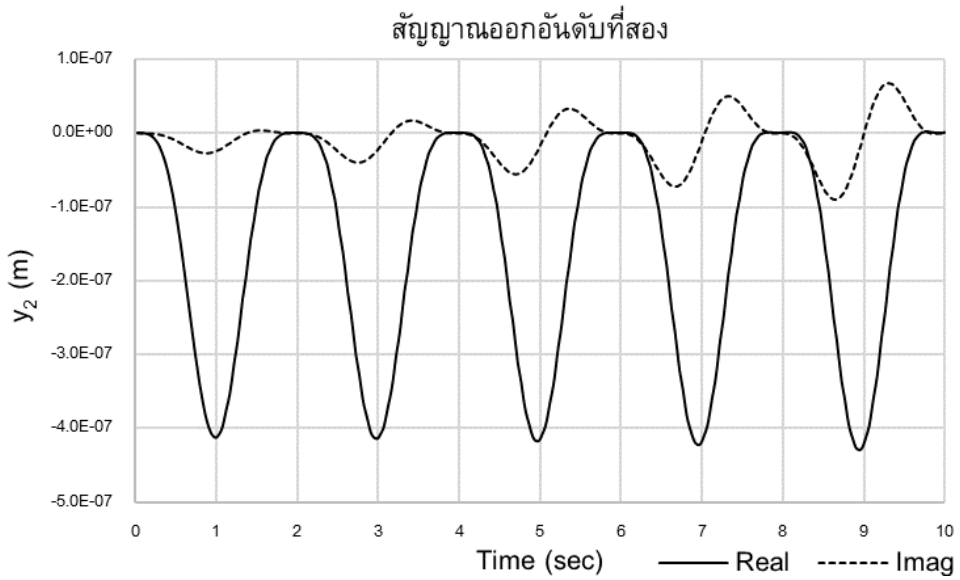
รูปที่ 6 สัญญาณออกของระบบที่ถูกกระทำด้วยแรงขนาด 5 N



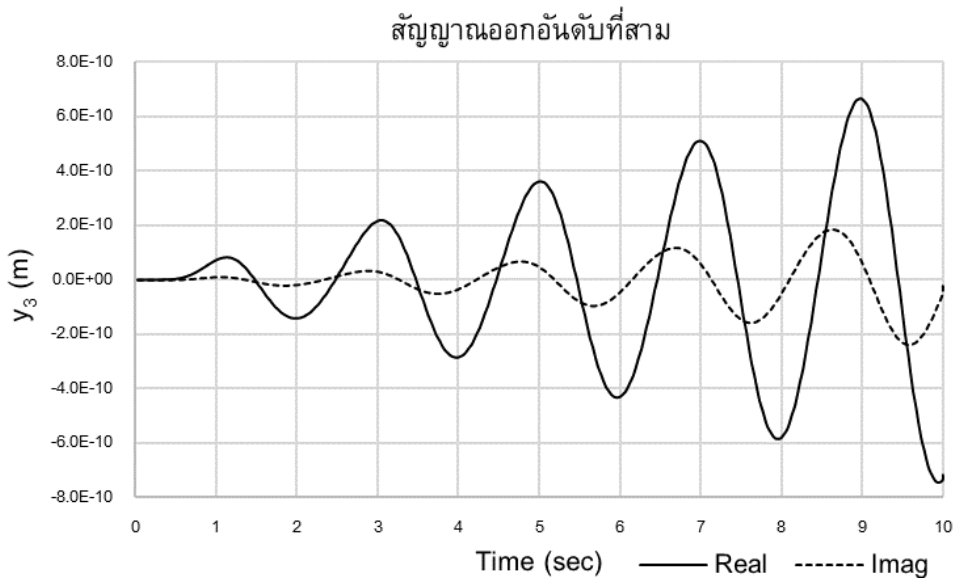
รูปที่ 7 สัญญาณออกของระบบที่ถูกกระทำด้วยแรงขนาด 10 N



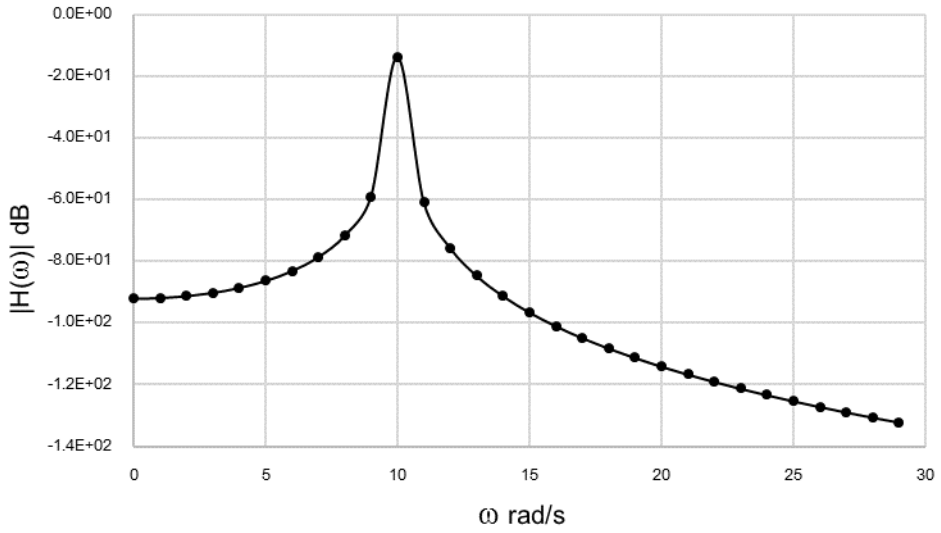
รูปที่ 8 สัญญาณอันดับที่หนึ่งที่แยกออกโดยใช้สมการที่ (24)



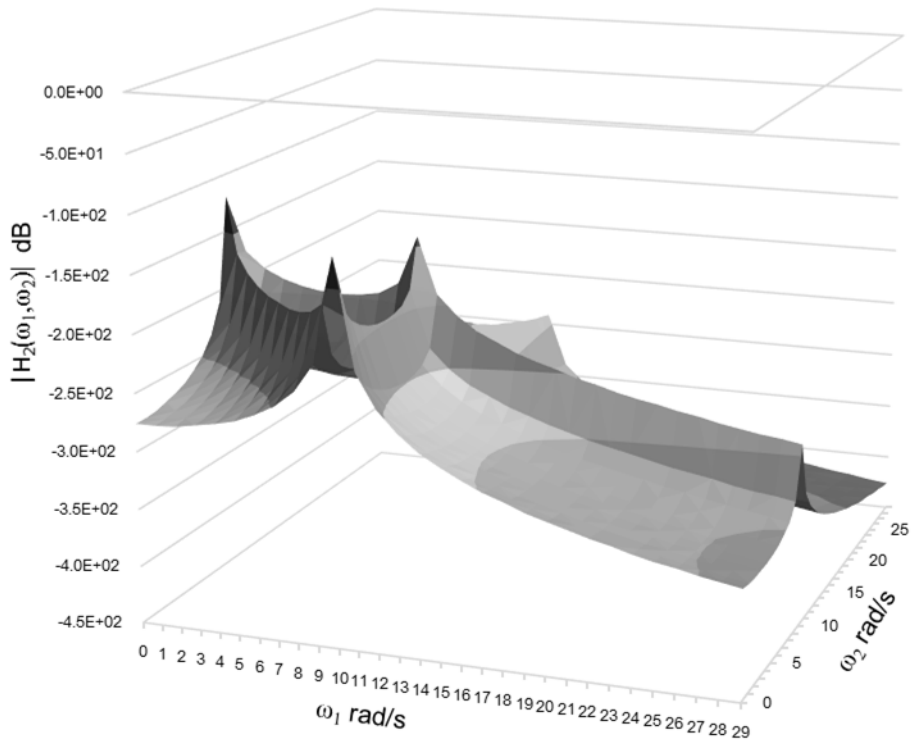
รูปที่ 9 สัญญาณอันดับที่สองที่แยกออกโดยใช้สมการที่ (24)



รูปที่ 10 สัญญาณอันดับที่สามที่แยกออกโดยใช้สมการที่ (24)



รูปที่ 11 พังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง



รูปที่ 12 พังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองของระบบไม่เชิงเส้น

5. สรุปผล

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าวิธีการแยกสัญญาณของระบบเชิงเส้นออกจาก สัญญาณของระบบไม่เชิงเส้นใช้ได้ผล ซึ่งจะทำให้การคำนวณหาพารามิเตอร์ของระบบมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้ในการทำการวิเคราะห์โมดัล ที่มีขายเกือบทั้งหมดจะใช้วิธีการคำนวณมาจากทฤษฎีของระบบเชิงเส้นทั้งสิ้น และเมื่อใช้โปรแกรมเหล่านี้กับระบบไม่เชิงเส้นก็มักจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน ซึ่งผู้ใช้งานก็มักจะใช้วิธีการทดลองหลายๆ ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย แต่ถ้าใช้วิธีการตามที่กล่าวมานี้จะทำให้การคำนวณหาพารามิเตอร์ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

References

- [1] Schetzen M. The Volterra & Wiener Theory of NonLinear Systems. New York: John Wiley & Sons; 1980.
- [2] Haoui A. Transformee de Hilbert Theorie et Applications aux Systems Non Lineaires. [these de docteur-Ingenieur]. Saint-Ouen, France: ISMCM; 1984.
- [3] Fei B J. Transformee de Hilbert Numerique. [rapport de stage de fin d'etudes]. Saint-Ouen, France: ISMCM; 1985.
- [4] Semidor-Signoret C. Comportements de Hauts Polymeres a Grange Vitesse de Deformation, Identification d'Effet Non Lineares. [These de 3eme. Cycle en mecanique physique]. Bordeaux, France: Universite de Bordeaux I; 1981.
- [5] Chapra S C, Canale RP. Numerical Methods for Engineering. 7th ed. New York: McGraw-Hill Book Company; 2015.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.ปริญญญา บุญมาเลิศ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต โทรศัพท์ 0-2320-2777 ต่อ1203 E-mail: parinya.boon@kbu.ac.th



รศ.ดร.ธนุ ฉุยฉาย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
โทรศัพท์ 0-2320-2777 ต่อ1203 E-mail: thanuchouychai@gmail.com

Article History:

Received: January 10, 2019

Revised: April 22, 2019

Accepted: April 22, 2019