

บทที่ 5

การวิเคราะห์ข้อมูลและการประเมินค่า

5.1 การสั่นสะเทือนแบบอิสระ

5.1.1 การคำนวณจากทฤษฎี

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตัวแปรโมดัลเพื่อที่จะแสดงพฤติกรรมของการสั่นสะเทือน จะได้ค่าของคุณลักษณะของระบบนั้นคือ จากเมทริกซ์มวล ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่งและสัมประสิทธิ์ความหน่วง จากการทดสอบและใช้โปรแกรมที่ได้จากภาคผนวก ก แสดงเมทริกซ์เหล่านั้นได้ในบทที่ 3 แล้วนำไปแก้ปัญหาค่าเจาะจง (Eigenvalue problem) จะได้ค่าเจาะจง (Eigenvalue) เป็นคู่ของค่าสังยุคเชิงซ้อน ได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} -6.0032 + 107.87i & -6.0032 - 107.87i \\ -4.3798 + 91.66i & -4.3798 - 91.66i \\ -0.81622 + 14.666i & -0.81622 - 14.666i \\ -0.92296 + 14.542i & -0.92296 - 14.542i \\ -2.5177 + 48.101i & -2.5177 - 48.101i \\ -3.1536 + 48.269i & -3.1536 - 48.269i \end{pmatrix}$$

จากค่าเจาะจงข้างต้นสามารถนำมาคำนวณเพื่อหา ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง โดยใช้สมการของ Eigenvalue ในบทที่ 2 คือ

$$s_r = \omega_r \left(-\xi_r \pm i\sqrt{1-\xi_r^2} \right)$$

สามารถแสดงการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงได้จากสมการดังกล่าว ตัวอย่างเช่น นำค่าแรกของ Eigenvalue ที่ $-6.0032+107.87i$ มาคำนวณหาความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง

$$\omega_r = \sqrt{6.0032^2 + 107.87^2}$$

$$\omega_r = 108.037 \text{ rad/s หรือเท่ากับ } 17.14 \text{ Hz}$$

$$\xi_r = \text{ส่วนของจำนวนจริง/ความถี่ธรรมชาติ}$$

$$\text{จะได้} = 0.00556 \text{ หรือ } 5.56 \%$$

จากการคำนวณสามารถสรุปค่าที่ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของระบบเชิงทฤษฎี

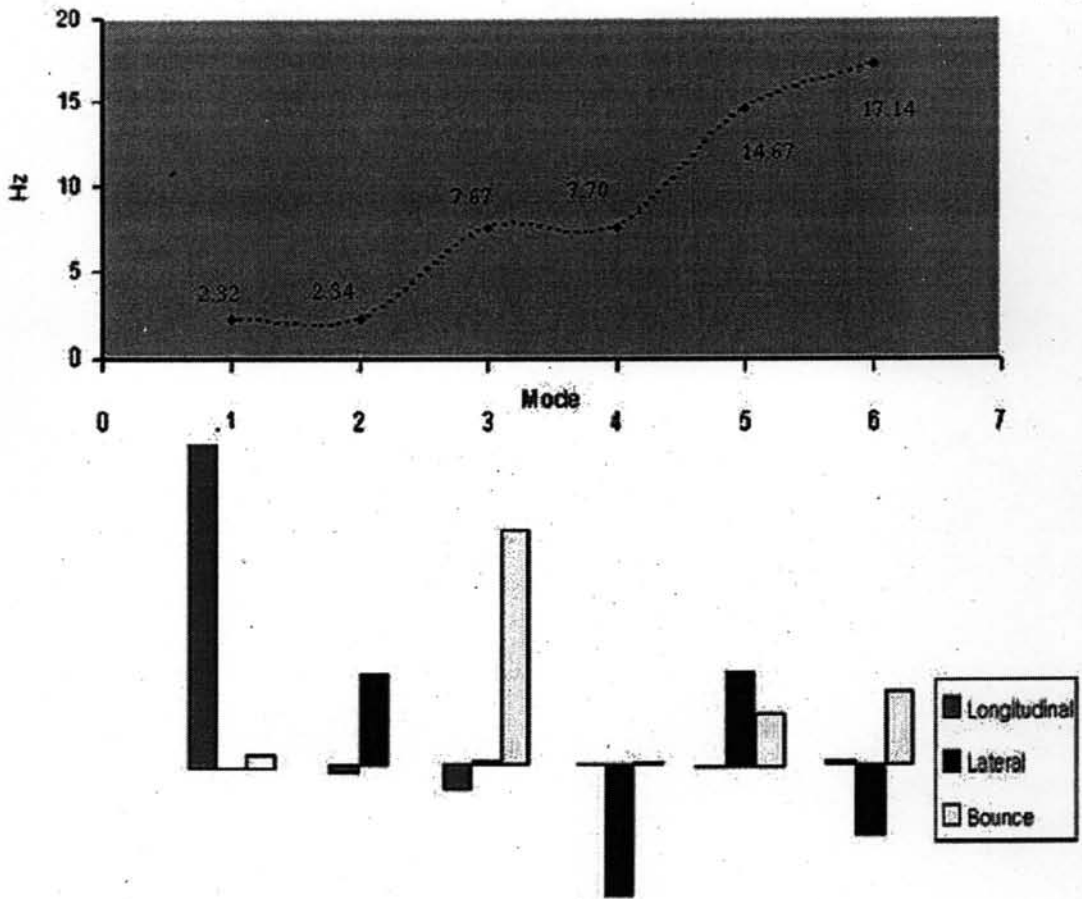
ความถี่ธรรมชาติ(Hz)	Percent Damping ratio
2.32	6.33%
2.34	5.56%
7.67	5.23%
7.70	6.52%
14.67	4.77%
17.14	5.56%

จากผลการคำนวณพบว่าค่าอัตราส่วนความหน่วงค่อนข้างต่ำและไม่เกิน 10% หรือ lightly damp และยังเป็นตัวหน่วงแบบวิสคัส ทำให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มรูปร่างการสั่นสะเทือนโดยตรงจากค่าความถี่ธรรมชาติของระบบสั่นสะเทือน โดยการใช้ค่า Eigen vector จากการคำนวณของเมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็ง และเมทริกซ์มวล ซึ่งเป็นภาวะ undamp system โดยวิธีดังกล่าวอ้างอิงจากหนังสือ Engineering Vibration ของ Danieal J. Inman ในบทที่ 4 ค่าเมทริกซ์ซึ่งแสดงรูปร่างการสั่นของเครื่องยนต์แสดงได้ดังนี้

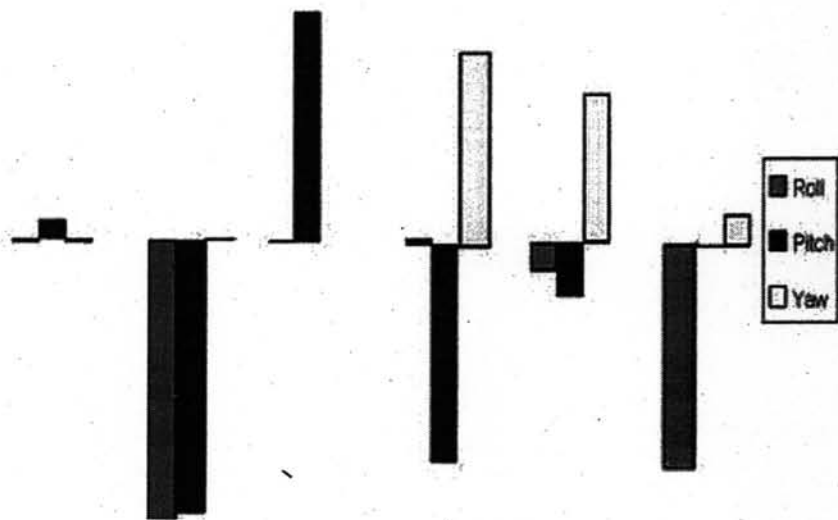
0.9971	-0.0187	-0.0724	-0.0006	0.0042	0.0126
0.0046	0.2671	0.0129	-0.3883	0.2607	-0.1923
0.0412	0.0003	0.6985	0.0054	0.1478	0.1989
-0.0133	-0.7132	0.0049	0.0202	-0.0878	-0.695
0.0609	-0.6479	0.7118	-0.695	-0.1601	0.0058
-0.0123	0.0014	0.0008	0.6051	0.4517	-0.1

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณารูปร่างการสั่นแบบอิสระของระบบโครงสร้างทางกลของเครื่องยนต์ จากเมทริกซ์ดังกล่าวจะนำเสนอแนวโน้มของรูปร่างการสั่นได้ดังรูปที่ 5.1

ส่วนคุณสมบัติอย่างอื่นของระบบสั่นสะเทือนก็จะสามารถนำมาสร้างกลุ่มของฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการอธิบายพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของระบบ และใช้เป็นขั้นตอนสำคัญในการออกแบบเพื่อลดระดับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางกลดังกล่าว ส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างของฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ในภาคผนวก ก.



(ก) อัตราส่วนรูปร่างการสั่นแบบเชิงเส้น



(ข) อัตราส่วนรูปร่างการสั่นแบบเชิงมุม

รูปที่ 5.1 ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นเชิงทฤษฎีของเครื่องยนต์

รูปที่ 5.1 แสดงความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นของเครื่องยนต์โดยใช้ยางแท่นเครื่องเป็นระบบรองรับเครื่องยนต์ที่จุดรองรับทั้ง 3 จุด โดยในแต่ละความถี่ธรรมชาติจะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการสั่น สำหรับรูปร่างการสั่นที่ได้เชิงทฤษฎี พบว่าจะมีการรวมกันของรูปแบบการสั่น

ต่างๆ เข้าด้วยกันทำให้เป็นการยากที่จะระบุโดยตรงว่า ค่าความถี่ธรรมชาติของอะไรจึงจะทำให้เกิดรูปร่างการสั่นแบบโหนดขึ้นมาโดยเฉพาะ แต่การแสดงผลดังกล่าวจะบอกเพียงแนวโน้มเท่านั้นว่าที่ความถี่ธรรมชาติเท่าไรจึงจะมีโอกาสเกิดรูปร่างการสั่นแบบโหนดบ้าง นั่นคือ

ที่ความถี่ 2.32 Hz มีแนวโน้มที่จะเกิดรูปร่างการสั่นตามยาวของเครื่องยนต์เพียงอย่างเดียว ส่วนที่ความถี่ 2.34 Hz มีแนวโน้มที่จะเกิดรูปร่างการสั่นที่รวมกันระหว่างการสั่นแบบเชิงเส้นคือการสั่นด้านข้างและการสั่นแบบเชิงมุมคือการกระดอนและการส่าย สำหรับที่ 7.67 Hz แนวโน้มจะเกิดการเดินขึ้นลงของเครื่องยนต์กับการกระดอน ส่วนความถี่ 7.70 Hz แนวโน้มที่จะเกิดการสั่นเชิงมุม คือแบบการส่ายและการโคลงตัวของเครื่องยนต์ และอาจจะพบการสั่นด้านข้างของเครื่องยนต์ด้วย ที่ความถี่สูงขึ้นไปอีกประมาณ 14.67 Hz การส่ายของเครื่องยนต์จะพบมากกว่าการสั่นแบบตามยาวและด้านข้าง สุดท้ายที่ 17.14 Hz การโคลงของเครื่องยนต์มีแนวโน้มที่จะเกิด

ผลที่ได้จะนำไปประเมินผลร่วมกับผลการทดสอบเพื่อสรุปเป็นค่าความสัมพันธ์ของรูปร่างการสั่นกับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบต่อไป

5.1.2 การทดสอบโมดัล

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Impact test จากการทดสอบในบทที่ 4 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่ามีความถี่ที่น่าจะเป็นค่าของความถี่ธรรมชาติของระบบประมาณ 6 ค่า โดยวิธีพิจารณาค่าความถี่ธรรมชาติอธิบายได้ตามบทที่ 4 สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 5.2 ผลจากการทดสอบ

ความถี่ธรรมชาติ(Hz)	Percent Damping ratio
3.250	3.96% - 5.84%
3.313	3.96% - 5.84%
5.313	3.71% - 4.83%
7.125	4.33% - 5.51%
14.38	4.96% - 6.77%
14.63	4.96% - 6.77%

ผลจากการทดสอบ และจากการคำนวณการสั่นสะเทือนแบบอิสระของเครื่องยนต์นำมาเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลเปรียบเทียบของค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบโมดัล

ผลจากการคำนวณ (Hz)	ผลจากการทดสอบ (Hz)	ผลต่าง	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน
3.25	2.32	0.93	28.62
3.313	2.34	0.973	29.37
5.313	7.67	-2.357	-44.36
7.125	7.7	-0.575	-8.07
14.38	14.6	-0.22	-1.53
14.63	17.19	-2.56	-17.50

ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนพอสมควรแต่ก็อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาติที่ศึกษาอยู่ในช่วงที่ต่ำ จึงทำให้ดูเหมือนสัดส่วนผลต่างที่เกิดขึ้นดูเหมือนจะมาก ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวน่าจะเกิดจากความผิดพลาดขณะทำการวิจัยได้แก่ การทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของยางแท่นเครื่อง การทดสอบดังกล่าวจะเคาะชุดทดสอบและวิเคราะห์สัญญาณ ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวยังสัญญาณความเร่งอาจเกิดความผิดพลาดได้ทำให้ตัวยังสัญญาณความเร่งไม่ได้วัดสัญญาณที่เป็นผลตอบสนองของการเคลื่อนเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว รวมถึงการเคาะชุดทดสอบซึ่งอาจทำให้เกิดการเคลื่อนที่เชิงมุมทำให้สัญญาณที่ได้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงส่งผลให้คุณลักษณะของยางแท่นเครื่องที่ได้จากการคำนวณค่าสัญญาณมีความผิดพลาดได้ ข้อผิดพลาดประการต่อมาคือ การวิเคราะห์เพื่อหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องยนต์จากการแกว่งเครื่องยนต์ทดสอบ อาจถูกภาวะแวดล้อมรบกวนได้ เช่น การสั่นรบกวนของมอเตอร์ปั๊มน้ำที่อยู่ใกล้กัน และข้อผิดพลาดในการทดสอบโมดัลบนชุดทดสอบระบบการสั่นสะเทือนที่จุดรองรับทั้ง 3 จุดพบว่าอาจเกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ต่ำจากสภาวะแวดล้อมเนื่องพื้นที่ที่ทดสอบเป็นพื้นที่เปิดไม่ได้มีการควบคุมภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมการทดสอบเกี่ยวกับกลศาสตร์ยานยนต์การเกิดสัญญาณรบกวนจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและจุดติดตั้งตัวยังสัญญาณความเร่งอาจไม่สามารถแสดงผลตอบสนองทั้งหมดได้อย่างแท้จริง

5.2 ผลการทดสอบโมดัลเพื่อพิจารณารูปร่างการสั่น

ในการทดสอบระบบสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์โดยวิธี Impact test วิธีการทดสอบได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งการทดสอบจะใช้การเคาะที่เครื่องยนต์ทดสอบในตำแหน่งต่างๆ 4 ตำแหน่ง ตารางที่ 5.4 ถึง 5.7 จะแสดงผลการทดสอบซึ่งเป็นค่าความถี่และปริมาณจินตภาพที่วัดได้จากตัวยังสัญญาณความเร่งในกลุ่มของกราฟฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบโดยวิธี Impact test ในการเคาะที่ตำแหน่ง 1

สัญญาณ	ข้อมูล				
	Acc 1	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.25	5.31	7.13
Im		-33.60	-32.70	-7.53	-3.23
Acc 2	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.44
	Im	9.41	-6.36	-7.81	-7.47
Acc 3	ความถี่ธรรมชาติ	3.25	5.31	7.13	14.38
	Im	34.20	-30.50	-23.00	1.33
Acc 4	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.25	5.31	7.13	14.38
	Im	35.50	-21.00	-5.60	-0.82
Acc 5	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.38
	Im	12.90	-20.60	8.28	3.72
Acc 6	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.25	5.31	7.13	14.38
	Im	7.76	-17.20	18.70	-0.75

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบโดยวิธี Impact test ในการเคาะที่ตำแหน่ง 2

สัญญาณ	ข้อมูล				
	Acc 1	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.25	5.31	7.13
Im		-30.40	-34.10	-8.55	-13.90
Acc 2	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.25	5.31	7.13	14.38
	Im	9.17	-9.77	-9.19	-38.00
Acc 3	ความถี่ธรรมชาติ	3.25	5.31	7.13	14.44
	Im	34.40	-43.30	-23.90	6.57
Acc 4	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.63
	Im	30.20	-36.50	-7.30	-2.03
Acc 5	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.63
	Im	13.20	-32.80	16.80	12.10
Acc 6	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.63
	Im	7.99	-29.70	37.50	-2.41

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบโดยวิธี Impact test ในการเคาะที่ตำแหน่ง 3

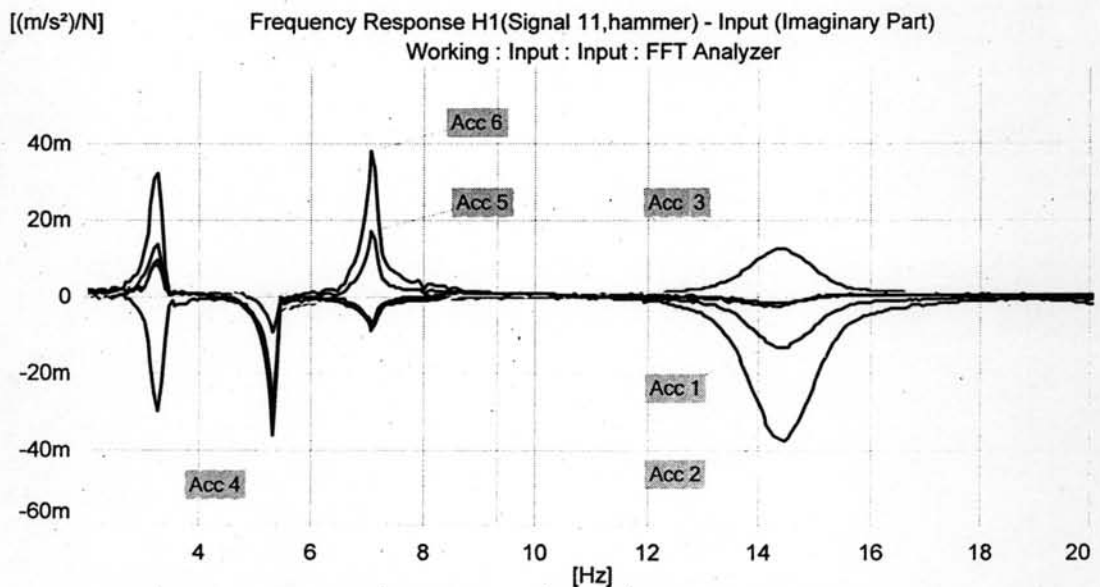
สัญญาณ	ข้อมูล				
Acc 1	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.25	5.31	7.13	14.44
	Im	-1.74	6.34	-14.00	10.30
Acc 2	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.38
	Im	2.13	-1.15	-17.70	28.70
Acc 3	ความถี่ธรรมชาติ	3.31	5.31	7.13	14.67
	Im	0.58	-8.18	-47.30	-0.01
Acc 4	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.38	5.31	7.13	14.63
	Im	6.26	-9.21	-10.00	-2.03
Acc 5	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.63
	Im	3.73	-9.65	29.30	-7.55
Acc 6	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.67
	Im	2.87	-1.85	59.10	3.79

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบโดยวิธี Impact test ในการเคาะที่ตำแหน่ง 4

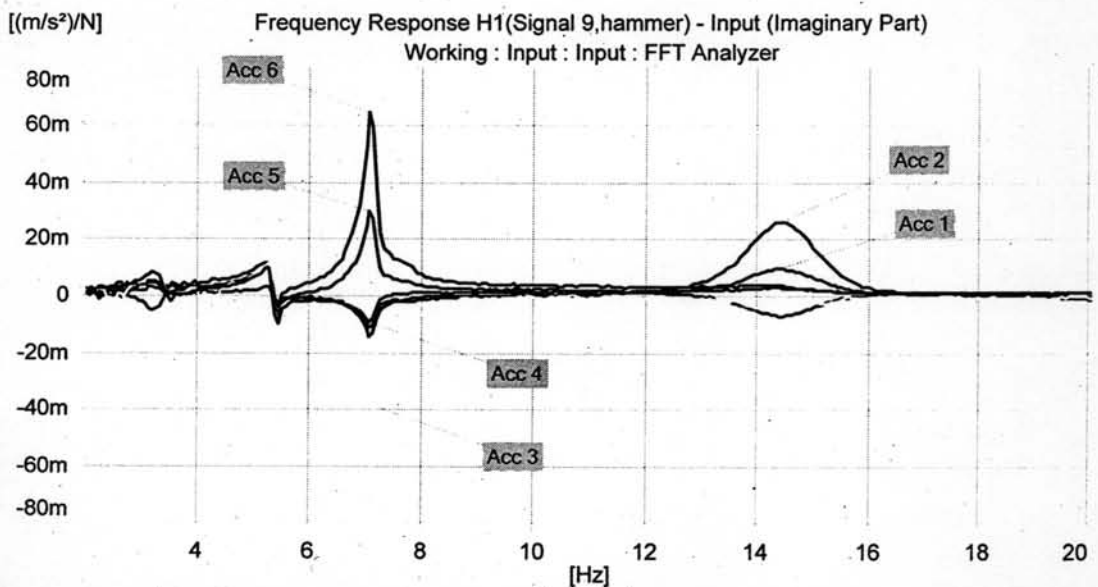
สัญญาณ	ข้อมูล				
Acc 1	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.25	5.31	7.13	14.44
	Im	47.00	4.38	-5.73	-3.29
Acc 2	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.25	5.31	7.13	14.38
	Im	-14.80	0.76	-7.17	-11.30
Acc 3	ความถี่ธรรมชาติ	3.31	5.31	7.13	14.44
	Im	-57.20	1.55	-24.10	0.55
Acc 4	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.63
	Im	-50.70	3.29	-7.58	-0.44
Acc 5	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.25	5.31	7.13	14.67
	Im	-20.60	4.39	15.70	2.14
Acc 6	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	3.31	5.31	7.13	14.67
	Im	-10.50	4.79	34.70	-0.43

ใช้ผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของความถี่ธรรมชาติ กับรูปร่างการสั่นที่เกิดขึ้นจริงจากการทดสอบได้โดยใช้ค่าที่อ่านได้ในฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ส่วนที่เป็นค่าจินตภาพ (Imaginary) ซึ่งเรียกว่าเป็น Modal displacement

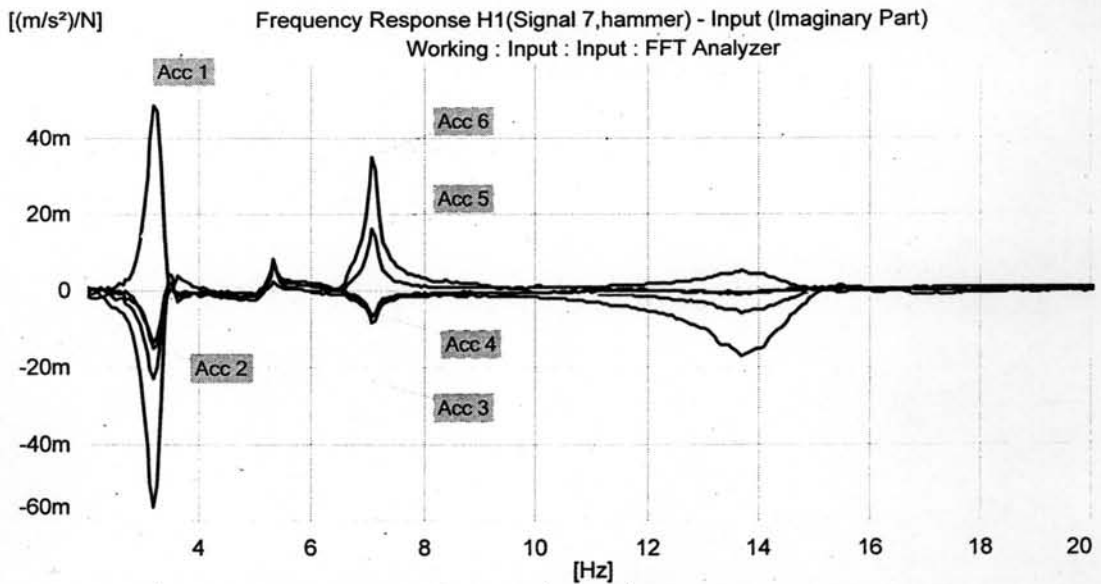
ในการทดสอบจะเคาะโครงสร้างของเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ และพิจารณาร่วมกับตำแหน่งที่ติดตั้งของตัวยังสัญญาณความเร่ง (Accelerometers) จะทำให้ได้ค่าของความถี่ธรรมชาติที่สัมพันธ์กับรูปร่างการสั่นที่เด่นของเครื่องยนต์ เพื่อประกอบการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความถี่ธรรมชาติกับรูปร่างการสั่นของเครื่องยนต์จะใช้รูปแสดงฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่จากการเคาะเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ดังรูปที่ 5.2 ถึง 5.4 ประกอบค่าที่แสดงดังตารางที่ 5.4 ถึง 5.7



รูปที่ 5.2 ฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ของเครื่องยนต์จากการเคาะตำแหน่ง 2



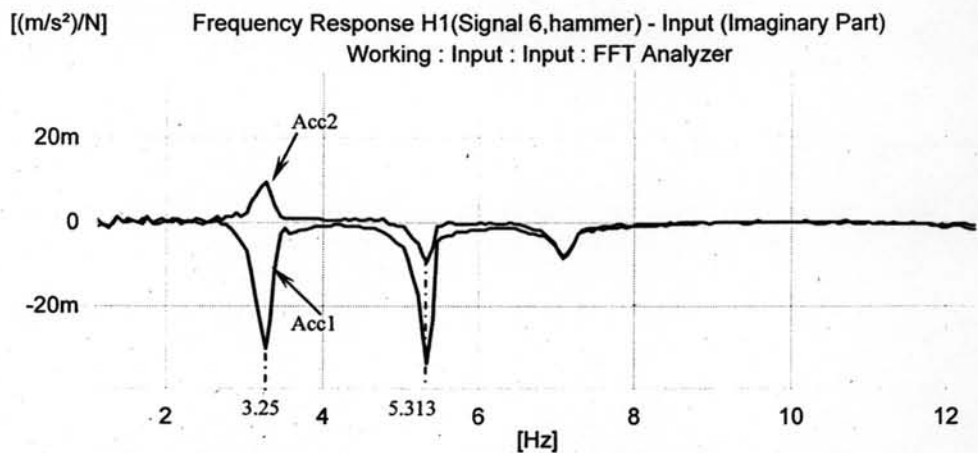
รูปที่ 5.3 ฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ของเครื่องยนต์จากการเคาะตำแหน่ง 3



รูปที่ 5.4 พังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ของเครื่องยนต์จากการเคาะตำแหน่ง 4

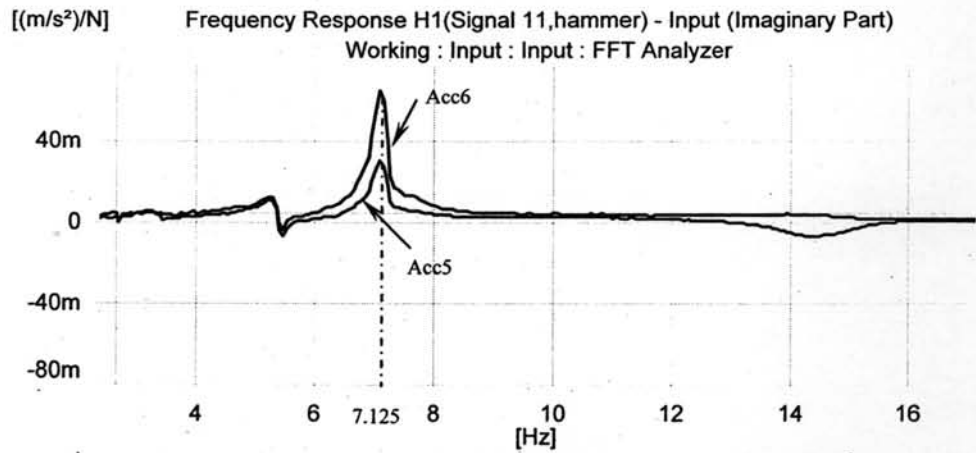
1) รูปร่างการสั่นแบบเชิงเส้น

สำหรับการหาความสัมพันธ์ของรูปร่างการสั่นแบบเชิงเส้น จะใช้การเคาะที่เครื่องยนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ และใช้ผลตอบสนองที่เด่นจากผลการทดสอบของตัวยังสัญญาณความถี่มาพิจารณาเป็นหลัก

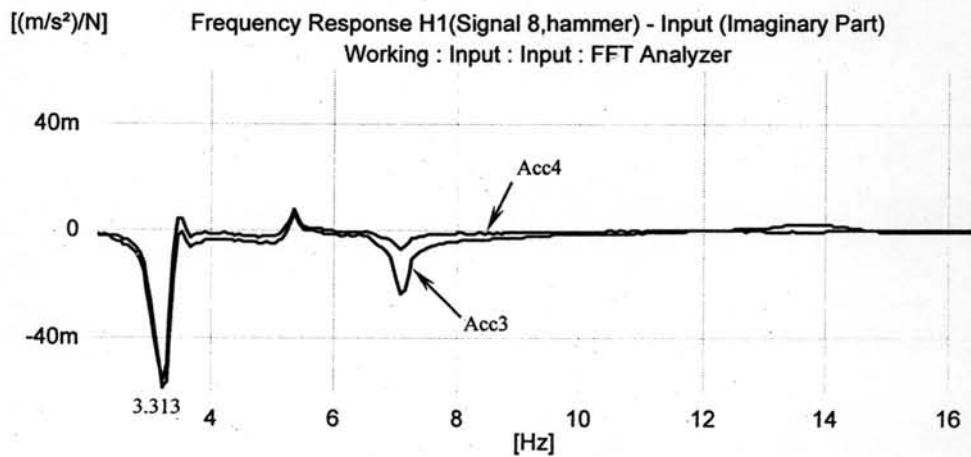


รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบของ Acc 1 และ Acc 2 จากการเคาะตำแหน่งที่ 2

จากรูปที่ 5.5 เป็นการเคาะเครื่องยนต์ที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งเป็นการเคาะที่ตั้งฉากกับระนาบ XY ของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นการเน้นเพื่อให้เกิดสัญญาณที่มีรูปแบบการสั่นแบบเด่นขึ้น-ลง และการกระดอน พบว่าที่ค่าความถี่ประมาณ 5.313 Hz จะมีค่าของสัญญาณค่อนข้างสูง และมีทิศทางไปในแนวเดียวกัน ซึ่งคาดว่ารูปแบบการสั่นแบบการเด่นขึ้นลง จะเด่นชัดที่ตำแหน่งความถี่นี้



รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบของ Acc 5 และ Acc 6 จากการเคาะตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบของ Acc 3 และ Acc 4 จากการเคาะตำแหน่งที่ 4

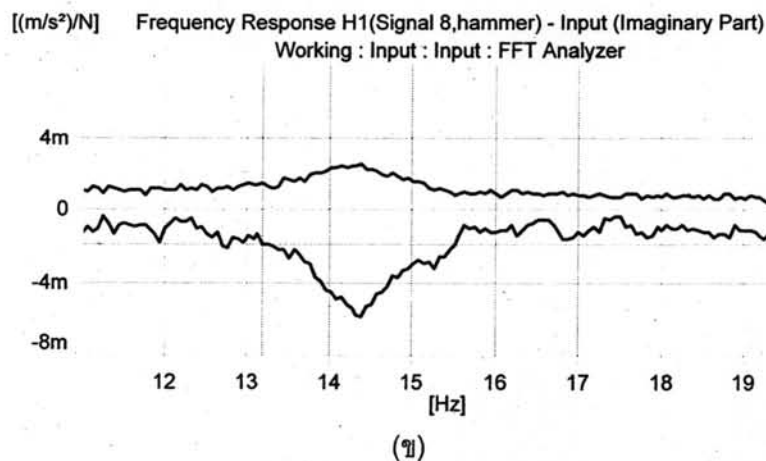
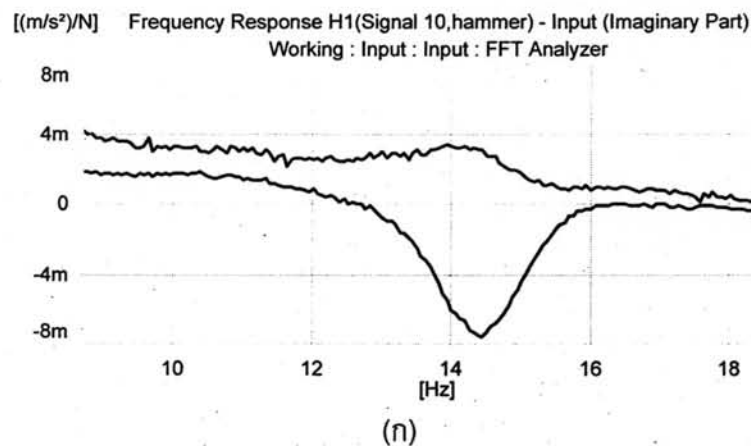
รูปที่ 5.6 การเคาะเครื่องยนต์ที่ตำแหน่ง 3 เป็นการเคาะให้ตั้งฉากในระนาบ XZ ตามแกนของเครื่องยนต์ การเคาะในระนาบดังกล่าวจะเป็นการเคาะเพื่อให้สัญญาณ การสั่นแบบด้านข้างและการส่ายของเครื่องยนต์ เด่นขึ้นมา จากค่าของผลทดสอบที่ได้ พบว่า ที่ความถี่ประมาณ 7.125 Hz จะมีผลตอบสนองที่เด่นขึ้นมาเมื่อเทียบกับผลตอบสนองที่ความถี่อื่น จากนั้นมาพิจารณารูปร่างการสั่นสุดท้ายคือรูปแบบการสั่นแบบตามยาวของเครื่องยนต์ ต้องใช้การเคาะเครื่องยนต์ ในแนวที่ตั้งฉากกับ ระนาบ ZY ซึ่งเป็นการเคาะที่เน้นทำให้เกิดรูปร่างการสั่นแบบตามยาวของเครื่องยนต์เป็นหลัก ผลการทดสอบแสดงได้ตามรูปที่ 5.7 ซึ่งคาดว่าความถี่ที่มีผลรูปร่างการสั่นแบบตามยาวของเครื่องยนต์เด่นชัดคือ 3.313 Hz

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น ทำให้สามารถแยกค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อรูปร่างการสั่นแบบเชิงเส้นเด่น ออกมาจากกลุ่มของค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้มีทั้งหมด 6 ค่า จากการทดลองสรุปได้ดังนี้

ที่ค่าความถี่ธรรมชาติ 3.313 Hz การสั่นตามยาวของเครื่องยนต์ จะเห็นได้เด่นชัด สำหรับการสั่นด้านข้างของเครื่องยนต์ ก็จะมีได้ง่ายที่ค่าความถี่ธรรมชาติ 7.125 Hz ส่วนการเต้นขึ้นลงของเครื่องยนต์ จะค่อนข้างเด่นบนความถี่ 5.313 Hz ดังนั้นจึงง่ายขึ้นในการพิจารณา ค่าความถี่ธรรมชาติที่เหลืออีก 3 ค่า ที่มีผลต่อรูปร่างการสั่นแบบเชิงมุมทั้ง 3 รูปแบบ

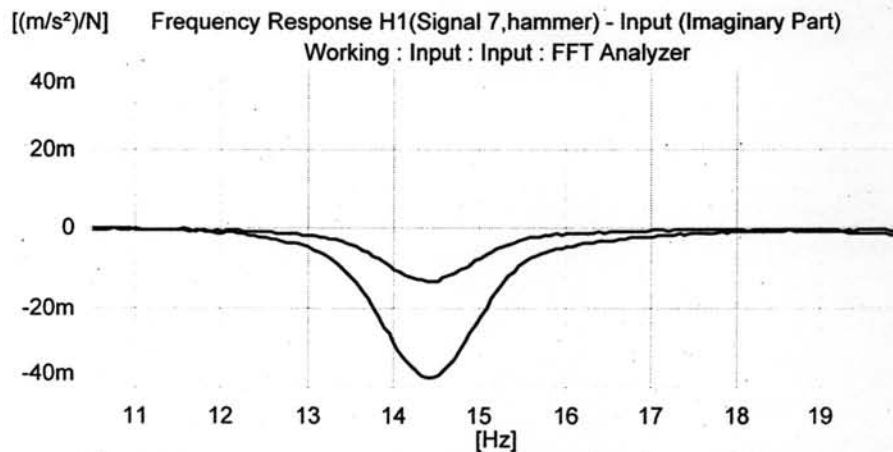
2) รูปร่างการสั่นแบบเชิงมุม

ในการวิเคราะห์เพื่อหารูปร่างการสั่นแบบเชิงมุม จะต้องใช้ผลตอบสนองทั้งขนาดและทิศทางของตัวห้อยสัญญาณความเร่ง 2 ตัว ร่วมกับการเคาะที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องยนต์ จึงจะทำให้สามารถมองออกถึงรูปร่างการสั่นที่คาดว่าจะเป็นไปได้ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ธรรมชาติที่เหลืออยู่ มาดูรูปที่ 5.5 ในการเคาะตำแหน่งที่ 2 เพื่อดูรูปร่างการสั่นแบบกระดองที่เด่นชัดบน Acc1 และ 2 โดยใช้รูปแบบการเคลื่อนที่ของ Modal displacement ที่มีทิศทางสวนทางกัน และเด่นชัดขึ้นมากกว่าที่ความถี่อื่น เมื่อพิจารณาร่วมกันในผลตอบสนองจากการเคาะที่ตำแหน่ง 4 ตามรูปที่ 5.4 ซึ่งจะเป็นการเน้นที่ทำให้เกิดรูปร่างการสั่นแบบกระดองที่เด่นเหมือนกัน และเกิดที่ความถี่เท่ากันคือ 3.250 Hz จากการพิจารณาดังกล่าวจึงคาดว่าความถี่ที่ทำให้รูปร่างการสั่นแบบการกระดองของเครื่องยนต์เด่นขึ้นมาคือ 3.250 Hz



รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบจากการเคาะตำแหน่งที่ 3 (ก) Acc 5 และ Acc 6 (ข) Acc 3 และ Acc 4

มาพิจารณารูปแบบการสั่นแบบการส่ายของเครื่องยนต์ก่อน พบว่าแม้จะมีปริมาณไม่มากที่ความถี่ประมาณ 14.67 Hz ก็เกิดค่าความถี่ธรรมชาติขึ้นมา และเมื่อวิเคราะห์ทิศทางเคลื่อนที่ของ Modal displacement ที่ความถี่นี้พบว่ามิติศทางที่สวนทางกัน ซึ่งในการเคาะเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งที่ 3 นอกจากเป็นการกระตุ้นเพื่อให้เกิดรูปแบบการสั่นด้านข้างของเครื่องยนต์แล้วยังทำให้เกิดการส่ายด้วย จึงสรุปได้ว่าที่ความถี่ธรรมชาติของระบบที่ได้จากการทดลองคือ 14.67 Hz จะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการสั่นแบบการส่ายของเครื่องยนต์



รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบจากการเคาะตำแหน่งที่ 2 ที่ Acc 1 และ Acc 2

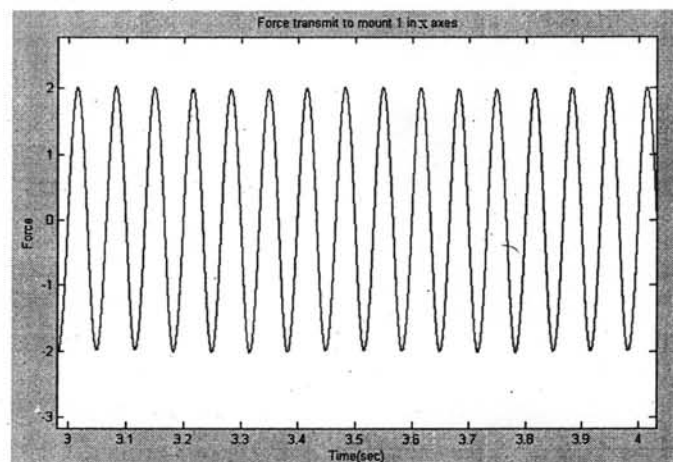
จากการเคาะเครื่องยนต์ในตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการเคาะที่เกิดขึ้นเป็นการเคาะในตำแหน่งที่ขนานกับระนาบ ZX จะทำให้ตัวยังสัญญาณความเร่ง แสดงค่ารูปร่างการสั่นแบบการโคลงตัวเด่นขึ้นมาด้วย จากผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.9 ที่ความถี่ประมาณ 14.44 Hz จึงคาดว่าน่าจะเป็นความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างทางกลที่แสดงการโคลงของเครื่องยนต์เด่นขึ้นมา

ค่าความถี่ธรรมชาติที่ทำให้การโคลงตัวของเครื่องยนต์เด่นขึ้นมา คือ 14.44 Hz และที่ 3.250 Hz จะเห็น การกระดอนของเครื่องยนต์ค่อนข้างชัดและการส่ายของเครื่องยนต์จะเด่นขึ้นมาใน ที่ 14.67 Hz

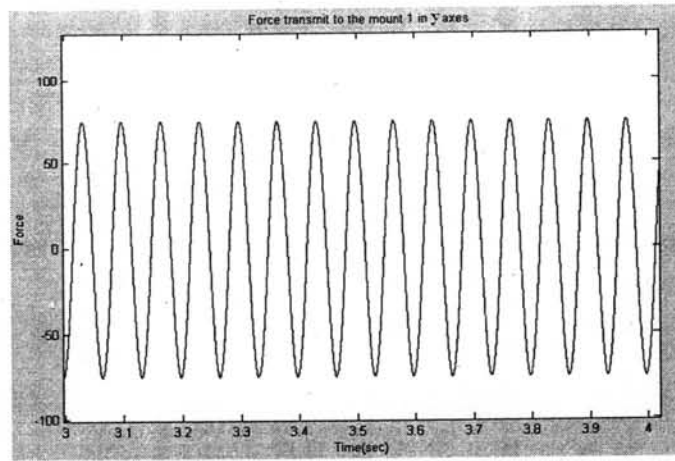
จากผลการทดสอบเพื่อพิจารณารูปร่างการสั่นโดยวิธีทดสอบโมดัล แบบ Impact test เมื่อเปรียบเทียบกับแนวโน้มที่จะเกิดรูปร่างทางทฤษฎี พบว่าแนวโน้มของรูปร่างการสั่นจะเด่นขึ้นมากับค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างกันบ้างของค่าความถี่ธรรมชาติในรูปร่างกัน สั่นแบบการเด่นขึ้นลงของเครื่องยนต์แต่ก็ถือว่ายังอยู่ในแนวโน้มเดียวกัน จากการศึกษาค้นคว้าผลการทดสอบโมดัลแสดงด้วยกราฟฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่พบว่าการกระตุ้นที่ทำให้เกิดรูปร่างการสั่นของวัตถุแข็งเกร็งทั้ง 6 รูปแบบคือการกระตุ้นในแนวแกน Z ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับการทำงานของลูกสูบ

5.3 การจำลองเพื่อหาค่าอัตราการส่งผ่านแรงของระบบรองรับเครื่องยนต์

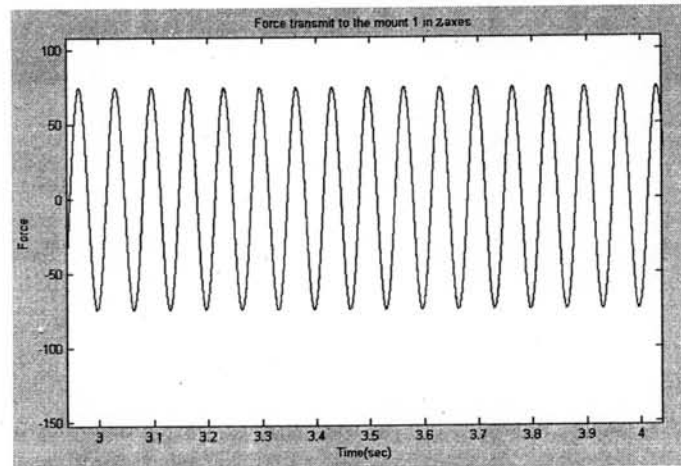
แบบจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองเพื่อหาค่าอัตราการส่งผ่านแรงไปยังจุดรองรับเครื่องยนต์ โดยจะสมมติแรงกระตุ้นกระทำที่จุดศูนย์กลางมวลของเครื่องยนต์ในแนวแกน Z ซึ่งเปรียบเสมือนการถูกกระตุ้นโดยการทำงานจากลูกสูบ โดยการคำนวณแรงที่ส่งผ่านไปยังจุดรองรับเครื่องยนต์ จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการทำงานของส่วน Simulink การคำนวณเริ่มจากระบบสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ ซึ่งประกอบด้วย เมทริกซ์มวล เมทริกซ์ความแข็งเกร็ง และเมทริกซ์ความหน่วง จากนั้นจะจำลองแรงที่กระตุ้นเข้าไปในระบบได้ผลการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ เป็นการสั่นเชิงเส้น 3 รูปแบบ และเป็นการสั่นเชิงมุม 3 รูปแบบ ที่จุดศูนย์กลางมวลของเครื่องยนต์ การเคลื่อนที่ดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปเป็นการเคลื่อนที่ที่จุดรองรับทั้ง 3 ตำแหน่ง ในรูปแบบของการเคลื่อนที่เชิงเส้นใน 3 แกนหลักที่ขนานในกับแกนอ้างอิง ที่จุดรองรับค่าความแข็งเกร็งและความหน่วงสมมูล ตามแนวแกน p q และ r ของอย่างแทนเครื่องจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งและความหน่วง แรงที่กระทำต่อจุดรองรับเครื่องยนต์จะเป็นแรงที่เกิดจากระยะกระจัด และความเร่ง ซึ่งแสดงได้เหมือนกับรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นส่วนของพื้นฐานของการหาอัตราการส่งผ่านแรงสำหรับแต่ละจุดรองรับซึ่งเกิดการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกนที่ขนานกับแกนอ้างอิง ดังนั้นจึงเกิดแรงทั้ง 3 แกนด้วย ในส่วนของโปรแกรมที่ถูกออกแบบมาสามารถคำนวณลักษณะแรงของที่จุดรองรับในแต่ละแกนหลักดังกล่าวได้ จากผลการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ แบบจำลองจะนำไปคำนวณค่าแรงที่กระทำต่อจุดรองรับเครื่องยนต์ รูปที่ 5.10 แสดงตัวอย่างที่เป็นลักษณะของแรงที่กระทำต่อจุดรองรับ 1 ในแนวแกนที่ขนานกับแกนหลักของเครื่องยนต์ที่ความถี่ของการกระตุ้น 15 Hz



(ก)



(๑)

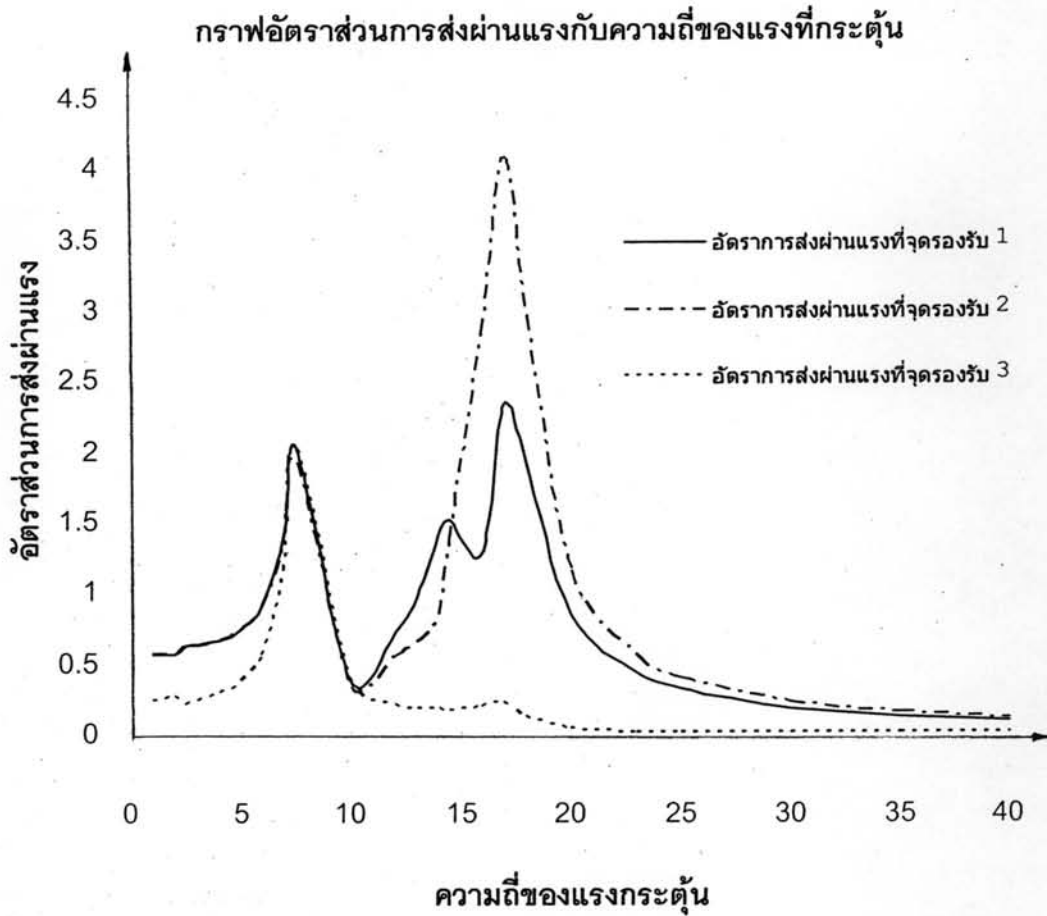


(ค)

รูปที่ 5.10 ลักษณะของแรงที่กระทำต่อจุดรองรับ 1 ที่ทิศทางขนานกับแกนหลักของเครื่องยนต์

(ก) ในแกน X (ข) ในแกน Y (ค) ในแกน Z

สำหรับการหาอัตราการส่งผ่านแรง ที่จุดรองรับต้องรวมแรงที่ตั้งฉากกันทั้ง 3 แกนเป็นแรงลัพธ์ที่กระทำต่อจุดรองรับแทนเครื่อง เมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่มากกระทำกับโครงสร้างทางกลของเครื่องยนต์ ก็จะได้อัตราการส่งผ่านแรงที่จุดรองรับแต่ละตำแหน่ง ตารางที่ 5.8 จะแสดงผลการคำนวณอัตราส่วนการส่งผ่านแรงที่จุดรองรับ ทั้ง 3 ตำแหน่งจากแรงกระตุ้นที่มีความถี่ต่างๆ และจากคำนวณอัตราส่วนการส่งผ่านแรงจากการกำหนดความถี่ของแรงที่กระตุ้นนำมาสร้างกราฟระหว่างอัตราส่วนการส่งผ่านแรงกับความถี่ของแรงที่กระตุ้นจะได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟอัตราส่วนการส่งผ่านแรงกับความถี่ของแรงที่กระตุ้น

สำหรับการคำนวณเพื่อหาอัตราส่วนการส่งผ่านแรง โดยการจำลองให้มีแรงกระทำในแนวแกน Z ของเครื่องยนต์ แล้วพิจารณาอัตราส่วนการส่งผ่านแรงที่เกิดขึ้นบนจุดรองรับในช่วงความถี่ของแรงกระตุ้นต่างๆ พบว่าอัตราส่วนการส่งผ่านผ่านแรงจะสูงที่สุดบนจุดรองรับ 2 ใกล้กับความถี่ธรรมชาติของระบบการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ที่ความถี่ 17.14 Hz โดยรูปร่างการเคลื่อนที่ที่จุดนี้มีลักษณะเป็นแบบการโคลงตัวของเครื่องยนต์เป็นหลัก จึงทำให้เกิดแรงกระทำที่จุดรองรับ 1 และ 2 มาก สำหรับความถี่ 14.5 Hz ของการกระตุ้นที่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติของระบบ จะพบว่าการสั่นที่น่าสนใจคือแบบการเต้นขึ้นลงทำให้จุดรองรับ 1 และ 2 มีลักษณะของแรงกระทำที่ใกล้เคียงกัน ช่วงความถี่ 7.5 ถึง 7.8 Hz พบว่า มีแรงกระทำที่จุดรองรับเครื่องยนต์ทั้ง 3 ตำแหน่งใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจากการคำนวณพบว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ในช่วงความถี่นี้จะมีการสั่นแบบเชิงมุมแบบการกระดอน การโคลงตัว และการส่ายของเครื่องยนต์ รวมถึงการสั่นแบบเชิงเส้นในลักษณะการเต้นขึ้นลงด้วย จากการสั่นในหลายรูปแบบทำให้มีแรงไปกระทำที่จุดรองรับทั้ง 3 ตำแหน่งจึงสังเกตเห็นอัตราการส่งผ่านของแรงค่อนข้างสูงในทุกจุดรองรับ

ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณอัตราส่วนการส่งผ่านแรงจากแรงกระตุ้นที่มีความถี่ต่างๆ

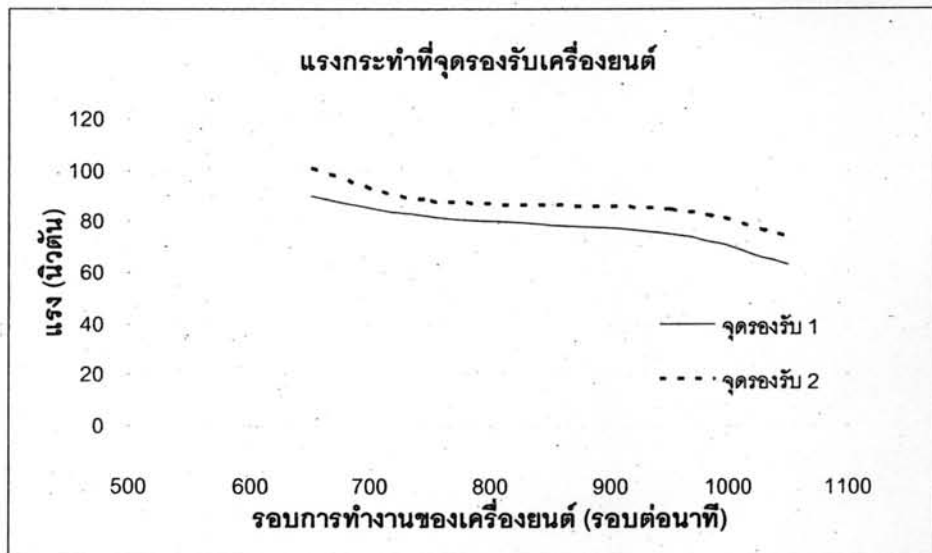
ความถี่ของแรง ที่กระตุ้น(Hz)	อัตราการส่งผ่านแรง		
	จุดรองรับ 1	จุดรองรับ 2	จุดรองรับ 3
1	0.5517	0.5511	0.2222
2	0.5536	0.5505	0.2604
2.5	0.718	0.694	0.2001
3	0.617	0.6106	0.2309
4	0.6526	0.646	0.2831
5	0.7331	0.7214	0.3654
6	0.9004	0.8791	0.5471
7	1.42	1.365	1.162
7.5	2.005	1.912	2.013
10	0.37	0.3294	0.3535
12	0.702	0.5418	0.2008
13	0.9668	0.6366	0.1747
14	1.425	0.8381	0.1631
14.5	1.497	1.355	0.155
15	1.108	1.853	0.1764
16	1.261	2.829	0.1787
17	2.321	4.055	0.2077
18	1.912	2.944	0.1166
20	0.8339	1.151	0.0248
23	0.4208	0.5405	0.0049
25	0.309	0.3859	0.0053
30	0.1751	0.2127	0.0053
35	0.1168	0.1384	0.0049
40	0.0845	0.1001	0.0042
45	0.0636	0.0761	0.0035
50	0.0509	0.0602	0.0029
55	0.04184	0.049	0.0023

ส่วนที่ความถี่ต่ำประมาณ 2.313-2.5 Hz ซึ่งใกล้ความถี่ธรรมชาติ พบว่าอัตราการส่งผ่านแรงค่อนข้างน้อยแม้ว่าจะใกล้กับความถี่ธรรมชาติ แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการเคลื่อนที่ที่คำนวณมาได้พบว่า การเคลื่อนที่แบบตามยาวของเครื่องยนต์จะมีปริมาณสูงสุด แต่ที่มีแรงกระทำที่จุดรองรับน้อยเนื่องจากสัมประสิทธิ์แข็งเกร็งในแกน X ของเครื่องยนต์น้อยกว่าในแกนอื่น จึงทำให้เมื่อคูณกับระยะกระจัดแรงที่เกิดขึ้นจึงน้อยตามไปด้วย ดังนั้นในการเลือกใช้งานของเครื่องยนต์จึงควรระวังไม่ควรเลือกใช้งานในช่วงความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยเฉพาะช่วง 17-18 Hz ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าอัตราส่วนการส่งผ่านแรงมากที่สุด

5.4 แรงที่กระทำบนจุดรองรับเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อจุดรองรับกับความเร็วยนต์ในการทำงาน จึงทดสอบหาแรงที่กระทำต่อจุดรองรับโดยตรง เนื่องจากมีข้อจำกัดจำนวนตัวห้อยสัญญาณความเร่งและความร้อนขณะเดินเครื่องยนต์จึงกำหนดให้มีการติดตั้ง Acc 3 จุดที่ตำแหน่งจุดรองรับเฉพาะในแนวแกน r ของยางแท่นเครื่องที่เป็นจุดที่ทำให้เกิดแรงกระทำสูงสุดเมื่อเทียบกับแรงกระทำในทิศทาง p และ q

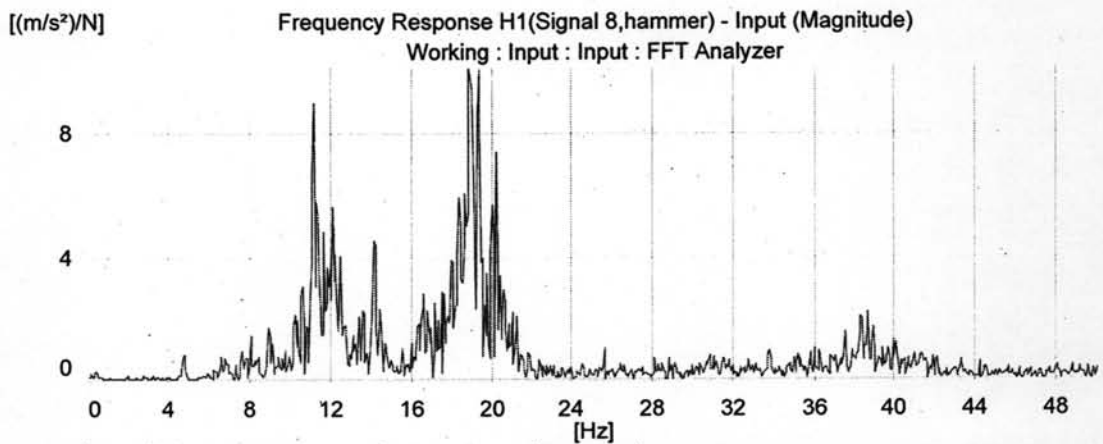
ในการหาแรงกระทำที่จุดรองรับเครื่องยนต์จะทดสอบขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน โดยเป็นการเดินตัวเปล่าที่รอบการทำงานต่างๆ ในการศึกษาจะทดสอบโดยเดินเครื่องยนต์ที่รอบการทำงานประมาณ 600-1200 รอบต่ออนาที ติดตั้งตัวห้อยสัญญาณความเร่งกับบนเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งจุดรองรับเครื่องยนต์โดยจุดติดตั้งจะติดตั้งขนานกับแกน r ของยางแท่นเครื่อง จากนั้นจึงต่อสัญญาณจากตัวห้อยสัญญาณความเร่งให้เข้ากับเครื่อง "Pulse-Multi analyzer" เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆ สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณความเร่งที่ตำแหน่ง



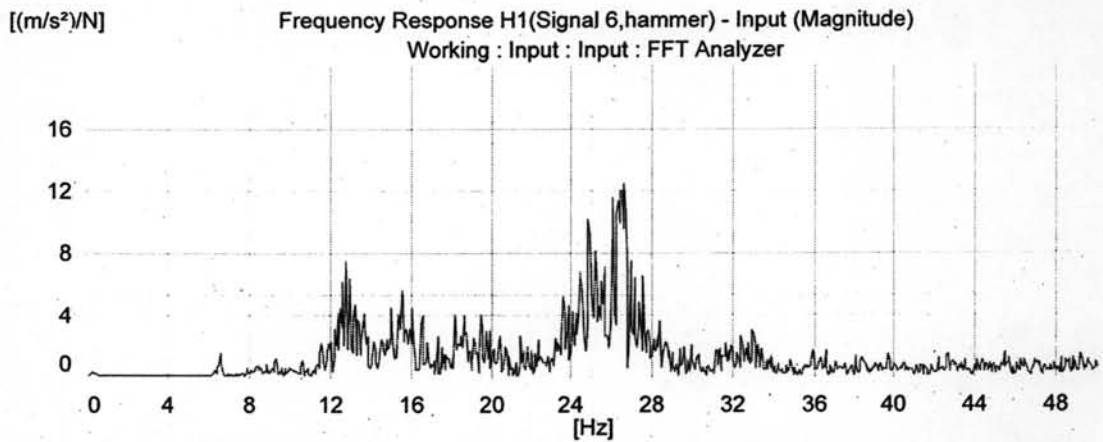
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ของแรงที่ส่งผ่านไปยังจุดรองรับกับรอบการทำงานของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ที่จุดรองรับนั้นๆ “Pulse-Multi analyzer” จะแปลงสัญญาณความเร่งที่ได้เป็นสัญญาณของการกระจัดและความเร็วของจุดรองรับที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ในรูปแบบของ สเปกตรัมที่มีความถี่ต่างๆ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่าของแรงกระทำที่จุดรองรับ พบว่าค่าของแรงกระตุ้นจริงที่เกิดความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของเครื่องยนต์ และรอบการทำงานของเครื่องยนต์ ผลจากการคำนวณแสดงได้ตามรูปที่ 5.12

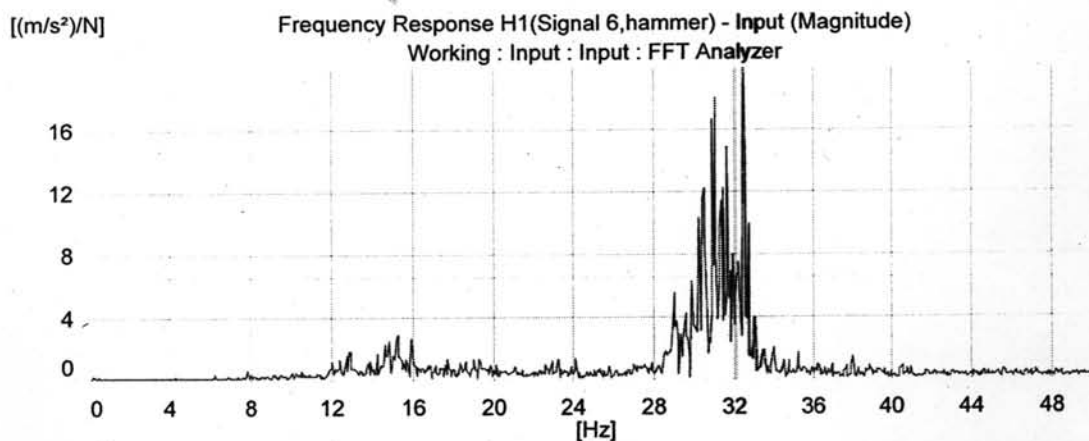
เมื่อทำการตรวจวัด Acc ที่บนเครื่องยนต์จะได้รูปที่ 5.13 ถึง 5.16 จะแสดงลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นบนเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ ของการทดสอบ



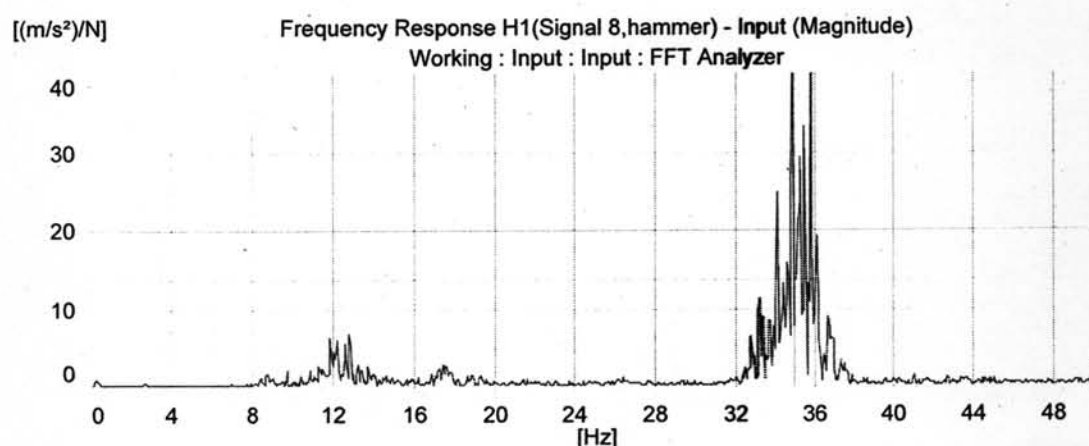
รูปที่ 5.13 ลักษณะแรงที่กระทำบนเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบประมาณ 550 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.14 ลักษณะแรงที่กระทำบนเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบประมาณ 700 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.15 ลักษณะแรงที่กระทำบนเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบประมาณ 900 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.16 ลักษณะแรงที่กระทำบนเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบประมาณ 1050 รอบต่อนาที

จากข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 5.12 ถึง 5.16 พบว่าแรงกระตุ้นโดยตรงที่มาจากการทำงานของเครื่องยนต์ในรอบการทำงานที่ทดสอบ ทำให้เกิดแรงกระทำที่จุดรองรับเครื่องยนต์ ทั้ง 3 จุดใน ความถี่ที่เป็น 2 เท่าของความถี่ที่กระตุ้นหรือรอบการทำงานของเครื่องยนต์ และแรงดังกล่าวจะมี แนวโน้มลดลงเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่รอบสูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับแรงที่กระตุ้นนั้นคือที่รอบการทำงาน ของเครื่องยนต์สูงขึ้นจะมีระดับของแรงกระตุ้นสูงขึ้น ดูได้จากรูปที่ 5.13 ถึง 5.16 เมื่อ พิจารณาเพิ่มพบว่าที่ความถี่ประมาณ 12-13 Hz เป็นความถี่ที่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติของระบบ จะเกิดระยะกระจัดและความเร็วที่จุดรองรับค่อนข้างมากคาดว่าแรงดังกล่าวอาจจะเกิดจากแรงที่ไม่สมดุลในการทำงานของเครื่องยนต์ซึ่งตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ และแรงดังกล่าวจะ ลดลงเมื่อรอบการทำงานของเครื่องยนต์สูงขึ้นนั้นความถี่ของแรงที่กระตุ้นห่างจากความถี่ ธรรมชาติมากขึ้น สำหรับค่าความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นอาจจะไม่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้ จากการทดสอบโมเดลเนื่องจากในการทดสอบเดินเครื่องจริงจำเป็นต้องติดตั้งท่อไอเสียกับ เครื่องยนต์ ทำให้ค่ามวลและคุณสมบัติอื่นๆ ของระบบเปลี่ยนไป ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ สันนิษฐานขณะเดินเครื่องจึงไม่เท่ากับการวิเคราะห์ในตอนก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังพบว่าในการ

วัดค่าสัญญาณความแรงที่เกิดขึ้นที่จุดรองรับ 3 ค่อนข้างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับ 1 และ 2 ทำให้การใช้แบบจำลองเพื่อทำนายอัตราการส่งผ่านแรงของระบบรองรับเครื่องยนต์ที่จุดรองรับ 3 อาจจะมีค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงมาก สาเหตุน่าจะเกิดจากระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของแรงกระตุ้นจากการทำงานของเครื่องยนต์อยู่ไกลจากจุดรองรับ 3 พอสมควรทำให้แรงกระตุ้นที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องยนต์น่าจะถูกทำให้น้อยลงจากคุณลักษณะของความแข็งเกร็งและความหน่วงภายในของวัสดุก่อนจะถึงจุดรองรับ

ในการหาอัตราการส่งผ่านแรงจะใช้แบบจำลองการสั่นสะเทือนที่ได้เป็นต้นแบบ แล้วจำลองแรงกระตุ้นที่ความถี่ต่าง ๆ แล้วใช้แบบจำลองคำนวณแรงที่กระทำที่จุดรองรับเครื่องยนต์ จะได้อัตราการส่งผ่านแรงต่อหนึ่งหน่วยที่เกิดขึ้นบนจุดรองรับเครื่องยนต์ เมื่อนำแบบจำลองมาใช้งานโดยพิจารณาแรงกระตุ้นจริงที่เกิดจากการทำงานของเครื่องยนต์จะเกิดที่ความถี่เป็น 2 เท่าของรอบการทำงานของเครื่องยนต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลกระทบจากค่าความถี่ธรรมชาติที่มีโอกาสเกิดจากการทำงานของเครื่องยนต์คือ ค่าระหว่าง 14.67 ถึง 17.14 Hz จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราการส่งผ่านแรงที่เกิดขึ้นบนจุดรองรับ 1 และ 2 มีค่าแม้ว่าจะมีโอกาสน้อยที่จะเกิด เนื่องจากในการใช้งานปกติของเครื่องยนต์จะไม่ได้ใช้งานที่รอบการทำงานของเครื่องยนต์ที่ต่ำมาก (450-520 รอบต่อนาที) ก็ตาม แต่ก็ควรคำนึงถึงในลักษณะการลดปริมาณการสั่นสะเทือนที่สูงในขั้นตอนการออกแบบ