

การศึกษาผลของการสวมอัดต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนของสเตเตอร์และเบสของสปินเดิล
มอเตอร์ด้วยวิธี Statistical Energy Analysis

นายกิติพงษ์ กาญจนธนาเลิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

STUDY OF EFFECT OF INTERFERENCE FIT ON VIBRATION TRANSMISSION OF
STATOR-BASE OF SPINDLE MOTOR BY STATISTICAL ENERGY ANALYSIS

Mr. Kitiphong Kanjanathanalert

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาผลของการสวมอัดต่อการส่งผ่านการ
สั้นสะท้อนของสเตเตอร์และเบสของสปินเดิลมอเตอร์
ด้วยวิธี Statistical Energy Analysis

โดย

นายกิตติพงษ์ กาญจนธนาเลิศ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภดนัย อาชวาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิติมา จินตนาวัน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภดนัย อาชวาคม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักร จันทลักขณา)

กิติพงษ์ กาญจนธนาเลิศ : การศึกษาผลของการสวมัดต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนของสเตเตอร์และเบสของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยวิธี Statistical Energy Analysis. (STUDY OF EFFECT OF INTERFERENCE FIT ON VIBRATION TRANSMISSION OF STATOR-BASE OF SPINDLE MOTOR BY STATISTICAL ENERGY ANALYSIS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.นภดนัย อาชวาคม, 271 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากฎและผลของค่าการสวมัดแบบแน่น (Interference fit) ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองในช่วงความถี่ที่หูของมนุษย์สามารถได้ยิน คือ 0 – 20 kHz โดยนำหลักการ Statistical energy analysis มาช่วยวิเคราะห์ผลในการทดสอบ ผลที่ได้จะช่วยทำให้เข้าใจผลของค่า Interference fit ต่าง ๆ กันต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองและสามารถนำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำต่อไป โดยงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการนำแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์จำนวน 5 ชุดซึ่งมีค่า Interference fit ต่าง ๆ กันมากระตุ้นด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน ค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้จาก Accelerometer และเครื่อง Laser Doppler Vibrometer ที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า Intrinsic loss factor และ Coupling loss factor ตามหลักการของ Statistical energy analysis และนำไปใช้ในการหาค่ากำลังการสั่นสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองแต่ละชุด และนำมาเปรียบเทียบระหว่างกันเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า Interference fit ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองต่อไป จากผลการทดสอบ พบว่าในช่วงความถี่ 0 – 20 kHz เมื่อค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์มีค่าลดลง จะส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าลดต่ำลง โดยเมื่อค่า Interference fit ลดลงต่ำกว่าค่าหนึ่ง จะส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมในช่วงความถี่ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นแทน โดยผลที่ได้นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการลดการสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ต่อไป

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5270223721: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : INTERFERENCE FIT/ SPINDLE MOTOR/ STATISTICAL ENERGY ANALYSIS

KITIPHONG KANJANATHANALERT : STUDY OF EFFECT OF INTERFERENCE FIT ON VIBRATION TRANSMISSION OF STATOR-BASE OF SPINDLE MOTOR BY STATISTICAL ENERGY ANALYSIS. ADVISOR : ASST. PROF. NOPDANAI AJAVAKOM, Ph.D., 271 pp.

This research aims to study the mechanism and effect of interference fit on vibration transmission between the model of stator and base in human audible frequency range (0 – 20 kHz) by using statistical energy analysis approach to analyze the experimental results. The results will explain the effect of interference fit on vibration transmission between two components and present the analytical approach that will lead to the accurate results. The experiment started with the excitation of 5 different interference fit models of spindle motor, the combination of stator and base, by impact hammer and vibration exciter. After the excitation, the vibrational values measured from accelerometer and laser doppler vibrometer were used in calculations of intrinsic loss factor, coupling loss factor and total vibration transmission power from stator to base using the statistical energy analysis approach. Finally, the results from the calculations of each model would be compared in order to study the effect of interference fit on vibration transmission between the model of stator and base. The experimental results show that for frequency range between 0 – 20 kHz, the less interference fit leads to less power transmission of the model. After the interference fit is below one point, the effect will be reversed, less interference fit leads to more power transmitted instead. All results can be applied to be an approach in reduction of the transmitted vibration from inner to outer of harddisk drive in further study.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2012

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์หนักิจ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย ผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำอันดีเกี่ยวกับการทำอุปกรณ์ในการทดสอบ ตลอดจนแจ้งเพื่ออุปกรณ์ซึ่งช่วยให้การทดสอบลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติมา จินตนาวัน ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักร จันทลักขณา อาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภดน้อย อาชวาคม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจและผลักดันผู้วิจัย ตลอดจนให้แนะนำ คำปรึกษา และแจ้งเพื่ออุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยตลอดมา จึงทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณคณะกรรมการศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่แจ้งเพื่อสถานที่ในการวิจัย ตลอดจนสนับสนุนทุนการศึกษาเป็นจำนวน 4 ภาคการศึกษาอันเป็นการแบ่งเบาภาระทางการเงินแก่ผู้วิจัย

กราบขอบพระคุณมารดา และ ครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุนและให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัยเสมอมา จึงทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ผ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัยโดยย่อ.....	3
1.5 แผนการดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.7 ลำดับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	7
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 เสียงรบกวนจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	9
2.2 สปีนเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว.....	10
2.2.1 โครงสร้างภายในและส่วนประกอบสำคัญของสปีนเดิลมอเตอร์สำหรับ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว.....	10
2.2.2 หลักการทำงานของสปีนเดิลมอเตอร์ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว.....	11
2.3 แหล่งกำเนิดเสียงรบกวนและสาเหตุสำคัญของการสั่นสะเทือนภายในสปีนเดิล มอเตอร์.....	12

2.4	กลไกสำคัญที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของเสียงรบกวนจากการทำงานของ สปินเดิลมอเตอร์และแนวทางในการลดการแพร่กระจายของเสียงรบกวน.....	16
2.5	ความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานผิวสัมผัสระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำกับ ฐานของสปินเดิลมอเตอร์กับการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้ง สอง.....	18
2.6	สรุปการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 Statistical Energy Analysis.....		28
3.1	หลักการเบื้องต้นของ Statistical energy analysis.....	29
3.2	การสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis.....	30
3.3	พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหลักการ Statistical energy analysis.....	32
3.3.1	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อย (Damping loss factor หรือ Intrinsic loss factor).....	32
3.3.2	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย (Coupling loss factor).....	34
3.3.3	กำลังที่กระตุ้นจากภายนอก (Input power).....	37
3.4	การนำหลักการ Statistical energy analysis ไปใช้ในการประมาณค่าผลตอบ สนองทางการสั่นสะเทือนต่าง ๆ.....	38
3.5	ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของหลักการ Statistical energy analysis.....	40
3.6	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์ การสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงรบกวนภายในมอเตอร์ไฟฟ้า.....	41
3.7	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์ การสั่นสะเทือนภายในสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ.....	45
บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยละเอียด.....		47
4.1	การประยุกต์ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	48
4.2	การออกแบบแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	52

4.3 การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ.....	55
4.3.1 การทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและ ฐานของสปริงเดลิมาเตอร์โดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ.....	55
4.3.1.1 แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	57
4.3.1.2 แบบจำลองของฐานของสปริงเดลิมาเตอร์.....	58
4.3.2 การทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของสปริงเดลิมาเตอร์โดยการ กระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ.....	59
4.3.2.1 แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	60
4.3.2.2 แบบจำลองของฐานของสปริงเดลิมาเตอร์.....	60
4.4 การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้านการ สั่นสะเทือนด้วยค้อนเคาะ.....	61
4.4.1 แบบจำลองของ Statistical energy analysis.....	62
4.4.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของ ระบบย่อยแต่ละระบบ.....	63
4.4.2.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง...64	
4.4.2.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง..65	
4.4.3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย.....	68
4.4.3.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย.....	70
4.4.3.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย.....	72
4.4.4 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวม (Total vibration transmission power).....	75
4.5 การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้านการ สั่นสะเทือนด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	78
4.5.1 แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	81

4.5.1.1 การออกแบบและสร้างแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	81
4.5.1.2 การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	82
4.5.1.3 การทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	84
4.5.2 การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแบบจำลองของสปริงเดิลมอเตอร์.....	86
4.5.3 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบ.....	88
4.5.3.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง...	88
4.5.3.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง...	90
4.5.4 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย.....	92
4.5.4.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย.....	92
4.5.4.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย.....	95
4.5.5 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวม.....	97
4.6 การทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis.....	97
4.6.1 ค้อนเคาะ.....	98
4.6.2 เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	99
บทที่ 5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	101
5.1 ผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ.....	101
5.1.1 แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	101
5.1.1.1 กระตุ้นในทิศทางตามแนวแกน.....	101
5.1.1.2 กระตุ้นในทิศทางตามแนวสัมผัส.....	103
5.1.2 แบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์.....	104
5.1.3 แบบจำลองของสปริงเดิลมอเตอร์.....	107

5.1.3.1	กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	107
5.1.3.2	กระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์.....	108
5.2	ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบด้วยค้อนเคาะ.....	110
5.2.1	แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	111
5.2.2	แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์.....	112
5.3	ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ.....	113
5.3.1	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์.....	113
5.3.2	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	115
5.4	ผลการทดสอบหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ.....	117
5.5	ผลการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	124
5.5.1	ผลการทดสอบหาโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	124
5.5.2	ผลการเปรียบเทียบโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อใช้แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียรขนาด 6 นิ้วในการกระตุ้น.....	126
5.5.3	ผลการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	129
5.6	ผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	131
5.6.1	กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	131
5.6.2	กระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์.....	133

5.7 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	136
5.7.1 แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	136
5.7.2 แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์.....	137
5.7.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	138
5.8 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	139
5.8.1 สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำฐานของสปินเดิลมอเตอร์.....	140
5.8.2 สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	141
5.9 ผลการทดสอบหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	143
5.10 ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis.....	148
5.10.1 การกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ.....	148
5.10.2 การกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	151
5.10.2.1 กระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 1.5 เท่าของความเร่งปกติ....	152
5.10.2.2 กระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 0.5 เท่าของความเร่งปกติ....	153
บทที่ 6 บทสรุป.....	158
6.1 ผลสรุปงานวิจัย.....	158
6.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	162
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาต่อในอนาคต.....	163

รายการอ้างอิง.....	165
ภาคผนวก.....	167
ภาคผนวก ก การประยุกต์ทฤษฎีของ Metherell และ Diller ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกลไกแรงเสียดทานผิวสัมผัสของวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์กับการสูญเสียพลังงานการสั่นสะเทือนเนื่องจากความหน่วงจากแรงเสียดทาน.....	168
ภาคผนวก ข อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	180
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ.....	188
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	230
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบเพื่อเลือกแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	263
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	271

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการและระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	6
ตารางที่ 4.1 ขนาดของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐาน ของสปินเดิลมอเตอร์และค่า Interference fit ของแบบจำลองแต่ละชุด.....	55
ตารางที่ 5.1 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อใช้ ค้อนเคาะกระตุ้นในทิศทางตามแนวแกน.....	102
ตารางที่ 5.2 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อใช้ ค้อนเคาะกระตุ้นในทิศทางตามแนวสัมผัส.....	103
ตารางที่ 5.3 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์.....	104
ตารางที่ 5.4 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นบริเวณ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนว สัมผัส.....	107
ตารางที่ 5.5 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นบริเวณ แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวแกน.....	108
ตารางที่ 5.6 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวด เหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในการทดสอบด้วยค้อนเคาะ.....	121
ตารางที่ 5.7 โหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	124
ตารางที่ 5.8 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นแบบ จำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนใน ทิศทางตามแนวสัมผัส.....	131
ตารางที่ 5.9 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นแบบ จำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนใน ทิศทางตามแนวแกน.....	134
ตารางที่ 5.10 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวด เหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิด แรงสั่นสะเทือน.....	145

ตารางที่ 5.11 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของ สปริงเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จากหลักการ Statistical energy analysis กับค่าที่วัดได้จริงจากการทดสอบด้วยค้อนเคาะ.....	150
ตารางที่ 5.12 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของ สปริงเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จากหลักการ Statistical energy analysis กับค่าที่วัดได้จริงจากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	155

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของสปินเดิลมอเตอร์ประเภท Fluid Dynamic Bearing สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	10
รูปที่ 2.2 ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์และช่องระหว่างแท่งฟันขดลวดของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	11
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของเสียงที่วัดได้จากสปินเดิลมอเตอร์ภายในห้องไร้เสียงสะท้อน (ก) วัดขณะทำงานปกติ (ข) วัดทันทีที่หยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 2.4 ทิศทางการสั่นสะเทือนที่บริเวณต่าง ๆ ของสปินเดิลมอเตอร์.....	17
รูปที่ 2.5 จุดกำเนิดของการสั่นสะเทือนจากกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและทิศทางในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์.....	18
รูปที่ 2.6 แบบจำลองทางพลศาสตร์อย่างง่ายของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์.....	19
รูปที่ 2.7 แผ่นชิ้นงานสองแผ่นที่ถูกกดให้ประกบติดกันด้วยแรงดันกระจายตัวแบบคงที่.....	21
รูปที่ 2.8 แผนภาพของแรงภายในของแผ่นชิ้นงานแต่ละตำแหน่งที่เกิดในช่วง Initial Loading phase.....	22
รูปที่ 2.9 แผนภาพแรงภายในของแผ่นชิ้นงานแต่ละตำแหน่งที่เกิดในช่วง Unloading phase.....	24
รูปที่ 2.10 แผนภาพแรงภายในของแผ่นชิ้นงานแต่ละตำแหน่งที่เกิดในช่วง Reloading phase.....	25
รูปที่ 2.11 แผนภาพความสัมพันธ์ของระยะขจัดกับแรงภายนอกที่กระทำกับปลายของแผ่นชิ้นงานแต่ละแผ่นทั้ง 3 ชั้นตอน.....	26
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของสิ่งก่อสร้างที่จะนำสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis.....	31
รูปที่ 3.2 แบบจำลองอย่างง่ายของ Statistical energy analysis ของระบบของสิ่งก่อสร้าง.....	31
รูปที่ 3.3 การทดสอบเพื่อหาค่า Intrinsic loss factor.....	32
รูปที่ 3.4 ระบบย่อยสองระบบที่มีการรับพลังงานจากภายนอก สะสมและแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน.....	34
รูปที่ 3.5 ระบบย่อยสองระบบที่จะนำมาใช้ในการประมาณค่าผลตอบสนองของทางการสั่นสะเทือนด้วยหลักการ Statistical energy analysis.....	39
รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบหลักของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องในการส่งผ่านการสั่นสะเทือน.....	41

รูปที่ 3.7 แผนผังที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือนภายในมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยหลักการ Statistical energy analysis.....	42
รูปที่ 3.8 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียภายในโครงสร้างของระบบย่อยแต่ละระบบ.....	43
รูปที่ 3.9 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย.....	44
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ในลักษณะของเพลลาและทรงกระบอกกลวงซึ่งเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน.....	48
รูปที่ 4.2 แบบจำลองการสวมอัตราระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิล มอเตอร์ในสองมิติ.....	49
รูปที่ 4.3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดเชิงมุมกับสัมประสิทธิ์ของแรงบิดที่กระทำ ภายนอกทรงกระบอกกลวง.....	50
รูปที่ 4.4 สปินเดิลมอเตอร์จริงและส่วนประกอบสำคัญทั้งสองส่วน.....	52
รูปที่ 4.5 ภาพวาดและขนาดของแบบจำลอง (ก) วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) ฐานของ สปินเดิลมอเตอร์.....	53
รูปที่ 4.6 ส่วนประกอบของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อผลิตเสร็จ (ก) วงแหวน ขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) ฐานของสปินเดิลมอเตอร์.....	54
รูปที่ 4.7 ชุดแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์หลังประกอบส่วนประกอบทั้งสองเข้าด้วยกัน.....	55
รูปที่ 4.8 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวด เหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ.....	56
รูปที่ 4.9 จุดที่แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทาง ตามแนวแกนและจุดติด Accelerometer.....	57
รูปที่ 4.10 จุดที่แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทาง ตามแนวสัมผัสและจุดติด Accelerometer.....	58
รูปที่ 4.11 จุดที่แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทาง ตามแนวแกนและจุดติด Accelerometer.....	58
รูปที่ 4.12 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ โดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ.....	59
รูปที่ 4.13 จุดกระตุ้นด้วยค้อนเคาะและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV ในการ ทดสอบแบบโมดอลโดยกระตุ้นแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์บริเวณวงแหวน ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	60

รูปที่ 4.14 จุดกระตุ้นด้วยค้อนเคาะและจุดที่วัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV ในการทดสอบแบบโมดอลโดยกระตุ้นแบบจำลองของสปริงเดิลมอเตอร์บริเวณฐานของสปริงเดิลมอเตอร์.....61

รูปที่ 4.15 แบบจำลองของ Statistical energy analysis ที่จะนำมาใช้ประกอบในการวิเคราะห์ผลทางด้านการสั่นสะเทือนด้วยหลักการ Statistical energy analysis.....62

รูปที่ 4.16 แผนภาพประกอบการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง (ก) แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) แบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์.....63

รูปที่ 4.17 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองโดยการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ.....64

รูปที่ 4.18 จุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นและจุดที่ใช้ Accelerometer และเครื่อง LDV ในการวัดค่าการสั่นสะเทือน (ก) แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) แบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์.....65

รูปที่ 4.19 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงสำหรับการทดสอบด้วยค้อนเคาะ.....68

รูปที่ 4.20 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองโดยการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ.....70

รูปที่ 4.21 จุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ, จุดติด Accelerometer และจุดที่ใช้เครื่อง LDV ในการวัดความเร็วการสั่นสะเทือนที่จุดต่าง ๆ.....71

รูปที่ 4.22 จุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์, จุดติด Accelerometer และจุดที่ใช้เครื่อง LDV ในการวัดความเร็วการสั่นสะเทือนที่จุดต่าง ๆ.....72

รูปที่ 4.23 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียจากระบบย่อย 1 สู่อะบบย่อย 2 สำหรับการทดสอบด้วยค้อนเคาะ.....74

รูปที่ 4.24 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียจากระบบย่อย 2 สู่อะบบย่อย 1 สำหรับการทดสอบด้วยค้อนเคาะ.....75

รูปที่ 4.25 แบบจำลองการส่งผ่านการสั่นสะเทือนเมื่อวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้น โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า.....	76
รูปที่ 4.26 แรงคลื่นในโดเมนความถี่ที่เกิดจากการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นขึ้นทดสอบ.....	78
รูปที่ 4.27 เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration exciter).....	79
รูปที่ 4.28 ส่วนเคลื่อนที่ (Moving element) และ Accelerometer ที่ช่วยควบคุมการสั่น สะเทือน.....	79
รูปที่ 4.29 ความเร่งการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน..	80
รูปที่ 4.30 รูปแบบของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ทำมาจากเหล็กเจียร.....	82
รูปที่ 4.31 รูปแบบของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ทำมาจากอะลูมิเนียมและเหล็กกล้า ไร้สนิม.....	82
รูปที่ 4.32 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่าน การสั่นสะเทือนแต่ละแท่ง.....	83
รูปที่ 4.33 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่อง กำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	84
รูปที่ 4.34 จุดที่กระตุ้นขึ้นทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและจุดวัดค่าการสั่น สะเทือนด้วยเครื่อง LDV (ก) จุดกระตุ้น (ข) จุดวัดค่าการสั่นสะเทือน.....	85
รูปที่ 4.35 จุดที่กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในการทดสอบแบบโมดอล โดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและจุดที่ใช้เครื่อง LDV วัดค่าการสั่นสะเทือน.....	87
รูปที่ 4.36 การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (ก) จุดกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ (ข) จุดวัดค่า ความเร็วการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV.....	88
รูปที่ 4.37 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจาก ความหน่วงของขึ้นทดสอบโดยการกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	89
รูปที่ 4.38 จุดกระตุ้นและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ นำ (ก) จุดวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV (ข) จุดกระตุ้นด้วยเครื่อง กำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	90

รูปที่ 4.39 จุดกระตุ้นและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของฐานของสปริงเดิล มอเตอร์ (ก) จุดวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV (ข) จุดกระตุ้นด้วย เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	90
รูปที่ 4.40 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความ หน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบสำหรับการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่น สะเทือน.....	92
รูปที่ 4.41 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่าง ระบบย่อยโดยใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	93
รูปที่ 4.42 จุดกระตุ้นและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดสอบโดยการใช้เครื่องกำเนิด แรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ.....	94
รูปที่ 4.43 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบ ย่อยโดยใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของ สปริงเดิลมอเตอร์.....	94
รูปที่ 4.44 จุดกระตุ้นและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดสอบโดยการใช้เครื่องกำเนิดแรง สั่นสะเทือนในการกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์ (ก) จุดกระตุ้น ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (ข) จุดวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV.....	95
รูปที่ 4.45 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย จากระบบย่อย 1 ไปสู่ระบบย่อย 2 สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรง สั่นสะเทือน.....	96
รูปที่ 4.46 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย จากระบบย่อย 2 ไปสู่ระบบย่อย 1 สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรง สั่นสะเทือน.....	96
รูปที่ 4.47 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis ด้วยค้อนเคาะ.....	98
รูปที่ 4.48 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	99

รูปที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวน
 ขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 5 ชั้นจากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ.....111

รูปที่ 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของฐานของ
 สปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชั้นจากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ.....112

รูปที่ 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวน
 ขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์จากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ.....112

รูปที่ 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของ
 สปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ.....115

รูปที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบ
 จำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะ.....116

รูปที่ 5.6 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ
 สู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการทดสอบด้วยค้อนเคาะ.....117

รูปที่ 5.7 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ในรูปแบบ
 จำลองมวลรวมแบบก้อนที่มีการเคลื่อนที่สององศาอิสระ.....119

รูปที่ 5.8 พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของ
 สปินเดิลมอเตอร์ในรูปแบบจำลองมวลรวมแบบก้อนที่มีการเคลื่อนที่สอง
 องศาอิสระ.....119

รูปที่ 5.9 ค่าบวกของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวน
 ขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการ
 ทดสอบด้วยค้อนเคาะ.....120

รูปที่ 5.10 แผนภูมิแบบแท่งของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของ
 วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในการทดสอบด้วย
 ค้อนเคาะ.....123

รูปที่ 5.11 ผลการสั่นสะเทือน ณ จุดที่ 1 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1
 และชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร
 ขนาด 6 นิ้ว.....126

รูปที่ 5.12 ผลการสันสะเทือน ณ จุดที่ 2 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสันสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร ขนาด 6 นิ้ว.....	127
รูปที่ 5.13 ผลการสันสะเทือน ณ จุดที่ 3 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสันสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร ขนาด 6 นิ้ว.....	127
รูปที่ 5.14 ผลการสันสะเทือน ณ จุดที่ 4 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสันสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร ขนาด 6 นิ้ว.....	128
รูปที่ 5.15 ผลการสันสะเทือน ณ จุดที่ 5 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสันสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร ขนาด 6 นิ้ว.....	128
รูปที่ 5.16 โหมดการสันสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 1 จากการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสันสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 9 นิ้วเทียบกับ ผลจากค้อนเคาะ.....	130
รูปที่ 5.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 5 ชั้นจากการใช้เครื่องกำเนิดแรงสันสะเทือนในการทดสอบ.....	136
รูปที่ 5.18 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของฐานของ สปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชั้นจากการใช้เครื่องกำเนิดแรงสันสะเทือนในการทดสอบ.....	137
รูปที่ 5.19 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและ เครื่องกำเนิดแรงสันสะเทือน.....	138
รูปที่ 5.20 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์จากการใช้เครื่องกำเนิดแรงสันสะเทือนในการทดสอบ.....	140
รูปที่ 5.21 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของ สปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจากการใช้เครื่องกำเนิดแรงสันสะเทือนในการทดสอบ.....	141

รูปที่ 5.22 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลอง ของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่น สะเทือน.....	142
รูปที่ 5.23 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ สู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการทดสอบด้วยเครื่อง กำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	143
รูปที่ 5.24 ค่าบวกของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวน ขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการ ทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	144
รูปที่ 5.25 แผนภูมิแบบแท่งของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในการทดสอบด้วยเครื่อง กำเนิดแรงสั่นสะเทือน.....	147
รูปที่ 5.26 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล มอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงเมื่อใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น.....	149
รูปที่ 5.27 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล มอเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงเมื่อใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น.....	149
รูปที่ 5.28 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล มอเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงเมื่อใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น	150
รูปที่ 5.29 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล มอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่น สะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 1.5 เท่าของความเร่งปกติ.....	152
รูปที่ 5.30 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล มอเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่น สะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 1.5 เท่าของความเร่งปกติ.....	152
รูปที่ 5.31 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล มอเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่น สะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 1.5 เท่าของความเร่งปกติ.....	153

- รูปที่ 5.32 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสันสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล
มอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสัน
สะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสันสะเทือน 0.5 เท่าของความเร่งปกติ.....153
- รูปที่ 5.33 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสันสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล
มอเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสัน
สะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสันสะเทือน 0.5 เท่าของความเร่งปกติ.....154
- รูปที่ 5.34 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสันสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล
มอเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสัน
สะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสันสะเทือน 0.5 เท่าของความเร่งปกติ.....154

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A_j	พื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใด ๆ	m^2
A_{total}	ผลรวมของพื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใด ๆ ทั้งหมดของระบบย่อย i	m^2
a_j	ความเร่งการสั่นสะเทือนของระบบย่อยที่เกิดจากการกระตุ้นครั้งที่ j ด้วยค้อนเคาะ	m/s^2
F_j	แรงที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยครั้งที่ j ด้วยค้อนเคาะ	N
j	การกระตุ้นครั้งที่ j	
m_i	มวลของระบบย่อย i	kg
P_i	กำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อย i	watt
P_{12}	กำลังการสั่นสะเทือนที่สูญเสียจากระบบย่อย 1 ไปสู่ระบบย่อย 2	watt
$P_{1 \rightarrow 2}$	กำลังการสั่นสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากระบบย่อย 1 สู่อะบบย่อย 2	watt
v_j	ความเร็วการสั่นสะเทือนของระบบย่อยที่เกิดจากการกระตุ้นครั้งที่ j ด้วยค้อนเคาะ	m/s
$\langle v_i^2 \rangle_{sp}$	ค่าความเร็วการสั่นสะเทือนกำลังสองเฉลี่ยตามพื้นที่ของระบบย่อย i (space-averaged square velocity)	$(m/s)^2$
W_i	พลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อย i	Joule
W_{i1}	พลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อย i เมื่อระบบย่อย 1 ถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะหรือเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน	watt
$W_{i,measured}$	พลังงานการสั่นสะเทือนจริงของระบบย่อย i ที่วัดได้	watt
$W_{i,calculated}$	พลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อย i จากการประมาณค่า	watt
ω	ความถี่การสั่นสะเทือน	rad/s
η_i	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อย i	1/rad
η_{ii}	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียรวมของระบบย่อย i	1/rad
η_{ij}	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากระบบย่อย i สู่อะบบย่อย j	1/rad

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน คอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของคนเรามากยิ่งขึ้น ทั้งในด้านการทำงาน ความบันเทิง หรือแม้แต่การติดต่อสื่อสารระหว่างกัน การนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ ล้วนแล้วแต่มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและมีความต้องการคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ส่วนประกอบหนึ่งภายในคอมพิวเตอร์ที่มีความสำคัญและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการเหล่านั้น คือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) เนื่องจากเป็นหน่วยความจำ (Memory unit) และทำหน้าที่หลัก คือ เป็นแหล่งเก็บข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งเมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์เริ่มทำงาน หัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ทำหน้าที่อ่านและเขียนข้อมูลลงบนดิสก์แต่ละแผ่นที่ประกอบอยู่ภายในจะทำการอ่านข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ในด้านต่าง ๆ ต่อไป ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังมีส่วนประกอบที่สำคัญอีกมากมายยกตัวอย่างเช่น แผ่นดิสก์ (Disk Platter), หัวอ่านเขียน (Read/Write head), แขนของหัวอ่าน (Head arm) และ วงจรควบคุมการทำงาน (Logic board) เป็นต้น แต่ส่วนประกอบที่ถือเป็นหัวใจสำคัญของการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือ สปินเดิลมอเตอร์ (Spindle motor)

สปินเดิลมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อย่างมาก โดยมีหน้าที่หมุนแผ่น Platter ที่มีข้อมูลอยู่ภายในไปหาหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อทำหน้าที่อ่านข้อมูล หรือเขียนข้อมูลลงบนแผ่นซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกัน การพัฒนาให้สปินเดิลมอเตอร์มีความเร็วในการหมุนมากขึ้นถือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เนื่องจากทำให้ตำแหน่งของข้อมูลที่ต้องการอ่าน หมุนมาพบกับหัวอ่านได้เร็วยิ่งขึ้น ทำให้อ่านข้อมูลได้เร็วยิ่งขึ้น แต่ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้กลับมีผลเสีย อันได้แก่ การสั่นสะเทือนที่สูงขึ้น และเสียงรบกวนที่มากขึ้นตามมา ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้เกิดการอ่านเขียนข้อมูลที่ผิดพลาดและก่อให้เกิดความรำคาญต่อผู้ใช้ตามลำดับ

จากการศึกษาของงานวิจัยหลายท่านพบว่าเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีสาเหตุหลักมาจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ และสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดของเสียงรบกวนภายในสปินเดิลมอเตอร์ได้เป็น 3 แหล่ง คือ การกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic excitations), การกระตุ้นทางกล (Mechanical excitations) และแหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic source) [1] โดยแหล่งกำเนิดทั้งสามจะทำ

ให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นภายในสปีนเดิลมอเตอร์และแพร่กระจายผ่านส่วนประกอบที่อยู่ติดกันสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำให้เกิดเสียงรบกวนขึ้น งานวิจัยบางส่วนพบว่าเสียงรบกวนที่วัดได้ทันทีที่หยุดจ่ายแรงดันเข้าสู่สปีนเดิลมอเตอร์มีค่าลดลงจากเสียงรบกวนที่วัดได้ในขณะที่สปีนเดิลมอเตอร์ทำงานปกติอย่างมาก เนื่องจากการหยุดจ่ายแรงดันให้สปีนเดิลมอเตอร์เป็นการตัดการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าออก แสดงให้เห็นว่าเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีสาเหตุหลักมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าภายในสปีนเดิลมอเตอร์ [2]

สปีนเดิลมอเตอร์จะเริ่มทำงานเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเข้าสู่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างโรเตอร์ (Rotor) และวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (Stator coil) จะผลักให้โรเตอร์หมุน โดยถ้าแรงดันที่จ่ายเข้าสู่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั้งสามเฟสมีค่าไม่สมดุล โรเตอร์จะเกิดการหมุนอย่างไม่สมดุลและเกิดการเสียดสีของส่วนประกอบทั้งสอง ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแพร่กระจายจากจุดกำเนิด คือ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปีนเดิลมอเตอร์และตัวเรือนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ผ่านผิวสัมผัส และส่งผ่านสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กลายเป็นเสียงดังรบกวนในที่สุด ฉะนั้นการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจึงมีความสำคัญ เพราะนอกจากจะช่วยทำให้เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นลดลงแล้วยังเป็นการเพิ่มความปลอดภัยต่อข้อมูลที่เก็บอยู่ภายในและเพิ่มอายุการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อีกด้วย

จากปัญหาที่เกิดขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (Stator coil) และฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ (Base) ซึ่งประกบติดกันแบบแน่น (Interference fit) ภายในสปีนเดิลมอเตอร์ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่มีผลต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากภายในสู่ภายนอก โดยจะใช้แบบจำลองของสปีนเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit ต่างกัน ๆ ในการทดสอบ และใช้หลักการ Statistical energy analysis หรือ SEA ในการวิเคราะห์ผลการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในรูปของพลังงาน ผลที่ได้จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองที่มีค่า Interference fit แตกต่างกันได้ และสามารถนำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ถูกต้องแม่นยำระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองต่าง ๆ กัน

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษากลไกการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (Stator coil) และฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ (Base) ซึ่งประกบติดกันแบบแน่น

(Interference fit) ในช่วงความถี่ที่หูของมนุษย์สามารถได้ยิน คือ 20 Hz – 20 kHz โดยใช้แบบจำลองของสปีนเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit ต่างกัน ๆ ในการทดสอบ และใช้หลักการ Statistical energy analysis หรือ SEA ในการวิเคราะห์ผลการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง

2. ศึกษาความสัมพันธ์ของค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบของสปีนเดิลมอเตอร์ทั้งสองชิ้น
3. นำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองต่าง ๆ กัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทดสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้ค้อนเคาะ (Impact hammer) และเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration exciter) ในการกระตุ้นแบบจำลองของสปีนเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปีนเดิลมอเตอร์แตกต่างกัน และนำผลตอบสนองเชิงความถี่ที่บันทึกได้จากแบบจำลองแต่ละชุดมาใช้ในการวิเคราะห์การส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ในช่วงความถี่ที่หูของมนุษย์สามารถได้ยิน คือ 20 Hz – 20 kHz ด้วยหลักการ Statistical energy analysis เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองชิ้น และนำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองต่าง ๆ กัน

1.4 วิธีดำเนินการวิจัยโดยย่อ

1. ศึกษาโครงสร้างของสปีนเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาจากรายงานวิจัย วารสาร และหนังสือที่เกี่ยวข้อง

2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และประยุกต์นำมาช่วยในการวิเคราะห์การส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์
3. ออกแบบและสร้างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit แตกต่างกันทั้งหมด 5 ชุด เพื่อใช้ในการทดสอบหาผลของค่า Interference fit ต่าง ๆ กันต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์
4. ทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วย Impact hammer กับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ผลที่บันทึกได้จะอยู่ในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งทำให้ทราบถึงโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองแต่ละชิ้น
5. ออกแบบและสร้างแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน (Stinger) เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากเครื่อง Vibration exciter สูแบบจำลอง ณ บริเวณที่ต้องการกระตุ้น
6. นำ Stinger ที่สร้างขึ้น มาใช้ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่อง Vibration exciter กับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชิ้นที่ 1 และนำผลการทดสอบที่บันทึกได้ในรูปผลตอบสนองเชิงความถี่มาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่บันทึกได้จากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วย Impact hammer เพื่อเลือก Stinger ที่แสดงให้เห็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชิ้นที่ 1 เด่นชัดที่สุดมาใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป
7. ทดสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้ Impact hammer และเครื่อง Vibration exciter ในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละชิ้น และนำข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบมาคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง (Intrinsic loss factor) ของแบบจำลองแต่ละชิ้นตามหลักการ Statistical energy analysis
8. ประกอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์เข้าด้วยกัน โดยแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละชุดจะมีค่า

Interference fit แตกต่างกัน จากนั้นจึงใช้ Impact hammer และเครื่อง Vibration exciter กระตุ้นแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ โดยแบ่งเป็น กระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่บันทึกได้มาใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย (Coupling loss factor) ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละชุดตามหลักการของ Statistical energy analysis

9. นำค่า Intrinsic loss factor ของแบบจำลองแต่ละชิ้นและค่า Coupling loss factor ของแบบจำลองแต่ละชุดที่มีค่า Interference fit แตกต่างกัน มาใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ เพื่อใช้ในการศึกษาหาผลของค่า Interference fit ต่าง ๆ กันต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองตามหลักการของ Statistical energy analysis
10. ทดสอบการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยหลักการ Statistical energy analysis โดยใช้ Impact hammer และเครื่อง Vibration exciter ในการกระตุ้น เพื่อศึกษาความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการนำหลักการ Statistical energy analysis มาใช้ในการวิเคราะห์ผลในปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือน
11. วิเคราะห์ผล สรุปผล และจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์เพื่อใช้ในการเผยแพร่ต่อไป

1.5 แผนการดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีระยะเวลาในการดำเนินการทั้งสิ้น 30 เดือน เริ่มต้นในเดือนพฤศจิกายน 2553 โดยแผนการดำเนินการและระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการและระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัย	เดือน								
	1-3	4-6	7-9	10-15	16-19	20-23	24-27	28	29-30
1. ศึกษาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง									
2. ออกแบบและสร้างแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit แตกต่างกัน									
3. ทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วย Impact hammer กับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์									
4. ออกแบบและสร้าง Stinger และนำมาใช้ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่อง Vibration exciter กับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ชั้นที่ 1 เพื่อเลือก Stinger ที่เหมาะสมที่สุด									
5. ทดสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้ Impact hammer และเครื่อง Vibration exciter ในการกระตุ้นแบบจำลองแต่ละชั้น และนำค่าที่บันทึกได้ไปคำนวณหาค่า Intrinsic loss factor ของแบบจำลองแต่ละชั้น									
6. ประกอบแบบจำลองทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน และนำไปใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้ Impact hammer และเครื่อง Vibration exciter ในการกระตุ้น และนำค่าที่บันทึกได้ไปคำนวณหาค่า Coupling loss factor ของแบบจำลองแต่ละชุด									

ตารางที่ 1.1 แผนการและระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัย	เดือน								
	1-3	4-6	7-9	10-15	16-19	20-23	24-27	28	29-30
7. คำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการ สั้นสะท้อนระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง เพื่อศึกษาผลของค่า Interference fit ต่าง ๆ กันต่อการส่งผ่านการสั้นสะท้อน จากแบบจำลองของวงแหวนขดลวด เหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์									
8. ทดสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือ ของหลักการ Statistical energy analysis									
9. วิเคราะห์ผล สรุปผล และจัดทำรายงาน วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การวิจัยครั้งนี้จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการส่งผ่านพลังงานการสั้นสะท้อนจากจุดกำเนิด คือ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยใช้ทฤษฎี Statistical energy analysis หรือ SEA เข้าช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ และเข้าใจความสัมพันธ์ของค่า Interference fit ต่าง ๆ กันต่อการส่งผ่านการสั้นสะท้อนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสปินเดิลมอเตอร์ นอกจากนี้ยังสามารถนำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำของการส่งผ่านการสั้นสะท้อนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองต่าง ๆ กัน

1.7 ลำดับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท โดยบทแรกจะเป็นบทนำซึ่งกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของงานวิจัย วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ และแผนการดำเนินงานวิจัย บทที่สองจะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะช่วยให้เข้าใจที่มาของปัญหา, ความสำคัญของ

ปัญหา และแนวทางในการดำเนินงานวิจัยในลำดับถัดไป บทที่สามจะนำเสนอหลักการ Statistical energy analysis ที่จะนำมาใช้ช่วยในการวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือน บทที่สี่จะนำเสนอขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยละเอียด บทที่ห้าจะแสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ และบทสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลของงานวิจัยฉบับนี้ โดยเนื้อหาของแต่ละบทจะนำเสนอโดยละเอียดต่อไป

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นขั้นตอนแรกในการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้เข้าใจถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาในเบื้องต้น พร้อมทั้งสามารถกำหนดแนวทางในการแก้ปัญหาได้จากการศึกษางานวิจัยเหล่านั้น โดยในบทนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 จะเป็นบทนำที่จะกล่าวถึงสาเหตุของการเกิดเสียงรบกวนจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยย่อว่าเกิดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์เป็นหลัก จึงนำไปสู่ส่วนที่ 2 ซึ่งศึกษาโครงสร้างของสปินเดิลมอเตอร์และการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ที่เป็นสาเหตุหลักประการหนึ่งของเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ส่วนที่ 3 จะกล่าวถึงเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ว่าเกิดจากแหล่งกำเนิดชนิดใด ส่วนที่ 4 จะกล่าวถึงกลไกสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายของเสียงรบกวนจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์และแนวทางในการลดการแพร่กระจายของเสียงรบกวน ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์สามารถช่วยลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองซึ่งถือว่าเป็นแนวทางหนึ่งในการลดการแพร่กระจายของเสียงรบกวนได้ ในส่วนที่ 5 จึงได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานผิวสัมผัสระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำกับฐานของสปินเดิลมอเตอร์กับการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองซึ่งจะช่วยทำให้เข้าใจกลไกในการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนเนื่องจากการปรับเปลี่ยนค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองได้มากยิ่งขึ้น และส่วนที่ 6 จะกล่าวสรุปถึงการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งหัวข้อต่าง ๆ จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

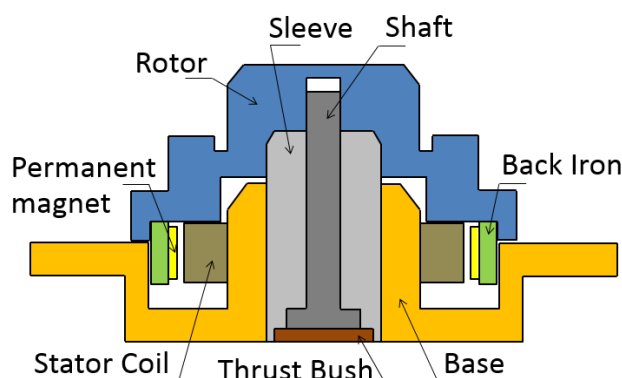
2.1 เสียงรบกวนจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ บ่อยครั้งที่เกิดเสียงรบกวนขึ้นซึ่งก่อให้เกิดความรำคาญต่อผู้ใช้ และอาจจะบ่งบอกถึงความผิดปกติของการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเสียงรบกวนจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเกิดได้จากส่วนประกอบทุกส่วนที่มีการหมุนหรือมีการเคลื่อนที่ภายใน เช่น หัวอ่าน (Actuator Arm) และแผ่นดิสก์ (Disk Platter) เป็นต้น แต่แหล่งกำเนิดเสียงรบกวนหลักที่สำคัญตัวหนึ่ง คือ สปินเดิลมอเตอร์ ที่ทำหน้าที่หมุนแผ่นดิสก์ไปหาหัวอ่านเพื่อทำการอ่านข้อมูล โดยเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ ส่วนประกอบสำคัญที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนที่จะแพร่กระจายไปสู่เสียงรบกวน คือ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและโรเตอร์ เนื่องจากเมื่อมีการจ่ายกระแสเข้าสู่สปินเดิลมอเตอร์ ส่วนประกอบทั้ง

สองจะรับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยตรง และถ้าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีความไม่สมดุล เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายมีความบกพร่อง จะทำให้ส่วนประกอบทั้งสองเกิดการบิดเบี้ยวและเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในที่สุด การสั่นสะเทือนดังกล่าวจะแพร่กระจายจากส่วนประกอบทั้งสองสู่ส่วนอื่นภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ผ่านผิวสัมผัส โดยเฉพาะวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำที่สัมผัสกับฐานของสปินเดิลมอเตอร์ผ่านการกดอัดจะส่งผ่านการสั่นสะเทือนสู่ฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยตรง และกระจายสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กลายเป็นเสียงรบกวนในที่สุด ความเข้าใจดังกล่าวจึงนำไปสู่การศึกษาโครงสร้างภายในของสปินเดิลมอเตอร์ และพฤติกรรมการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ต่อไป

2.2 สปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว

2.2.1 โครงสร้างภายในและส่วนประกอบสำคัญของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของสปินเดิลมอเตอร์ประเภท Fluid Dynamic Bearing สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

สปินเดิลมอเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างยิ่งภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพราะทำหน้าที่หมุนแผ่นดิสก์ที่เก็บข้อมูลทั้งหมดไว้ภายในไปหาหัวอ่านเพื่อทำการอ่านข้อมูลแล้วนำไปประมวลผลต่อไป หรือแม้แต่การเขียนข้อมูลลงบนแผ่นก็มีการทำงานที่เหมือนกัน โดยในรูปที่ 2.1 จะแสดงถึงโครงสร้างภายในและส่วนประกอบที่สำคัญของสปินเดิลมอเตอร์ประเภท Fluid Dynamic Bearing ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ

1. วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (Stator Coil) เป็นส่วนที่ถูกประกอบเข้ากับฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการกดอัด (Press fit) มีลักษณะเป็นวงแหวนซึ่งมีขดลวดทองแดงพันรอบ

ขั้วแต่ละขั้ว โดยเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่สปินเดิลมอเตอร์ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขั้วแต่ละขั้วเพื่อเหนี่ยวนำให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่

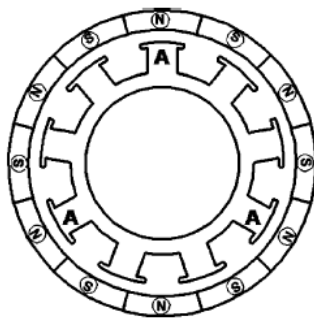
2. ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (Base) เป็นส่วนประกอบที่รองรับส่วนประกอบอื่นของสปินเดิลมอเตอร์ และเป็นส่วนประกอบที่ถูกยึดเข้ากับตัวเรือน (Case) ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยกาว

3. โรเตอร์ (Rotor) ทำหน้าที่รองรับแผ่นดิสก์และหมุนแผ่นดิสก์ไปหาหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และประกอบไปด้วย แกนหมุนแผ่นดิสก์ (Hub), แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) และแผ่นที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กด้านหลังแม่เหล็กถาวร (Back Iron) โดยโรเตอร์จะถูกยึดติดกับเพลา (shaft) และหมุนไปพร้อมกันเมื่อกระแสไฟฟ้าถูกจ่ายเข้าสู่สปินเดิลมอเตอร์

4. Fluid Dynamic Bearing (FDB) เป็นแบร์ริงชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้กับสปินเดิลมอเตอร์ในปัจจุบันแทนที่ Ball Bearing ซึ่งมีข้อได้เปรียบ คือ มีของเหลวที่มีลักษณะคล้ายฟิล์มอยู่ระหว่างชิ้นส่วนแต่ละชิ้น ทำให้ผิวไม่ได้สัมผัสกันโดยตรงซึ่งช่วยลดแรงเสียดทานและการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น และช่วยลดเสียงรบกวนจากการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์โดยการขจัดแรงทางกลที่เกิดจากลูกปืน (Rolling balls) ภายใน Fluid Dynamic Bearing จะประกอบไปด้วย เพลา (shaft), ปลอกแบร์ริง (Sleeve) และ Thrust Bush

2.2.2 หลักการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว

การทำงานของสปินเดิลมอเตอร์จะอาศัยหลักการของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้วจะเป็นประเภท Permanent Magnet Synchronous Motor 3 เฟสแบบสมมาตร ซึ่งแถบแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์จะมีขั้วแม่เหล็กทั้งหมด 12 ขั้ว (Poles) แบ่งเป็นขั้วเหนือ (N) 6 ขั้วและขั้วใต้ (S) 6 ขั้ว และวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะมีช่องระหว่างแท่งพันขดลวดจำนวน 9 ช่อง (Slots) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์และช่องระหว่างแท่งพันขดลวดของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ [3]

สปินเดิลมอเตอร์จะเริ่มทำงานเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ตัวขับ (Driver) โดยตัวขับจะทำหน้าที่จ่ายกระแสเข้าสู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเป็นจังหวะตามการสั่งการของหน่วยควบคุมภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อทำให้สปินเดิลมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่เหมาะสม เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่มอเตอร์ ขดลวดที่พันอยู่กับแท่งพันขดลวดรอบวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นรอบ ๆ ตามกฎมือขวา ทำให้ขดลวดบริเวณนั้นเปรียบได้กับขั้วแม่เหล็กขั้วหนึ่ง ซึ่งขั้วแม่เหล็กนี้จะเปลี่ยนไปตามเฟสของกระแสที่มาจากตัวขับ สนามแม่เหล็กรอบ ๆ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำแม่เหล็กถาวรที่ยึดติดอยู่กับโรเตอร์ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างขั้วของแม่เหล็กถาวรกับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ เนื่องจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกยึดติดเข้ากับฐานของสปินเดิลมอเตอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ โรเตอร์ที่หมุนได้อย่างอิสระจึงถูกแรงแม่เหล็กไฟฟ้าผลักดันให้เกิดการเคลื่อนที่แทน

2.3 แหล่งกำเนิดเสียงรบกวนและสาเหตุสำคัญของการสั่นสะเทือนภายในสปินเดิลมอเตอร์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาและความรู้พื้นฐานทางด้านการสั่นสะเทือนพบว่าเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน, เกิดจากการหมุนของแผ่นดิสก์ หรืออาจเกิดจากการไหลเวียนของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ไหลกระทบส่วนต่าง ๆ เป็นต้น แต่สาเหตุหนึ่งที่สำคัญและเป็นสาเหตุหลัก คือ การทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ และสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ออกได้เป็น 3 แหล่ง คือ แหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic source), การกระตุ้นทางกล (Mechanical excitations) และการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic excitations) [1]

สปินเดิลมอเตอร์ที่นิยมใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันจะมีความเร็วรอบการหมุนตั้งแต่ 5400 rpm, 7200 rpm จนกระทั่งถึง 10000 rpm ซึ่งถือเป็นความเร็วรอบที่สูง เมื่อสปินเดิลมอเตอร์หมุนจะส่งผลทำให้อากาศที่ไหลเวียนอยู่ทั้งภายในและภายนอกสปินเดิลมอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเช่นกัน มวลอากาศที่ไหลเวียนจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของส่วนประกอบต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอกมอเตอร์ และส่งผ่านการสั่นสะเทือนนั้นสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กลายเป็นเสียงรบกวนในที่สุด เรียกแหล่งกำเนิดเสียงดังกล่าวว่า แหล่งกำเนิดเสียงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic source)

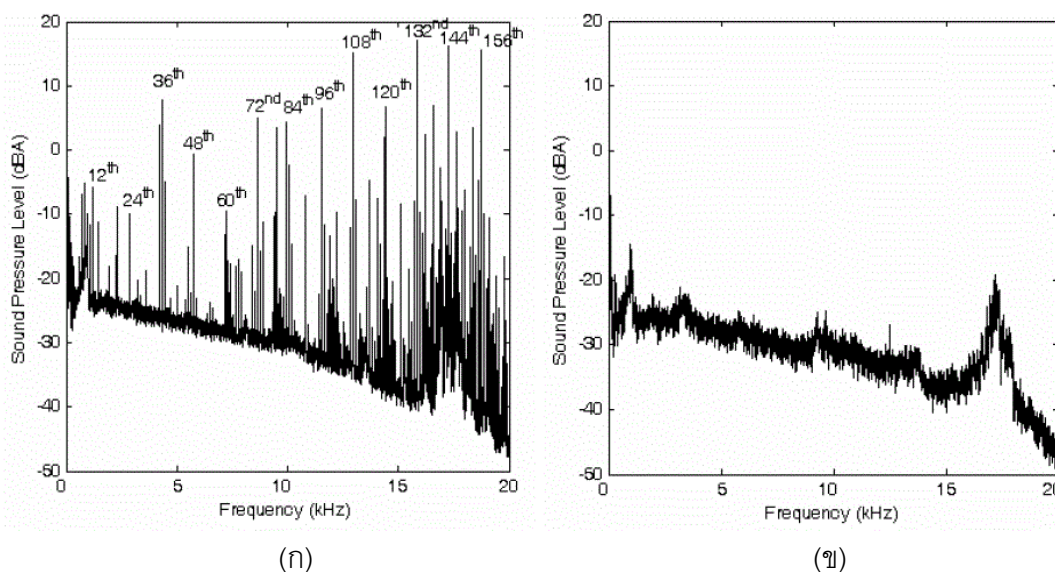
เสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์บางครั้งมีสาเหตุมาจากการสั่นสะเทือนของส่วนประกอบทางกลของสปินเดิลมอเตอร์ อันได้แก่ แบริ่ง หรือ โรเตอร์ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากการผลิตส่วนประกอบที่ไม่ได้คุณภาพจากโรงงาน หรือเกิดความผิดพลาดในการประกอบส่วนประกอบแต่ละส่วนของมอเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์ทำงาน ถ้าการกระจายมวลของโรเตอร์มีความไม่สมดุล จะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงขึ้นรอบจุดหมุน เรียกแรงนี้ว่า Rotating unbalance force และจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นที่บริเวณโรเตอร์ในทิศทางต่าง ๆ และจะแพร่กระจายสู่แบริ่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จนกระทั่งกลายเป็นเสียงรบกวนในที่สุด การสั่นสะเทือนดังกล่าวเป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระตุ้นทางกล (Mechanical excitations)

จากงานวิจัยของ Bi et al. [4] ได้ทำการทดสอบการแพร่ของเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ชนิด Fluid dynamic bearing เปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่ใช้แบริ่งชนิดลูกบอลโลหะ (Ball bearing) หมุนที่ความเร็วรอบ 5400 rpm โดยมีตัวขับแบบ Brushless direct current ช่วยจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับมอเตอร์ในการทดสอบ ผลที่ได้พบว่าสเปกตรัมของเสียงรบกวนที่วัดได้จากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ชนิด Fluid dynamic bearing มีค่าแตกต่างไปจากสเปกตรัมเสียงของมอเตอร์ชนิด Ball bearing อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 0 – 16 kHz และระดับของเสียงรบกวนที่วัดได้จากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ชนิด Fluid dynamic bearing และมอเตอร์ชนิด Ball bearing จะมีค่าเท่ากับ 22.1 dB/20 μ Pa และ 46.5 dB/20 μ Pa ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนชนิดของแบริ่งภายในสปินเดิลมอเตอร์จากแบริ่งชนิด Ball bearing มาใช้แบริ่งประเภท Fluid dynamic bearing แทนที่นั้น มีส่วนช่วยลดเสียงรบกวนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดทางกลภายในสปินเดิลมอเตอร์ลงอย่างมาก นอกจากนี้การใช้ Fluid dynamic bearing ยังมีข้อได้เปรียบ คือ ช่วยลดแรงเสียดทานและความร้อนที่เกิดจากการสัมผัสกันของส่วนประกอบลงเนื่องจากมีช่องเคลือบที่มีลักษณะคล้ายฟิล์มอยู่ระหว่างชิ้นส่วนแต่ละชิ้น

นอกจากนี้งานวิจัยของ Bi et al. [4] ทำให้ทราบเพิ่มเติมว่า การนำสปินเดิลมอเตอร์ประเภท Fluid dynamic bearing มาใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถึงแม้จะลดเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิดทางกลได้ แต่แบริ่งประเภทนี้มีค่าความแข็งแกร่ง (stiffness) ต่ำ จึงทำให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสเข้าสู่สปินเดิลมอเตอร์มีผลกระทบต่อทอร์กของโรเตอร์อย่างมากและอาจจะทำให้เกิดเสียงรบกวนเกิดขึ้นได้ ปัญหาดังกล่าวจึงนำไปสู่การศึกษาค้นคว้าของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ โดยแรงแม่เหล็กที่กระทำ

บนโรเตอร์จะประกอบไปด้วย Unbalanced magnetic pull (UMP), Tangential force และ Axial force การเปลี่ยนแปลงของแรงเหล่านี้จะทำให้โรเตอร์เกิดการหมุนอย่างไม่ราบเรียบ และเกิดการเสียรูปของโรเตอร์และวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดเสียงรบกวนขึ้นในขณะที่มอเตอร์ทำงาน และเรียกเสียงรบกวนนี้ว่า Electromagnetic noise ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic excitations) Bi et al. [4] พบว่า Unbalanced magnetic pull และ Axial force มีสาเหตุมาจากโครงสร้างและการประกอบของมอเตอร์ ซึ่งสามารถลดเสียงรบกวนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้ได้โดยการออกแบบมอเตอร์ให้มีความเหมาะสมและพัฒนาเทคโนโลยีทางการผลิตให้มีคุณภาพที่มากขึ้น

ต่อมา Ajavakom et al. [2] ได้ทำการศึกษาแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนหลักภายในสปินเดิลมอเตอร์ โดยใช้สปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟขนาด 3.5 นิ้วประเภท Fluid dynamic bearing ที่มีขั้วแม่เหล็กทั้งหมด 12 ขั้ว ช่องว่างแห่งพันขดลวดจำนวน 9 ช่อง และความเร็วรอบการหมุน 7200 rpm ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ เริ่มจากการวัดเสียงรบกวนในขณะที่สปินเดิลมอเตอร์ทำงานตามปกติภายในห้องไร้เสียงสะท้อน (Anechoic room) และถูกวางอยู่บนแผ่นฟองน้ำเพื่อทำให้เป็น Free boundary condition สเปคตรัมเสียงที่วัดได้จากขั้นตอนแรกจะเป็นเสียงรบกวนทั้งหมดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดทั้งสามแหล่งดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และขั้นตอนที่สอง คือ ทำการวัดเสียงรบกวนทันทีหลังจากหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับสปินเดิลมอเตอร์ สเปคตรัมเสียงที่วัดได้จากขั้นตอนที่สองจะเป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดเสียงเพียงสองแหล่งเท่านั้น คือ การกระตุ้นทางกลและแหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์ เพราะการหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะเป็นการตัดแหล่งกำเนิดเสียงจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าออกไป สเปคตรัมของเสียงรบกวนที่ได้จากการทดสอบทั้งสองขั้นตอนจะเป็นไปตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของเสียงที่วัดได้จากสปินเดิลมอเตอร์ภายในห้องไร้เสียงสะท้อน [2]

(ก) วัดขณะทำงานปกติ (ข) วัดทันทีที่หยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.3(ก) และ 2.3(ข) เป็นสเปกตรัมเสียงที่เกิดจากสปินเดิลมอเตอร์ที่วัดได้ในช่วงความถี่ 20 Hz – 20 kHz โดยระดับเสียงที่วัดได้ในขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองจะมีค่าเท่ากับ 25 dBA และ 10.3 dBA ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับสปินเดิลมอเตอร์ เสียงรบกวนที่วัดได้จะมีค่าลดลงถึง 14.7 dBA และจะพบว่ายอดหลาย ๆ ยอดของสเปกตรัมเสียงในรูปที่ 2.3(ก) จะไม่ปรากฏในสเปกตรัมเสียงในรูปที่ 2.3(ข) แสดงให้เห็นว่ายอดของสเปกตรัมเสียงเหล่านี้เป็นผลมาจากเสียงรบกวนที่เกิดจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า หรือสามารถสรุปได้ว่าแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนหลักภายในสปินเดิลมอเตอร์ที่มีผลต่อระดับเสียงรบกวนทั้งหมด คือ การกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า และจากการศึกษางานวิจัยฉบับนี้ทำให้ทราบเพิ่มเติมว่า ในขณะที่สปินเดิลมอเตอร์ทำงานปกติ ระดับเสียงรบกวนที่วัดได้ในช่วงความถี่ 10 -20 kHz จะมีค่าเท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์ของระดับเสียงรบกวนทั้งหมด แสดงให้เห็นว่ายอดสเปกตรัมของเสียงส่วนใหญ่จะปรากฏอยู่ในช่วงความถี่ที่สูง หรือตั้งแต่ความถี่ 10 kHz เป็นต้นไป

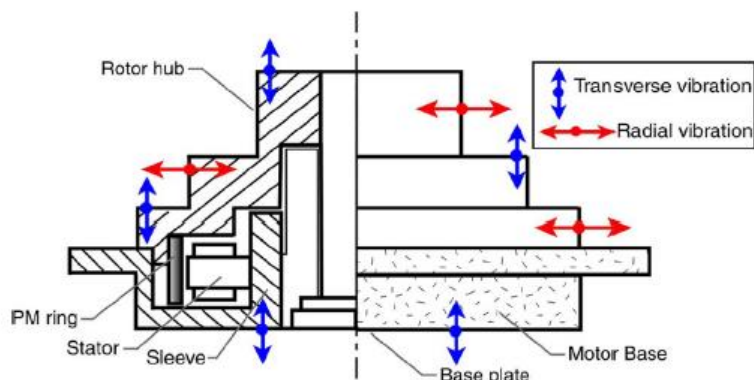
จากการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาข้างต้น ทำให้ทราบว่าแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็นสามแหล่งหลัก ๆ และแหล่งกำเนิดที่มีผลต่อเสียงรบกวนโดยรวมมากที่สุด คือ การกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าภายในสปินเดิลมอเตอร์ โดยจากความเข้าใจดังกล่าวจึงนำไปสู่การศึกษากลไกการเกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าภายในสปินเดิลมอเตอร์ ตลอดจนกลไกการ

แพร่กระจายการสั่นสะเทือนเหล่านั้นไปสู่เสียงรบกวนภายนอกสปีนเดิลมอเตอร์ ซึ่งการศึกษาดังกล่าวจะทำให้สามารถเข้าใจและสามารถกำหนดแนวทางในการลดเกิดเสียงรบกวนได้ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.4 กลไกสำคัญที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของเสียงรบกวนจากการทำงานของสปีนเดิลมอเตอร์ และแนวทางในการลดการแพร่กระจายของเสียงรบกวน

จากงานวิจัยของ Jintanawan et al. [3] ได้สรุปกลไกสำคัญที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายเสียงรบกวนจากการทำงานของสปีนเดิลมอเตอร์ออกเป็น 3 กลไก คือ แหล่งกำเนิดทางแรงแม่เหล็กไฟฟ้า, เส้นทางการส่งผ่านการสั่นสะเทือน และการแพร่กระจายเสียงรบกวนสู่ตัวรับหรือหูของคน และเมื่อมีความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกทั้งสามแล้ว สามารถประยุกต์ความเข้าใจเหล่านั้นมาช่วยในการกำหนดแนวทางในการลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของสปีนเดิลมอเตอร์ได้

สปีนเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันเป็นชนิด permanent magnet synchronous motor (PMSM) ปฏิกริยาระหว่างสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet field) ที่ติดอยู่กับโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสเข้าวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (Armature field) จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำกับโรเตอร์และแท่งพันขดลวดของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำทั้งในแนวรัศมี (Radial) และแนวสัมผัสวงกลม (Tangential) แรงที่เกิดจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ออกเป็นสองชนิด คือ แรงต้านฟลักซ์แม่เหล็ก (Reluctance force) และแรงที่เกิดจากการจ่ายกระแสเข้าวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ หรือแรงอาามาเจอร์ (Armature force) แรงต้านฟลักซ์แม่เหล็กจะส่งผลให้เกิด Unbalance magnetic pull (UMP) ในทิศ radial และเกิด Cogging torque ในแนว tangential การเปลี่ยนแปลงของ UMP และ Cogging torque จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นภายในสปีนเดิลมอเตอร์ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยสาเหตุของการเกิด Reluctance force จะมาจากการออกแบบขั้ว (Pole) และช่อง (Slot) ภายในมอเตอร์มีความไม่เหมาะสม และเกิดจากความบกพร่องในการผลิตและการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ ส่วน Armature force จะเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ไม่สมดุลจาก Conventional drive inverter เข้าสู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ผลที่ได้จะทำให้เกิด UMP ในทิศ radial และเกิด Torque ripple ในแนว tangential ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนภายในสปีนเดิลมอเตอร์เช่นเดียวกับ Reluctance force [3]



รูปที่ 2.4 ทิศทางการสั่นสะเทือนที่บริเวณต่าง ๆ ของสปินเดิลมอเตอร์ [3]

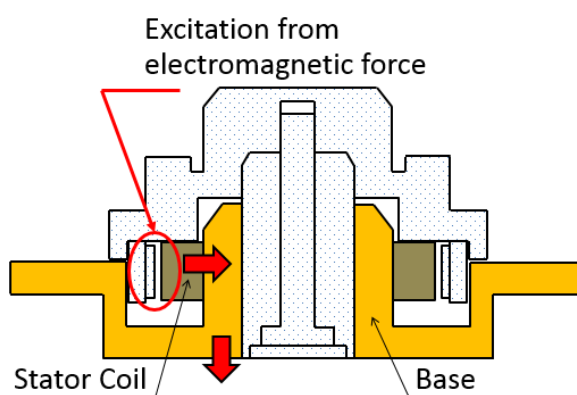
การสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ UMP และ Torque ที่กระทำกับแม่เหล็กถาวรที่ติดอยู่กับโรเตอร์และแท่งฟันขดลวดของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำโดยตรง การสั่นสะเทือนภายในสปินเดิลมอเตอร์จะแพร่กระจายผ่านส่วนประกอบที่อยู่ติดกันสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กลายเป็นเสียงรบกวน จากรูปที่ 2.4 จะแสดงให้เห็นถึงทิศทางการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ ณ บริเวณต่าง ๆ ที่ถูกแพร่กระจายออกมาจากจุดกำเนิด ซึ่งสามารถสรุปเส้นทางการส่งผ่านการสั่นสะเทือนได้เป็น 2 ทาง เส้นทางแรก คือ การสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะแพร่กระจายสู่ฐานของมอเตอร์ผ่านปลอก (Sleeve) ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกและมีการสั่นสะเทือนในทุกทิศทาง คือ ทิศ Radial, Axial และ Tangential โดยการสั่นสะเทือนในแต่ละทิศทางจะมีความสัมพันธ์ต่อการสั่นสะเทือนดังกล่าวเมื่อแพร่กระจายสู่ฐานมอเตอร์จะทำให้ Base plate เกิดการสั่นสะเทือนในทิศ Transverse และแพร่กระจายสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ผ่านตัวเรือน (Case) กลายเป็นเสียงรบกวนต่อไป เส้นทางที่สอง คือ การสั่นสะเทือนจากแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์จะแพร่กระจายสู่ภายนอกมอเตอร์ได้โดยตรงทั้งในทิศ Radial และ Transverse และแพร่กระจายสู่ส่วนประกอบที่อยู่ติดกันสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กลายเป็นเสียงรบกวนในที่สุด [3]

ถึงแม้ว่างานวิจัยของ Jintanawan et al. [3] ไม่ได้กล่าวถึงกลไกการแพร่กระจายของเสียงรบกวนสู่ตัวรับหรือหูของคนเนื่องจากเป็นเรื่องที่ต้องทำการวิจัยต่อไป แต่ได้ระบุถึงแนวทางในการลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ทั้งหมด 3 แนวทาง โดยอิงจากกลไกที่มีผลต่อการแพร่กระจายของเสียงรบกวนดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น แนวทางแรก คือ การกำจัดแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสามารถทำได้โดยการออกแบบขั้วแม่เหล็กและช่องว่างระหว่างแท่งฟันขดลวดเพื่อลด UMP และ Cogging torque

ที่เกิดขึ้น หรือการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตก็สามารถลด UMP และ Cogging torque ได้เช่นเดียวกัน แนวทางที่สอง คือ การลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่จะนำไปสู่การเกิดเสียงรบกวน โดยการออกแบบค่า Interference fit ในการประกอบชิ้นส่วนของมอเตอร์ให้มีความเหมาะสม และแนวทางสุดท้าย คือ การลดการแพร่กระจายเสียงจากสปินเดิลมอเตอร์สู่ตัวรับหรือหูของคนโดยการปรับปรุงรูปร่างหรือขนาดของมอเตอร์

จากการศึกษางานวิจัยของ Jintanawan et al. [3] ทำให้ทราบว่า การลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยการออกแบบค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองให้เหมาะสมเป็นแนวทางหนึ่งในการลดการแพร่กระจายของเสียงรบกวนจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ แต่การจะนำแนวทางดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบค่า Interference fit ที่เหมาะสม จำเป็นต้องเข้าใจกลไกการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองอย่างถ่องแท้ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

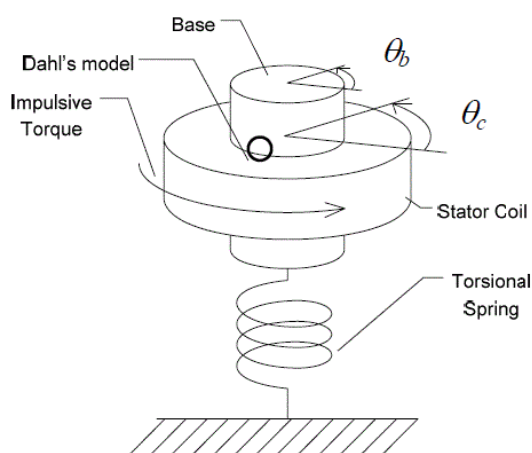
2.5 ความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานผิวสัมผัสระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำกับฐานของสปินเดิลมอเตอร์กับการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง



รูปที่ 2.5 จุดกำเนิดของการสั่นสะเทือนจากกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและทิศทางในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์

การสั่นสะเทือนจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์จะเกิดจากหลายแหล่งกำเนิด หนึ่งในนั้นที่เป็นสาเหตุสำคัญและเป็นแหล่งกำเนิดหลัก คือ การกระตุ้นจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างโรเตอร์และวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ โดยการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากจุดกำเนิด คือ บริเวณแท่งพันขดลวดของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ผ่านผิวสัมผัสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองที่ถูกประกอบเข้าด้วยกันแบบอัดแน่น (Interference fit) ดังรูปที่ 2.5 โดยค่า Interference fit ที่เปลี่ยนไปจะส่งผลต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้ง

สองดิ่งที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา และการออกแบบค่า Interference fit ที่เหมาะสมจะ ช่วยลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากจุดกำเนิดสู่ภายนอกสปินเดิลมอเตอร์และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่ง จะกลายเป็นเสียงรบกวนลงได้ เพราะฉะนั้นการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ของค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์กับการส่งผ่านการสั่นสะเทือน ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองจึงมีความน่าสนใจและมีความสำคัญต่อการลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้น จากการการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์



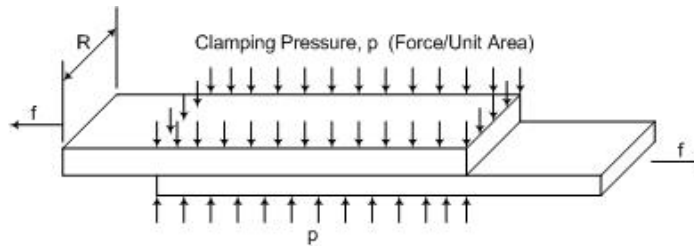
รูปที่ 2.6 แบบจำลองทางพลศาสตร์อย่างง่ายของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์ [5]

จากงานวิจัยของ Jintanawan et al. [5] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการส่งผ่าน การสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยใช้แบบจำลองทาง พลศาสตร์ (Dynamic model) อย่างง่ายในการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 2.6 แบบจำลองดังกล่าวที่ใช้ใน การวิเคราะห์จะเป็นแบบจำลองรวมมวลแบบก้อนที่มีการเคลื่อนที่แบบ 2 องศาอิสระ (Two degree of freedom lumped mass model) ซึ่งประกอบไปด้วยก้อนมวลของวงแหวนขดลวด เหนี่ยวนำซึ่งรองรับแรงบิดแบบอิมพัลส์ (Impulsive torque) และก้อนมวลของฐานของสปินเดิล มอเตอร์ซึ่งถูกยึดอยู่กับพื้นด้วยสปริงแบบรองรับแรงบิด (Torsional spring) ก้อนมวลทั้งสองจะถูก ประกอบเข้าด้วยกันแบบกดอัด (Press fit) ทำให้ผิวของส่วนประกอบทั้งสองสัมผัสกันแบบแน่น (Interference fit) เมื่อแบบจำลองถูกกระตุ้นด้วย Impulsive torque กระทำกับวงแหวนขดลวด เหนี่ยวนำ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะเกิดการเคลื่อนที่เชิงมุมและทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นบริ เวณผิวสัมผัสระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง แรงบิดดังกล่าวจะถูกส่งผ่านสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ผ่านผิวสัมผัสนี้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เชิงมุมสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่เชิงมุมของวงแหวนขดลวด เหนี่ยวนำ การเคลื่อนที่เชิงมุมสัมพันธ์นี้เป็นการเลื่อนไถลแบบจุลภาค (Micro-slip) และสามารถให้

แบบจำลองของ Dahl (Dahl's model) [5] มาใช้ในการอธิบายกลไกแรงเสียดทานและการเคลื่อนที่ดังกล่าวที่ผิวสัมผัสได้

จากการวิเคราะห์หาผลของแรงดันผิวสัมผัสต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของ Jintanawan et al. [5] โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางพลศาสตร์อย่างง่าย นำไปแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab พบว่าเมื่อแรงดันผิวสัมผัสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่ามาก การสั่นสะเทือนในรูปผลตอบสนองเชิงเวลาบริเวณฐานของมอเตอร์จะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงกว่าและเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ได้ช้ากว่าสปินเดิลมอเตอร์ที่มีแรงดันผิวสัมผัสที่น้อยกว่า โดยแรงดันผิวสัมผัสจะมีค่ามากขึ้นอยู่กับค่า Interference fit หรือค่าความแน่นในการประกอบส่วนประกอบทั้งสองของมอเตอร์ โดยถ้าค่า Interference fit มีค่ามาก คือ ส่วนประกอบทั้งสองถูกประกอบเข้าด้วยกันอย่างแน่น แรงดันผิวสัมผัสจะมีค่าสูง ในทางกลับกันถ้าค่า Interference fit มีค่าน้อยจะส่งผลให้แรงดันผิวสัมผัสมีค่าน้อยตาม นอกจากนี้ยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานแบบบิด (Friction Torque) กับระยะขจัดเชิงมุมสัมพัทธ์จะอยู่ในลักษณะของวงแหวนฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ซึ่งพื้นที่ภายในของวงแหวนปิดนี้จะบ่งบอกถึงพลังงานสูญเสียต่อหนึ่งวัฏจักรที่เกิดขึ้นจากความหน่วงจากแรงเสียดทาน (Friction damping) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันผิวสัมผัสมีค่าน้อยหรือค่า Interference fit มีค่าน้อย จะส่งผลทำให้เกิด Micro-slip และระยะขจัดเชิงมุมสัมพัทธ์ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้พลังงานที่สูญเสียจากความหน่วงจากแรงเสียดทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม ผลจากพลังงานสูญเสียที่มากขึ้นดังกล่าวจะทำให้พลังงานการสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านสู่ฐานของมอเตอร์มีค่าลดลง

จากงานวิจัยของ Metherell และ Dilller [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานสูญเสียเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานของชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อนเช่นกัน แต่ใช้แผ่นชิ้นงานที่ทาบต่อกัน (Lap joint) ในการวิเคราะห์ผลแทน ซึ่งจากรูปที่ 2.7 แผ่นชิ้นงานทั้งสองจะถูกกดให้ประกบติดกันด้วยแรงดันกระจายตัวแบบคงที่ (Uniform clamping pressure) และปลายของแผ่นชิ้นงานทั้งสองจะถูกดึงด้วยแรงในแนวแกน (Axial) ซึ่งทำให้เกิดแรงเสียดทานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นชิ้นงานทั้งสอง ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอธิบายการสูญเสียพลังงานเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนได้ต่อไป

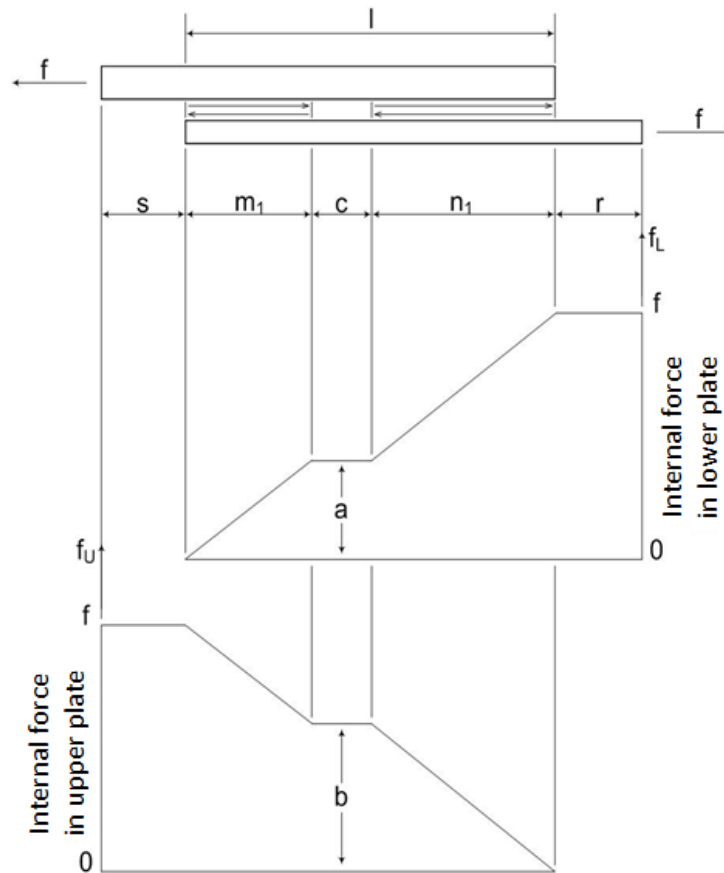


รูปที่ 2.7 แผ่นชิ้นงานสองแผ่นที่ถูกกดให้ประกบติดกันด้วยแรงดันกระจายตัวแบบคงที่ [6]

จากงานวิจัยของ Metherell และ Diller [6] ได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในของแผ่นชิ้นงานและระยะจัดบริเวณผิวสัมผัสของแผ่นชิ้นงานทั้งสองในการอธิบายกลไกแรงเสียดทานและการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความหน่วงจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น โดยกลไกดังกล่าว Metherell และ Diller [6] ได้แบ่งขั้นตอนการเกิดออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. Initial loading phase

จากรูปที่ 2.7 เมื่อแผ่นชิ้นงานทั้งสองแผ่นที่ประกบติดกันด้วยแรงดันกระจายตัวแบบคงที่ (Uniform clamping pressure, p) ถูกดึงที่ปลายแผ่นด้วยแรงภายนอก f ในแนวแกน และมีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ F_1 จะทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นชิ้นงานทั้งสองแผ่น ดังรูปที่ 2.8 โดยบริเวณที่เกิดแรงเสียดทานจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัส m_1 และ n_1 ส่วนช่วงระยะ c จะเป็นช่วงที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัสดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพของแรงภายในของแผ่นชิ้นงานแต่ละตำแหน่งที่เกิดขึ้นในช่วง Initial Loading phase [6]

จากรูปที่ 2.8 จะแสดงแผนภาพของแรงภายในที่เกิดขึ้นในแผ่นชิ้นงานแต่ละแผ่น แบ่งออกเป็นแรงภายในของแผ่นชิ้นงานบน (f_u) และแรงภายในของแผ่นชิ้นงานล่าง (f_l) โดยจากสมการสมดุลของแรงจะทำให้ทราบว่าแรงภายในแต่ละตำแหน่งของแผ่นชิ้นงานทั้งสองแผ่นจะเพิ่มลดเป็นสัดส่วนกันและมีผลรวมเท่ากับแรงภายนอก f ที่ดึงที่ปลายแผ่นชิ้นงาน จากความสัมพันธ์ดังกล่าวและจากโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) จะสามารถหาระยะขจัดของแผ่นชิ้นงานเนื่องจากแรงภายนอกในช่วง Initial loading phase (u_1) ได้จากสมการ (2-1) ดังต่อไปนี้

$$u_1 = U + lF_1KA^{-1} + \frac{1}{2}F_1^2(Aq)^{-1}[(1-K)^{-1} - 3K] \quad (2-1)$$

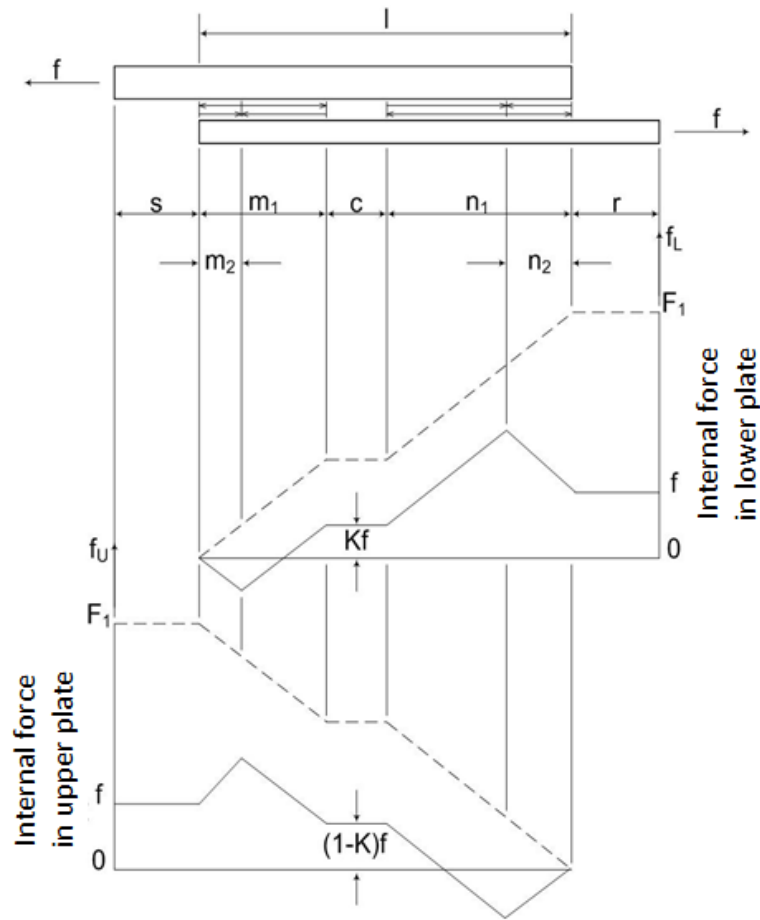
โดย

$$q = R\mu p$$

ช่วงหน้าสัมผัส	U	คือ	ผลรวมของระยะจัดของแผ่นชิ้นงานทั้งสองแผ่นนอก
	A	คือ	ค่าความแข็งแรงของแผ่นชิ้นงานล่าง
รวมของค่าความแข็งแรงของทั้งสองแผ่น	K	คือ	อัตราส่วนค่าความแข็งแรงของแผ่นชิ้นงานล่างต่อผลรวมของค่าความแข็งแรงของทั้งสองแผ่น
	q	คือ	แรงเฉือนต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่ทำให้เกิดการเลื่อน
	l	คือ	ความยาวของหน้าสัมผัสของแผ่นชิ้นงานทั้งสองแผ่น
	R	คือ	ความกว้างของแผ่นชิ้นงาน
	μ	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผิวสัมผัส

2. Unloading phase

ในตอนท้ายของขั้นตอน Loading phase ผิวสัมผัสบริเวณปลายของแผ่นชิ้นงานทั้งสองข้างจะเกิดแรงต้านในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงเสียดทานในขั้นตอนแรก ทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการเลื่อนไถลย้อนกลับ (Counter slip) และแรงภายนอก f ที่กระทำที่ปลายของแผ่นชิ้นงานทั้งสองแผ่นจะมีค่าสูงสุดลดลงจาก F_1 ไปสู่ค่า F_2 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างระยะผิวสัมผัสที่เปลี่ยนไปกับแรงภายในของแผ่นชิ้นงานทั้งสองแผ่นจะเป็นไปดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพแรงภายในของแผ่นชิ้นงานแต่ละตำแหน่งที่เกิดในช่วง Unloading phase [6]

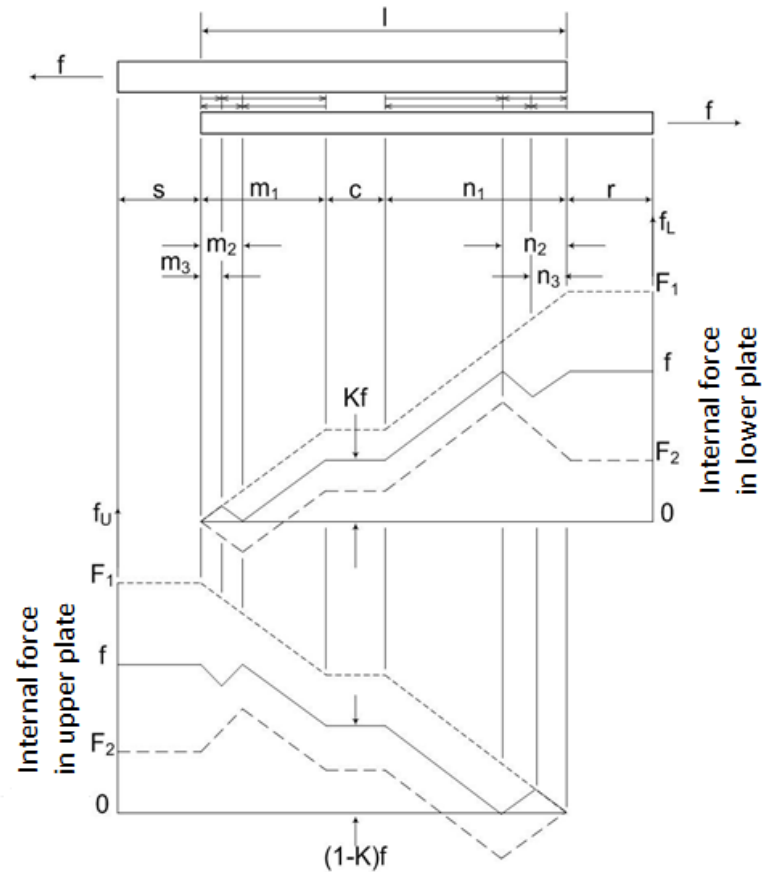
จากความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.9 และจากโมดูลัสความยืดหยุ่นจะสามารถหาระยะขจัดของแผ่นชิ้นงานเนื่องจากแรงภายนอกในช่วง Unloading phase (u_2) ได้จากสมการ (2-2) ดังต่อไปนี้

$$u_2 = U + lF_2KA^{-1} + \frac{1}{4}[(F_1 - F_2)^2 - 2F_1^2][(1 - K)^{-1} - 3K](Aq)^{-1} \quad (2-2)$$

3. Reloading phase

ในตอนท้ายของขั้นตอน Unloading phase ผิวสัมผัสบริเวณปลายของแผ่นชิ้นงานทั้งสองข้างที่เกิดการเลื่อนไถลแบบย้อนกลับจะเกิดแรงเสียดทานในทิศทางตรงกันข้ามเกิดขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการเลื่อนไถลแบบย้อนกลับซ้ำเพิ่มขึ้นบริเวณด้านนอกผิวสัมผัสของแผ่นชิ้นงานทั้งสองด้าน และแรงภายนอก f ที่กระทำที่ปลายของแผ่นชิ้นงานทั้งสองแผ่นจะมีค่าสูงสุด

เพิ่มขึ้นโดยมีค่าระหว่าง F_2 และ F_1 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างระยะผิวสัมผัสที่เปลี่ยนไปกับแรงภายในของแผ่นขึ้นงานทั้งสองแผ่นจะเป็นไปดังรูปที่ 2.10

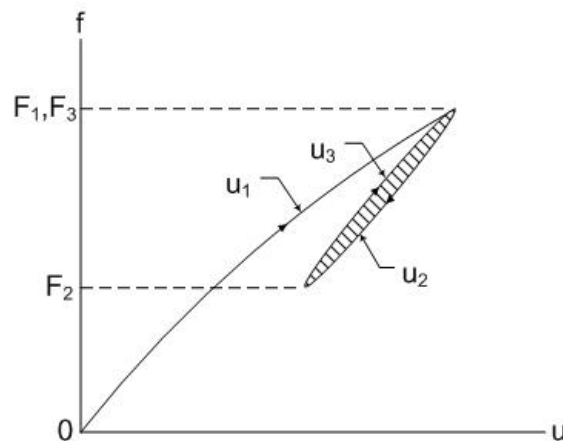


รูปที่ 2.10 แผนภาพแรงภายในของแผ่นขึ้นงานแต่ละตำแหน่งที่เกิดในช่วง Reloading phase [6]

จากความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.10 และจากโมดูลัสความยืดหยุ่นจะสามารถหาระยะขจัดของแผ่นขึ้นงานเนื่องจากแรงภายนอกในช่วง Reloading phase (u_3) ได้จากสมการ (2-3) ดังต่อไปนี้

$$u_3 = U + lF_3KA^{-1} + \frac{1}{4}[(F_3 - F_2)^2 - (F_1 - F_2)^2 + 2F_1^2][(1-K)^{-1} - 3K](Aq)^{-1} \quad (2-3)$$

จากความสัมพันธ์ของระยะขจัดกับแรงภายนอกที่กระทำกับปลายของแผ่นขึ้นงานในแต่ละขั้นตอน เมื่อนำมาวาดเป็นแผนภาพจะได้รับความสัมพันธ์ในลักษณะของวงแหวนปิด เรียกว่า วงแหวนฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งพื้นที่ภายในของวงแหวนปิดนี้จะบ่งบอกถึงปริมาณการสูญเสียพลังงานเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานในหนึ่งวัฏจักร (Energy dissipation per cycle, D) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการ (2-4)



รูปที่ 2.11 แผนภาพความสัมพันธ์ของระยะขจัดกับแรงภายนอกที่กระทำกับปลายของแผ่นชิ้นงาน
แต่ละแผ่นทั้ง 3 ชิ้นตอน [6]

$$D = 2F_{amp}^3 \left[(1-K)^{-1} - 3K \right] (3Aq)^{-1} \quad (2-4)$$

โดย
$$F_{amp} = \frac{1}{2} (F_{max} - F_{min})$$

จากการสมการ (2-4) จะพบว่าปริมาณของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานนี้จะมีค่าแปรผกผันกับขนาดของแรงดัน (Clamping pressure) ที่กดแผ่นชิ้นงานให้ประกบติดกัน ซึ่งปริมาณของพลังงานที่สูญเสียดังกล่าวนี้จะเชื่อมโยงเข้ากับพลังงานการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านระหว่างผิวสัมผัสภายในสปินเดิลมอเตอร์ได้ กล่าวคือ เมื่อแรงดันผิวสัมผัสหรือค่า Interference fit มีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานในหนึ่งวัฏจักรจะมีค่าลดต่ำลง ส่งผลให้พลังงานการส่งผ่านการสั่นสะเทือนสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่เพิ่มมากขึ้นบริเวณฐานของมอเตอร์ตามมา ซึ่งผลดังกล่าวจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jintanawan et al. [5]

2.6 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ทำให้ทราบโดยสรุปว่าเสียงรบกวนในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานนั้นจะเกิดได้จากหลายสาเหตุ แต่สาเหตุประการหนึ่งซึ่งส่งผลต่อเสียงรบกวนโดยรวมและเป็นประเด็นหลักประเด็นหนึ่ง คือ การทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยเสียงรบกวนเนื่องจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์จะเกิดจากแหล่งกำเนิดทั้งหมด 3 แหล่ง [1] คือ แหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์, แหล่งกำเนิดจากการกระตุ้นทางกล และ

แหล่งกำเนิดจากการกระตุ้นทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยงานวิจัยของ Ajavakom et al. [2] จะทำให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดจากการกระตุ้นทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีผลต่อการเกิดเสียงรบกวนมากกว่าแหล่งกำเนิดอีกสองแหล่ง ซึ่งจุดกำเนิดของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้นบริเวณแท่งพันธขดลวดของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ การสั่นสะเทือนดังกล่าวจะถูกส่งผ่านสู่ฐานของสปริงเดilmอเตอร์ผ่านผิวสัมผัสและแพร่กระจายสู่ภายนอก ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟกลายเป็นเสียงรบกวนต่อไป ซึ่งจากการศึกษาของงานวิจัยต่าง ๆ จะพบว่าผลการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างผิวสัมผัสของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปริงเดilmอเตอร์ด้วยการออกแบบค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองให้เหมาะสมเป็นวิธีหนึ่งในการลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของสปริงเดilmอเตอร์ โดยจากงานวิจัยของ Jintanawan et al. [5] และงานวิจัยของ Metherell และ Diller [6] จะช่วยทำให้เข้าใจกลไกของแรงเสียดทานและการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความหน่วงจากแรงเสียดทานได้มากยิ่งขึ้น และมีผลที่สอดคล้องกัน คือ เมื่อแรงดันผิวสัมผัสหรือค่า Interference fit มีค่าเพิ่มสูงขึ้น พลังงานการสูญเสียเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานจะมีค่าลดต่ำลง ส่งผลทำให้พลังงานการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปริงเดilmอเตอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเกิดการสั่นสะเทือนที่บริเวณฐานของสปริงเดilmอเตอร์ที่สูงขึ้นตามมา ผลสรุปดังกล่าวทำให้สามารถเข้าใจแนวโน้มของปริมาณพลังงานการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปริงเดilmอเตอร์เมื่อค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปได้ แต่เนื่องจากสปริงเดilmอเตอร์มีโครงสร้างที่สลับซับซ้อน การพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่จะนำมาใช้ในการศึกษาผลของค่า Interference fit ต่อการส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองและการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนให้ใกล้เคียงความเป็นจริงนั้นเป็นไปได้ยาก จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำหลักการ Statistical energy analysis หรือ SEA ซึ่งเป็นหลักการที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีทางด้านพลังงานมาช่วยในการวิเคราะห์ผลของการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของหลักการดังกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 3

Statistical Energy Analysis

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ผ่านมาจะทำให้ทราบว่าเสียงรบกวนจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นจะเกิดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์เป็นหลัก โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่สปินเดิลมอเตอร์ทั้งสามเฟสมีความไม่สมดุลกัน แรงแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและโรเตอร์ที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุลดังกล่าวจะผลักดันทำให้ส่วนประกอบทั้งสองเกิดการบิดเบี้ยวและเกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น การสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากจุดกำเนิด คือ บริเวณแท่งพันขดลวดของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ผ่านผิวสัมผัสแบบแน่นและส่งผ่านสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กลายเป็นเสียงรบกวนต่อไป โดยจากงานวิจัยของ Jintawan et al. [3], [5] และงานวิจัยของ Metherell และ Diller [6] จะสามารถสรุปได้ว่าการปรับเปลี่ยนค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะส่งผลทำให้สามารถลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองได้ซึ่งถือเป็นแนวทางหนึ่งในการลดการแพร่กระจายของเสียงรบกวน แต่การพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์เพื่อใช้ในการศึกษาผลของค่า Interference fit ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองภายในสปินเดิลมอเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนให้ใกล้เคียงความเป็นจริงนั้นเป็นไปได้ยาก นอกจากนั้นอาจจะส่งผลทำให้สูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิจัยเป็นจำนวนมาก จากปัญหาดังกล่าว หลักการ Statistical energy analysis ซึ่งเป็นหลักการที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีทางด้านพลังงานจึงเข้ามามีบทบาทในการช่วยวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือนภายในงานวิจัยฉบับนี้

ปัญหาการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นประเด็นที่น่าสนใจและมีความสำคัญมาอย่างยาวนาน เพราะนอกจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะทำให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรและอุปกรณ์เหล่านั้นมีอายุการใช้งานที่สั้นลงแล้วยังอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ใกล้เคียงและเกิดเสียงรบกวนต่อผู้ใช้งานตามมา โดยในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนสามารถนำทฤษฎีต่าง ๆ เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ได้ เช่น สมการการเคลื่อนที่ (Equation of motions), Finite element method, Boundary element method เป็นต้น ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนภายในโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและอยู่ในช่วงความถี่ต่ำเพียงเท่านั้น ถ้าอุปกรณ์ที่นำมาวิเคราะห์มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้นและต้องการวิเคราะห์ในช่วงความถี่ที่สูงขึ้น การสร้างสมการการเคลื่อนที่และการกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) ที่ถูกต้อง

อาจเป็นไปได้ยาก นอกจากนั้นยังมีโหมดการสั่นสะเทือนจำนวนมากเข้ามาเกี่ยวข้องในการคำนวณ ทำให้การแก้ปัญหาด้วยทฤษฎีดังกล่าวใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ที่สูงขึ้นตามมา จากปัญหาดังกล่าว Sarradj [7] ได้แนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือนที่ก่อให้เกิดเสียงรบกวน (Vibro-acoustic) โดยใช้พื้นฐานทางด้านพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งมีข้อได้เปรียบแนวทางอื่นอยู่หลายประการ คือ พารามิเตอร์บางตัวเมื่อมีค่าเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและพลังงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น, จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์ปัญหาส่วนใหญ่ คือ ปริมาณทางพลังงาน, การเฉลี่ยปริมาณทางพลังงานสามารถทำได้โดยง่าย และความเข้มของเสียงเป็นปริมาณทางพลังงานอย่างหนึ่ง จากเหตุผลหลายประการดังกล่าวทำให้การนำพื้นฐานทางด้านพลังงานเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้าน Vibro-acoustic มีความสะดวกยิ่งขึ้น แนวทางในการวิเคราะห์โดยใช้พื้นฐานทางด้านพลังงานที่นิยมในปัจจุบันนี้ คือ Statistical Energy Analysis หรือ SEA

3.1 หลักการเบื้องต้นของ Statistical energy analysis

Statistical energy analysis หรือ SEA เป็นแนวทางหนึ่งในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้าน Vibro-acoustic โดยใช้พื้นฐานทางด้านพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งพัฒนาต่อมาจากแนวทางการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านเสียง (Acoustic) ในวิศวกรรมอากาศยานโดย Lyon [8] โดย “Statistical” จะหมายถึง ระบบที่เป็นที่สนใจจะถูกวิเคราะห์ภายใต้หลักการทางสถิติ เนื่องจากตัวแปรต่าง ๆ ในการวิเคราะห์จะเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งมีข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัด คือ ช่วยลดความยุ่งยากเนื่องจากความซับซ้อนของระบบได้ “Energy” จะหมายถึง พลังงานจะเป็นตัวแปรที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เป็นหลัก เนื่องมาจากข้อได้เปรียบบางประการดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และ “Analysis” จะหมายถึง หลักการ SEA จะเป็นแนวทางการวิเคราะห์ปัญหาโดยทั่วไปมากกว่าจะเป็นเทคนิคเฉพาะทาง [7]

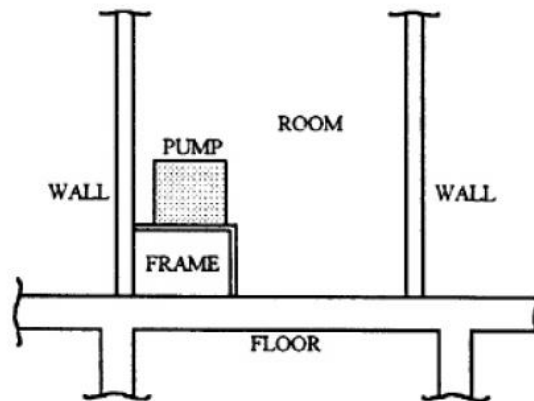
Statistical energy analysis เป็นหลักการที่มีพื้นฐานมาจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือนได้ โดยมีแนวคิด คือ ระบบต่าง ๆ ที่นำมาวิเคราะห์จะสามารถแบ่งออกเป็นระบบย่อยหลาย ๆ ระบบ (Subsystems) ที่เสมือนเป็นอิสระต่อกัน แต่เกิดการสะสมและถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน และอาจจะไม่ได้เป็นอิสระกันจริงทางกายภาพ โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นค่าเฉลี่ยทางสถิติ ซึ่งทำให้สามารถลดความซับซ้อนของระบบที่นำมาวิเคราะห์และลดความยุ่งยากในการคำนวณลงได้ และจากความสัมพันธ์ระหว่างระบบย่อยต่าง ๆ นี้จะสามารถ

นำมาสร้างเป็นระบบสมการทางพลังงานเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางการสั่นสะเทือนได้ โดยจะสามารถสรุปขั้นตอนในการประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis มาใช้ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหา [8] ได้แก่ การสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis, การประมาณค่าพารามิเตอร์ของหลักการ Statistical energy analysis และการนำหลักการ Statistical energy analysis ไปใช้ในการประมาณค่าผลตอบสนองของทางการสั่นสะเทือนต่าง ๆ เช่น ความเร็วและความเร่ง เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.2 การสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis

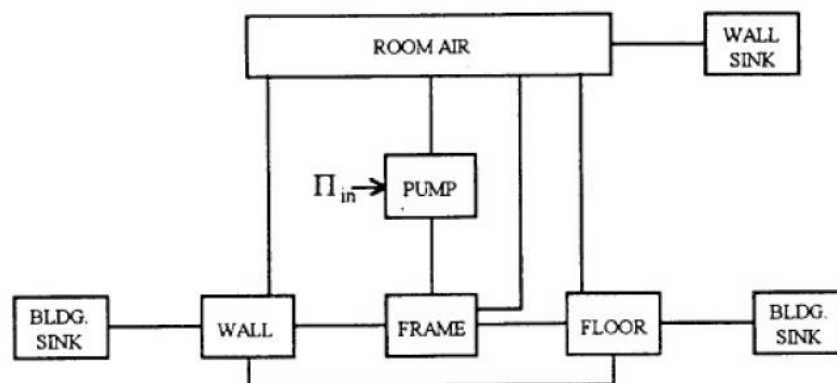
แบบจำลองของ Statistical energy analysis จะเกิดขึ้นจากการนำระบบที่ต้องการจะวิเคราะห์มาแบ่งออกเป็นระบบย่อยหลาย ๆ ระบบที่เชื่อมต่อกัน และระบบย่อยแต่ละระบบจะมีการรับพลังงานจากภายนอก สะสมพลังงาน และแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน โดยจากการศึกษางานวิจัยหลายฉบับได้บ่งชี้ว่าการสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis โดยการแบ่งระบบที่สนใจออกเป็นระบบย่อย ๆ ที่ชัดเจนและมีความถูกต้องจะส่งผลโดยตรงต่อผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้หลักการ Statistical energy analysis เพราะฉะนั้นการศึกษาคความหมายของระบบย่อยให้เข้าใจจึงมีความสำคัญและควรทำความเข้าใจ

จากหลักการของ Statistical energy analysis “ระบบย่อย” (Subsystem) จะมีความหมาย คือ กลุ่มที่มีโหมดการสั่นสะเทือน (Mode shape) และความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ที่เหมือนหรือคล้ายกัน โดยสามารถกำหนดให้เป็นส่วนประกอบหรือชิ้นส่วนใด ๆ ภายในระบบรวมที่สามารถสั่นได้อย่างอิสระจากระบบย่อยอื่น แม้ว่าในความเป็นจริงไม่ได้แยกออกจากระบบ ดังนั้นการสั่นจึงไม่ได้อิสระจริงตามหลักอุดมคติ ส่งผลทำให้ระบบย่อยแต่ละระบบจะเป็นส่วนประกอบที่มีลักษณะจำเพาะต่าง ๆ ที่คล้ายกัน เช่น ค่าความหน่วง และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหลักการ Statistical energy analysis เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ระบบย่อยแต่ละระบบแทนส่วนประกอบทางกายภาพที่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของสิ่งก่อสร้างที่จะนำสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis [8]

จากรูปที่ 3.1 จะแสดงระบบของสิ่งก่อสร้างซึ่งประกอบไปด้วย บั้ม, โครงสร้างที่รองรับบั้ม, ผนังห้อง, พื้น และอากาศภายในห้อง โดยเมื่อบั้มเริ่มทำงาน การสั่นสะเทือนจากบั้มจะส่งผ่านสู่ส่วนประกอบที่อยู่ติดกัน คือ อากาศภายในห้องและโครงสร้างที่รองรับบั้ม และส่วนประกอบทั้งสองจะส่งผ่านการสั่นสะเทือนสู่ผนังห้องและพื้นต่อไป และจะสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis ได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าการสั่นสะเทือนถูกส่งผ่านสู่ผนังห้องและพื้นแล้วจะถูกส่งต่อไปให้ส่วนอื่น ๆ ที่ไม่เป็นที่สนใจของระบบนี้ เช่น ส่วนอื่นของสิ่งก่อสร้าง หรือแม้แต่พื้นโลก เป็นต้น ซึ่งจากรูปที่ 3.2 สิ่งต่างๆ เหล่านี้จะถูกแทนที่ด้วย อ่างเก็บของกำแพง (Wall sink) และ อ่างเก็บของสิ่งก่อสร้าง (Building sink) ซึ่งเป็นการรวมส่วนประกอบที่ไม่เป็นที่สนใจของระบบนี้เป็นระบบย่อยเดี่ยวเพื่อทำให้สามารถเข้าใจได้โดยง่ายนั่นเอง



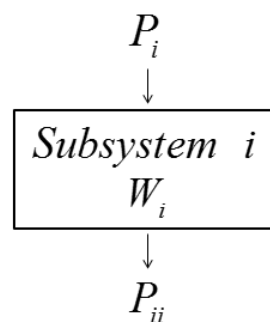
รูปที่ 3.2 แบบจำลองอย่างง่ายของ Statistical energy analysis ของระบบของสิ่งก่อสร้าง [8]

3.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหลักการ Statistical energy analysis

หลังจากสามารถสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis ซึ่งประกอบด้วยระบบย่อยหลาย ๆ ระบบซึ่งมีการรับพลังงานที่กระตุ้นจากภายนอก สะสมและถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบย่อยด้วยกันแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างระบบสมการทางพลังงานที่จะนำไปใช้ในการประมาณค่าผลตอบสนองทางการสั่นสะเทือนต่อไป โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญของหลักการ Statistical energy analysis ได้แก่ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อย, สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย และกำลังที่กระตุ้นจากภายนอก โดยจะมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.3.1 สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อย (Damping loss factor หรือ Intrinsic loss factor)

สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อย คือ สัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานการสั่นสะเทือนที่จะสูญเสียไปเนื่องจากการหน่วงของระบบย่อยนั้น ๆ เช่น ความหน่วงเนื่องจากวัสดุ (Material damping) และความหน่วงเนื่องจากโครงสร้าง (Structural damping) เป็นต้น โดยค่าสัมประสิทธิ์นี้จะมีค่าคงที่สำหรับวัตถุที่ผลิตจากวัสดุเดียวกันและมีรูปทรงเหมือนกัน



รูปที่ 3.3 การทดสอบเพื่อหาค่า Intrinsic loss factor

จากรูปที่ 3.3 จะแสดงการทดสอบเพื่อหาค่า Intrinsic loss factor โดยเมื่อระบบย่อย i ถูกกระตุ้นด้วยกำลัง P_i จากภายนอก จะทำให้โครงสร้างของระบบย่อยเกิดการสั่นสะเทือน โดยมีค่าพลังงานการสั่นสะเทือนเท่ากับ W_i และจะมีค่ากำลังการสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยเท่ากับ P_{ii} โดยค่ากำลังการสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อย

นี่จะมีความสัมพันธ์กับค่า Intrinsic loss factor และค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของโครงสร้างของระบบย่อยโดยตรง [7] ซึ่งเป็นไปตามสมการ (3-1) ดังนี้

$$P_{ii} = \omega \eta_i W_i \quad (3-1)$$

โดย P_{ii} คือ กำลังการสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อย i (watt)

ω คือ ความถี่ของการสั่นสะเทือน (rad/s)

η_i คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อย i (1/rad)

W_i คือ พลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อย i (Joule)

ถึงแม้ว่าการสั่นสะเทือนของแต่ละจุดบนระบบย่อยจะมีค่าไม่เท่ากัน แต่จากการประยุกต์ใช้หลักการของ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือนซึ่งนำค่าเฉลี่ยทางสถิติเข้ามาช่วยในการคำนวณค่าต่าง ๆ จะทำให้สามารถคำนวณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อย i ได้จากการเฉลี่ยพลังงานการสั่นสะเทือนของแต่ละจุดบนระบบย่อยตามพื้นที่ ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยากและเวลาที่ใช้ในการคำนวณลงได้อย่างมาก โดยค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อย i จะสามารถคำนวณได้จากสมการ (3-2) [9] ดังนี้

$$W_i = m_i \langle v_i^2 \rangle_{sp} \quad (3-2)$$

โดย $\langle v_i^2 \rangle_{sp} = \frac{\left(\sum_{j=1}^n (v_i)_j^2 \cdot A_j \right)}{A_{total}}$

m_i คือ มวลของระบบย่อย i (kg)

$\langle v_i^2 \rangle_{sp}$ คือ ค่าความเร็วการสั่นสะเทือนกำลังสองเฉลี่ยตามพื้นที่ของระบบย่อย i (space-averaged square velocity) ((m/s)²)

$(v_i)_j$ คือ ค่าความเร็วการสั่นสะเทือนบนพื้นผิวใด ๆ ของระบบย่อย i (m/s)

n คือ จำนวนของการแบ่งพื้นที่ผิวของระบบย่อย i ในการวัดค่าการสั่นสะเทือน

A_j คือ พื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใด ๆ (m²)

A_{total} คือ ผลรวมของพื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใด ๆ ทั้งหมดของระบบย่อย i (m^2)

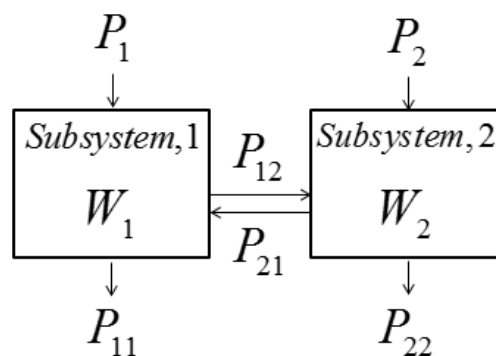
โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจะทำให้ค่ากำลังการสูญเสียเนื่องจากระบบย่อยมีค่าเท่ากับกำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อย ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณเพื่อหาค่า Intrinsic loss factor ได้จากสมการ (3-3) ดังนี้

$$\eta_i = \frac{P_i}{\omega W_i} \quad (3-3)$$

โดย P_i คือ กำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อย i (watt)

3.3.2 สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย (Coupling loss factor)

สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย คือ สัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานที่สูญเสียออกไปจากระบบย่อยหนึ่งสู่ระบบย่อยอื่น ๆ ผ่านการเชื่อมต่อแบบต่าง ๆ ได้แก่ การเชื่อมต่อแบบจุด, การเชื่อมต่อแบบเส้น และการเชื่อมต่อแบบพื้นที่ โดยสามารถยกตัวอย่างให้เห็นได้ชัด เช่น ปลายของคานาจะเชื่อมต่อระหว่างกันโดยการเชื่อมต่อแบบจุด, ขอบของแผ่นเหล็กที่ถูกเชื่อมระหว่างกันจะเป็นการเชื่อมต่อแบบเส้น และสเตเตอร์จะเชื่อมต่อกับส่วนหนึ่งของตัวโรเตอร์ภายในมอเตอร์ไฟฟ้าแบบพื้นที่ เป็นต้น



รูปที่ 3.4 ระบบย่อยสองระบบที่มีการรับพลังงานจากภายนอก สะสมและแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน

จากรูปที่ 3.4 จะแสดงระบบที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งประกอบขึ้นจากระบบย่อยสองระบบที่มีการรับพลังงานจากภายนอก สะสมพลังงานและแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน โดยเมื่อระบบย่อย 1 และ 2 ถูกกระตุ้นด้วยกำลังจากภายนอกมีค่าเท่ากับ P_1 และ P_2 ตามลำดับ ระบบ

ย่อย 1 และ 2 จะเกิดการสั่นสะเทือนโดยมีพลังงานการสั่นสะเทือนเท่ากับ W_1 และ W_2 ตามลำดับ และระบบย่อยแต่ละระบบจะเกิดการสูญเสียกำลังการสั่นสะเทือนเนื่องจากความหน่วงภายใน และสูญเสียกำลังการสั่นสะเทือนเนื่องจากการเชื่อมต่อกับระบบย่อยอื่น ซึ่งจะสามารถนำมาเขียนเป็นสมการตามสมดุลทางด้านพลังงานได้ โดยสมการ (3-4) และ (3-5) จะเป็นสมการสมดุลทางพลังงานสำหรับระบบย่อย 1 และ 2 ตามลำดับ ดังนี้

$$P_{11} + P_{12} - P_{21} = P_1 \quad (3-4)$$

$$P_{22} + P_{21} - P_{12} = P_2 \quad (3-5)$$

โดย P_{12} คือ กำลังการสั่นสะเทือนที่สูญเสียจากระบบย่อย 1 ไปสู่ระบบย่อย 2 (watt)

และ P_{21} คือ กำลังการสั่นสะเทือนที่สูญเสียจากระบบย่อย 2 ไปสู่ระบบย่อย 1 (watt)

โดยกำลังการสั่นสะเทือนที่สูญเสียระหว่างระบบย่อยจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยและพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยนั้น ๆ ดังต่อไปนี้

$$P_{12} = \omega \eta_{12} W_1 \quad (3-6)$$

$$P_{21} = \omega \eta_{21} W_2 \quad (3-7)$$

โดย η_{12} คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียจากระบบย่อย 1 ไปสู่ระบบย่อย 2 (1/rad)

และ η_{21} คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียจากระบบย่อย 2 ไปสู่ระบบย่อย 1 (1/rad)

จากสมการสมดุลทางพลังงานของระบบย่อย 1 และ 2 ตามสมการ (3-4) และ (3-5) เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ด้วยสมการ (3-1), (3-6) และ (3-7) แล้วจะสามารถนำมาเขียนเป็นระบบสมการทางพลังงานได้ตามสมการ (3-8) ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือนด้วยหลักการ Statistical energy analysis ได้ต่อไป

$$\omega \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

จากระบบสมการ (3-8) ผลรวมของสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยและสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจะรวมเรียกว่า สัมประสิทธิ์ความสูญเสียรวม (Total loss factor) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ตามสมการ (3-9) ดังนี้

$$\eta_{ii} = \eta_i + \sum_{j, j \neq i} \eta_{ij} \quad (3-9)$$

ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธี Power Injection Method (PIM) [10] โดยเริ่มจากการแบ่งระบบที่ต้องการจะวิเคราะห์ออกเป็นระบบย่อยจำนวน N ระบบ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบโดยการกระตุ้นระบบย่อย i ที่ละระบบด้วยค้อนเคาะหรือเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน แล้วทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแต่ละระบบย่อยทุกระบบจำนวน N ระบบ เมื่อทำการกระตุ้นระบบย่อยครบทั้ง N ระบบแล้วจะสามารถนำความสัมพันธ์ของกำลังที่ใช้กระตุ้นระบบย่อย i (P_i), พลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อย i (W_i) และค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียต่าง ๆ มาเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ตามสมการ (3-10) ดังนี้

$$\begin{pmatrix} \eta_{11} & -\eta_{21} & -\eta_{31} & \cdots & -\eta_{N1} \\ -\eta_{12} & \eta_{22} & -\eta_{32} & \cdots & -\eta_{N2} \\ -\eta_{13} & -\eta_{23} & \eta_{33} & \cdots & -\eta_{N3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{1N} & -\eta_{2N} & -\eta_{3N} & \cdots & \eta_{NN} \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & P_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & \cdots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & \cdots & W_{2N} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & \cdots & W_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & W_{N3} & \cdots & W_{NN} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3-10)$$

โดย W_{ii} คือ พลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อย i เมื่อระบบย่อย 1 ถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะหรือเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

จากระบบสมการ (3-10) ข้างต้น จะสังเกตได้ว่าเมื่อทราบค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบและพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยต่าง ๆ แล้วจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวกลับค่อนข้างอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังและพลังงานต่าง ๆ ที่วัดค่าได้และอาจส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียต่าง ๆ มีค่าติด

ลบซึ่งไม่มีความหมายทางกายภาพ จากปัญหาดังกล่าว Lalor [10] ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา โดยการแบ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อย (η_i) และสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย (η_{ji}) ออกเป็นเมทริกซ์แยกจากกัน และจะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยและสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยได้ตามสมการ (3-11) และ (3-12) ตามลำดับ ดังนี้

$$\eta_i = \frac{P_i}{\omega} - \left\{ \sum_{j=1}^N (W_{ji}\eta_{ji} - W_{ii}\eta_{ij}) \right\}_{j \neq i} \quad (3-11)$$

$$\eta_{ij} \approx \frac{1}{\omega} \left(\frac{W_{ji}}{W_{ii}} \right) \left(\frac{P_j}{W_{jj}} \right) \quad (3-12)$$

โดยจากสมการ (3-12) จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยได้โดยมีข้อจำกัดสองประการ ประการแรก คือ การเชื่อมต่อระหว่างระบบย่อยต้องเป็นการเชื่อมต่อแบบอ่อน (Weak coupling) เท่านั้น ซึ่งหมายความว่า การส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนระหว่างระบบย่อยสองระบบที่เชื่อมต่อกันโดยตรง (Direct coupled subsystems) จะไม่มีผลจากการสั่นสะเทือนภายในระบบย่อยที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันโดยตรง (Indirect coupled subsystems) หรืออยู่ห่างจากระบบย่อยทั้งสองไกลออกไป ซึ่งการเชื่อมต่อแบบอ่อนจะสามารถสังเกตได้จากสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบจะมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยมาก ($\eta_{ij} \ll \eta_i, \eta_j$) และประการที่สอง คือ สมการ (3-12) จะสามารถใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่เชื่อมต่อกันโดยตรงเท่านั้น (Direct coupling loss factor)

3.3.3 กำลังที่กระตุ้นจากภายนอก (Input power)

ในการประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือน กำลังที่กระตุ้นจากภายนอก (Input power) เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมาก ทั้งนี้เพราะค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละระบบจะส่งผลโดยตรงต่อค่าพารามิเตอร์ของหลักการ Statistical energy analysis ตัวอื่น ๆ ดังจะสังเกตได้จากสมการ (3-1) และ (3-12) นอกจากนั้นค่ากำลังที่กระตุ้นระบบย่อยจากภายนอกจะส่งผลโดยตรงต่อผลตอบแทนต่าง ๆ ทางด้านการสั่นสะเทือนที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลองและระบบสมการทางพลังงานตามหลักการของ Statistical energy analysis โดยจากงานวิจัยหลายฉบับได้บ่งชี้ว่า

ค่าคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าผลตอบสนองต่าง ๆ ด้วยหลักการ Statistical energy analysis มีสาเหตุหลักประการหนึ่งมาจากค่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยจากภายนอก

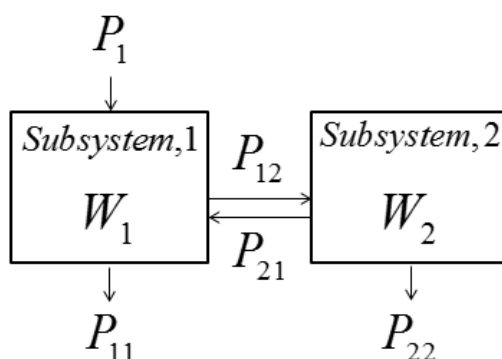
โดยทั่วไปกำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อย (Input power, Π_{in}) จะสามารถหาค่าได้จากสมการ (3-13) [9] ซึ่งแรงที่ใช้ในการกระตุ้น (Input force, F_{in}) จะมาจากค่าที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์แบบวัดแรง (Force transducer) และค่าของความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระตุ้น (Input velocity, v_{in}) จะมาจากการนำทรานสดิวเซอร์แบบวัดความเร่ง (Accelerometer) หรือทรานสดิวเซอร์แบบวัดความเร็วไปติดตั้งบริเวณที่ถูกกระตุ้นมากที่สุด

$$\Pi_{in} = \langle F_{in} \cdot v_{in} \rangle \quad (3-13)$$

โดย	Π_{in}	คือ	กำลังที่ใช้ในการกระตุ้น (watt)
	F_{in}	คือ	แรงที่ใช้ในการกระตุ้น (N)
	v_{in}	คือ	ความเร็วการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระตุ้น (m/s)

3.4 การนำหลักการ Statistical energy analysis ไปใช้ในการประมาณค่าผลตอบสนองทางการสั่นสะเทือนต่าง ๆ

เมื่อสามารถสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ทางพลังงานระหว่างระบบย่อยแต่ละระบบ และสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหลักการ Statistical energy analysis ได้แก่ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบและสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยได้แล้ว จะสามารถประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยแต่ละระบบได้จากระบบสมการสมดุลทางพลังงานเมื่อทราบกำลังที่มากระตุ้นระบบย่อยจากภายนอก



รูปที่ 3.5 ระบบย่อยสองระบบที่จะนำมาใช้ในการประมาณค่าผลตอบสนองทางการสั่นสะเทือน
ด้วยหลักการ Statistical energy analysis

จากรูปที่ 3.5 จะแสดงแบบจำลองของ Statistical energy analysis ที่ประกอบไปด้วยระบบย่อยสองระบบที่มีการกระตุ้นด้วยกำลังจากภายนอกที่ระบบย่อย 1 เพียงระบบเดียว และระบบย่อยทั้งสองระบบมีการสะสมและแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน ซึ่งสมมติว่าได้ทดสอบและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบและสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยเรียบร้อยแล้ว โดยจากระบบในรูปที่ 3.5 จะสามารถนำมาเขียนระบบสมการสมดุลทางพลังงานได้ตามสมการ (3-14) ดังนี้

$$\omega \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

จากระบบสมการ (3-14) จะสังเกตได้ว่าเมื่อกำลังจากภายนอกที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อย 1 หรือค่า P_1 สามารถวัดค่าและคำนวณได้แล้วจะสามารถแก้สมการ (3-14) เพื่อหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อย 1 และระบบย่อย 2 ได้ต่อไป โดยพลังงานการสั่นสะเทือนที่ประมาณค่าได้จะสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาค่าผลตอบสนองทางด้านการสั่นสะเทือน เช่น ความเร็วการสั่นสะเทือนและความเร่งการสั่นสะเทือน เป็นต้น ได้ต่อไป และจะสามารถหาค่ากำลังการสั่นสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากระบบย่อย 1 สู่อะบบย่อย 2 (Total vibration transmission power from subsystem 1 to subsystem 2, $P_{1 \rightarrow 2}$) ได้จากสมการ (3-15) โดยค่ากำลังการสั่นสะเทือนรวมนี้จะมีค่าเป็นไปได้อย่างทั่วถึงทั้งค่าบวกและลบ โดยถ้ามีค่าเป็นบวกจะสามารถสรุปได้ว่ากำลังการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากระบบย่อย 1 สู่อะบบย่อย 2 ได้มากกว่า และถ้าค่ากำลังการสั่นสะเทือนรวมนี้มีค่าเป็นลบจะมีความหมายในทางตรงกันข้าม คือ กำลังการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากระบบย่อย 2 สู่อะบบย่อย 1 ได้มากกว่านั่นเอง ซึ่งจากความเข้าใจดังกล่าวนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวด

เหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้ โดยจะทำให้เข้าใจผลของค่า Interference fit ต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองได้

$$P_{1 \rightarrow 2} = P_{12} - P_{21} \quad (3-15)$$

โดย $P_{1 \rightarrow 2}$ คือ กำลังการสั่นสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากระบบย่อย 1 สู่อะบบย่อย 2 (watt)

3.5 ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของหลักการ Statistical energy analysis

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้สามารถสรุปข้อดีและข้อได้เปรียบของหลักการ Statistical energy analysis [8], [9], [10] ได้ดังนี้

1. การประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์ปัญหาจะช่วยลดขนาดของระบบเนื่องจากค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยตามพื้นที่ (Spatial average) เพราะฉะนั้นจึงเหมาะสมและมีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาขั้นต้นและการออกแบบ
2. การประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์ปัญหาต้องการพารามิเตอร์ของแต่ละระบบย่อยเพียงไม่กี่ตัวเท่านั้นในการสร้างระบบสมการการคำนวณ
3. การประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์ปัญหาสามารถใช้ระบุทิศทางในการส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนภายในระบบที่สนใจได้ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบผลที่ได้ทั้งทางการวิเคราะห์ (Analytical SEA) และทางการทดสอบ (Experimental SEA หรือ Test-based SEA)
4. เมื่อพารามิเตอร์บางตัวมีค่าเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและพลังงานเพียงเล็กน้อย
5. ปริมาณทางพลังงานสามารถเฉลี่ยได้โดยง่าย และจุดมุ่งหมายของงานวิจัยโดยส่วนใหญ่ คือ ปริมาณทางพลังงาน

นอกจากหลักการ Statistical energy analysis จะมีข้อได้เปรียบและข้อดีแล้ว ยังมีข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis เพื่อทำให้ผลการวิเคราะห์เป็นไปอย่างสมเหตุสมผล ดังนี้

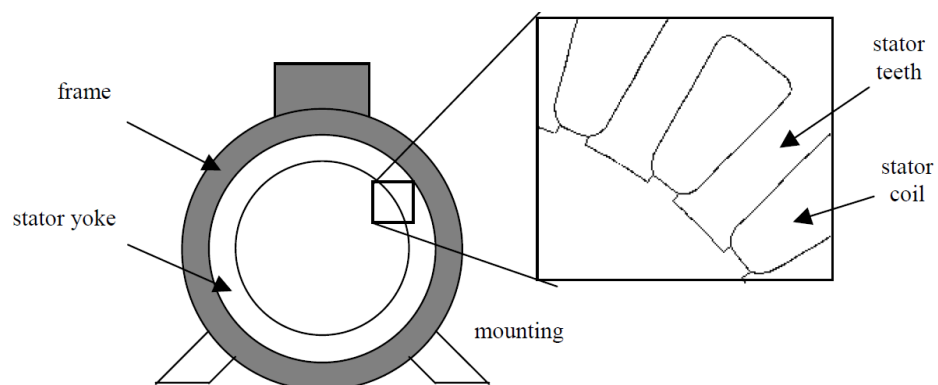
1. การประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบ ต้องมีโหมดการสั่นสะเทือนที่เพียงพอในช่วงความถี่ที่สนใจ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่ควรน้อยกว่า 5 โหมด

[10] เพราะฉะนั้นจึงต้องแน่ใจว่าช่วงความถี่ในการทดสอบสูงเพียงพอ เนื่องจากโหมดการสั่นสะเทือนจะพบมากในช่วงความถี่สูง

2. โหมดการสั่นสะเทือนแต่ละโหมดภายในระบบย่อยแต่ละระบบต้องไม่สัมพันธ์กันและมีพลังงานเท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งสามารถเป็นไปได้ถ้าการเชื่อมต่อระหว่างระบบย่อยเป็นไปอย่างอ่อน และในการทดสอบทำการกระตุ้นโหมดการสั่นสะเทือนในแต่ละระบบย่อยด้วยพลังงานที่เท่าๆกัน

3.6 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงรบกวนภายในมอเตอร์ไฟฟ้า

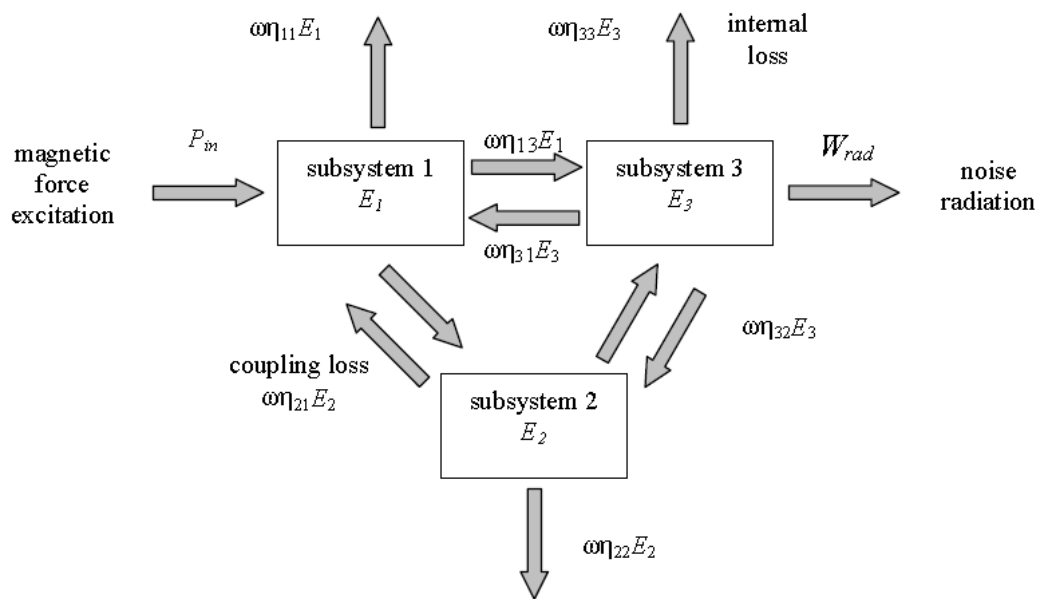
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Delaere et al. [11] ได้นำหลักการ Statistical energy analysis มาใช้ในการวิเคราะห์การส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงรบกวนภายในมอเตอร์ไฟฟ้ามาตรฐานขนาด 5.2 กิโลวัตต์ การสั่นสะเทือนดังกล่าวจะเกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างอากาศ (Air gap field) กระทำกับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำภายในส่งผ่านสู่ตัวเรือนของมอเตอร์ (Motor frame) และแพร่กระจายสู่ภายนอกกลายเป็นเสียงรบกวน ส่วนประกอบหลักที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจะแสดงในรูปที่ 3.6 โดย Delaere et al. [11] ได้แบ่งการวิจัยออกเป็นสองส่วน คือ ทดสอบการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ซึ่งมีขดลวดเหนี่ยวนำและไม่มีขดลวดเหนี่ยวนำพันอยู่ ผลการทดสอบที่บันทึกได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลด้วยหลักการ Statistical energy analysis เพื่อศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบภายใน และศึกษาผลของขดลวดเหนี่ยวนำต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นภายใน



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบหลักของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องในการส่งผ่านการสั่นสะเทือน [11]

การประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์ผลจะเริ่มจากการแบ่งระบบที่สนใจออกเป็นระบบย่อยที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน โดย Delaere et al. [11] ได้แบ่งระบบของมอเตอร์ไฟฟ้าออกเป็น 3 ระบบย่อย คือ โครงของสเตเตอร์ (Stator yoke), ขดลวดเหนี่ยวนำ (Coil) และตัวเรือนของมอเตอร์ (Motor frame) มีการแลกเปลี่ยนและการสูญเสียพลังงานการสั่นสะเทือนตามรูปที่ 3.7 โดยระบบย่อยที่ 1 จะแทนโครงของสเตเตอร์ ระบบย่อยที่ 2 จะแทนขดลวดเหนี่ยวนำ และระบบย่อยที่ 3 จะแทนตัวเรือนของมอเตอร์ เมื่อแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (P_{in}) กระทำกับโครงของสเตเตอร์จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น พลังงานการสั่นสะเทือนดังกล่าวจะถูกส่งผ่านสู่ตัวเรือนของมอเตอร์ผ่านรอยเชื่อมต่อและแพร่กระจายสู่ภายนอกกลายเป็นเสียงรบกวน (W_{rad}) โดยผลการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากโครงของสเตเตอร์สู่ตัวเรือนของมอเตอร์จะสามารถหาค่าได้จากสมการ (3-16) ดังนี้

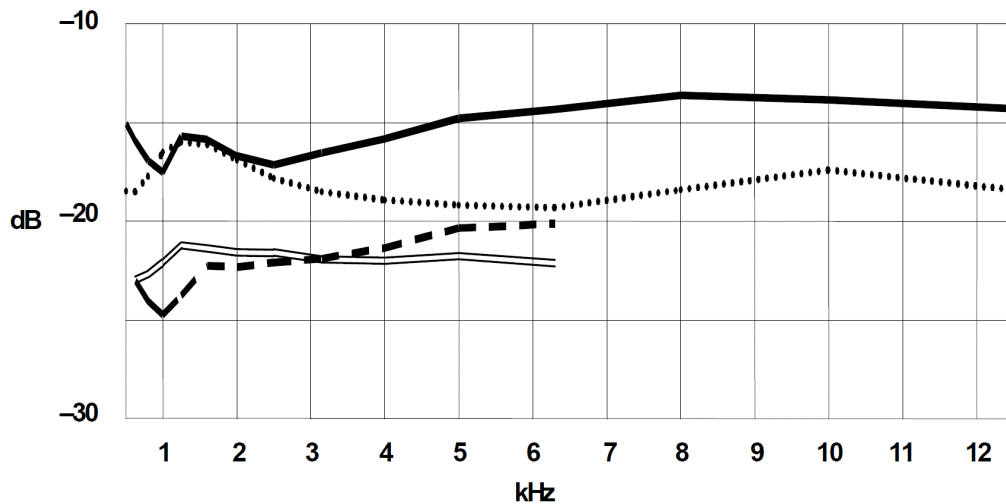
$$P_{1 \rightarrow 3} = \omega(\eta_{13}E_1 - \eta_{31}E_3) \quad (3-16)$$



รูปที่ 3.7 แผนผังที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือนภายในมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยหลักการ Statistical energy analysis [11]

ในการทดสอบจะเริ่มจากการกระตุ้นส่วนประกอบของมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะหรือเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ระบบและวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแต่ละระบบย่อยทุกระบบ ซึ่งเรียกวิธีการทดสอบแบบนี้ว่า Power Injection Method หรือ PIM แต่เนื่องจากการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งพันอยู่กับช่องของสเตเตอร์ (Stator slot) เป็นไปอย่างยากลำบาก ในการ

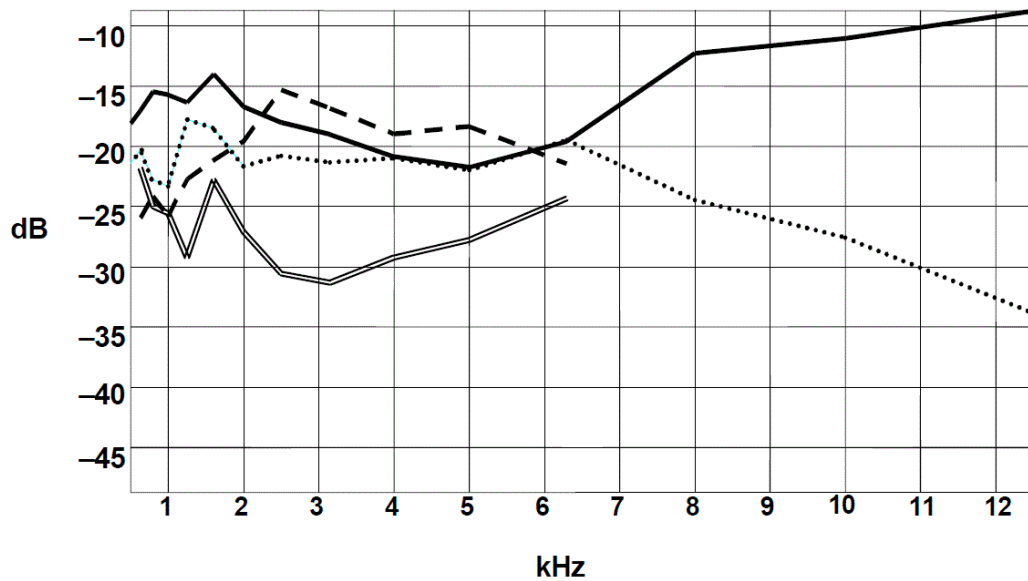
ทดสอบ Delaere et al. [11] จึงพิจารณาให้ชัดเจนเกี่ยวกับแนวโน้มและโครงของสเตเตอร์เป็นส่วนประกอบเดียวกัน จากนั้นค่าการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียในโครงสร้างของระบบย่อยและค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย ซึ่งผลที่ได้จะเป็นไปตามรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียภายในโครงสร้างของระบบย่อยแต่ละระบบ [11]

- โครงของสเตเตอร์มีขดลวดพันอยู่ (เส้นทึบ)
- ตัวเรือนของมอเตอร์โดยโครงของสเตเตอร์มีขดลวดพันอยู่ (เส้นไข่ปลา)
- โครงของสเตเตอร์ไม่มีขดลวดพัน (เส้นประ)
- ตัวเรือนของมอเตอร์โดยโครงของสเตเตอร์ไม่มีขดลวดพัน (เส้นคู่)

จากรูปที่ 3.8 จะแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียภายในของตัวเรือนของมอเตอร์มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความถี่การสั่นสะเทือนมีค่าเปลี่ยนไป ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียภายในโครงของสเตเตอร์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น 3 dB ในช่วงความถี่ 3 kHz ถึง 8 kHz และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียภายในของส่วนประกอบทั้งสองที่มีขดลวดพันอยู่มาเปรียบเทียบกัน จะสังเกตได้ว่าโครงของสเตเตอร์จะมีค่าการหน่วงการสั่นสะเทือนสูงกว่าตัวเรือนของมอเตอร์ประมาณ 4 dB นอกจากนี้รูปที่ 3.8 ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำโครงของสเตเตอร์มาพันขดลวดจะทำให้ค่าการหน่วงการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 5 dB



รูปที่ 3.9 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย [11]

- จากโครงของสเตเตอร์ที่มีขดลวดพันอยู่คู่ตัวเร็นของมอเตอร์ (เส้นทึบ)
- จากตัวเร็นของมอเตอร์คู่โครงของสเตเตอร์ที่มีขดลวดพันอยู่ (เส้นไขว้ปลา)
- จากโครงของสเตเตอร์ที่ไม่มีขดลวดพันคู่ตัวเร็นของมอเตอร์ (เส้นคู่)
- จากตัวเร็นของมอเตอร์คู่โครงของสเตเตอร์ที่ไม่มีขดลวดพัน (เส้นประ)

จากรูปที่ 3.9 เมื่อพิจารณาการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างโครงของสเตเตอร์ที่มีขดลวดพันอยู่และตัวเร็นของมอเตอร์ในช่วงความถี่ 3 kHz ถึง 6.3 kHz จะสังเกตได้ว่าการส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนระหว่างระบบย่อยทั้งสองทิศทางจะมีค่าเท่ากัน และเมื่อความถี่การสั่นสะเทือนเพิ่มสูงขึ้นจาก 5 kHz จนถึง 12 kHz ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 12 dB ในทิศทางจากโครงของสเตเตอร์คู่ตัวเร็นของมอเตอร์และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่การสั่นสะเทือนเพิ่มสูงขึ้น

แม้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบที่ซับซ้อนและพารามิเตอร์หลายตัวไม่สามารถระบุค่าได้ ส่งผลทำให้การวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงภายในมอเตอร์ในช่วงความถี่สูงมีความยุ่งยากและอาจใช้ทรัพยากรสูง แต่จากตัวอย่างงานวิจัยของ Delaere et al. [11] จะทำให้เห็นว่าการนำหลักการ Statistical energy analysis มาใช้ในการวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะช่วยลดความซับซ้อนของส่วนประกอบของมอเตอร์ได้ด้วยการแบ่งระบบออกเป็นระบบย่อย ๆ ที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกันซึ่งสามารถเข้าใจได้โดยง่าย นอกจากนั้นหลักการ Statistical energy analysis ต้องการพารามิเตอร์เพียงไม่กี่ตัวเท่านั้นในการ

คำนวณและพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ได้จากการทดสอบซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายเช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้นหลักการ Statistical energy analysis จึงมีความน่าสนใจและเป็นทฤษฎีที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวหนาและฐานของสปริงเดลมอเตอร์ในช่วงความถี่ที่หูของคนสามารถได้ยิน คือ 20 Hz ถึง 20 kHz ภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งในขั้นตอนของการประยุกต์จะกล่าวถึงในบทต่อไป

3.7 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนภายในสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ

ในปัจจุบันการนำระบบ Cogeneration หรือ ระบบการนำพลังงานความร้อนไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายรูปแบบได้ถูกนำมาใช้ในอาคารสถานที่ต่าง ๆ เช่น โรงพยาบาล เป็นต้น โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการนำความร้อนไปใช้ ซึ่งเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการ Cogeneration จะถูกติดตั้งอยู่ระหว่างชั้นต่างๆภายในอาคาร การสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องจักรอาจจะก่อให้เกิดความรำคาญต่อผู้ใช้อาคารตามมา เพราะฉะนั้น T.Koizumi et al. [12] จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนภายในอาคารจากแหล่งกำเนิดสู่ชั้นติดกันหรือห้องข้างเคียง โดยมีจุดประสงค์ คือ สร้างแบบจำลอง (Analytical model) และสมการการส่งผ่านกำลัง (Power flow equation) ขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และการทำงานการส่งผ่านการสั่นสะเทือนภายในอาคารที่สนใจ โดยในงานวิจัยจะนำหลักการ Statistical energy analysis มาช่วยในการวิเคราะห์และการแก้สมการต่าง ๆ จากหลักการ Statistical energy analysis แต่ละส่วนของอาคารที่สนใจจะถูกพิจารณาเป็นก้อนมวลที่เกิดการถ่ายเทการสั่นสะเทือนระหว่างกัน และจะต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการแก้สมการการส่งผ่านกำลังการสั่นสะเทือน ซึ่งได้แก่ Modal density, Intrinsic loss factor, Coupling loss factor และ Input power เมื่อทำการประมาณค่าต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว จึงนำไปสู่การสร้างระบบสมการการส่งผ่านกำลังการสั่นสะเทือนได้ต่อไป ซึ่งผลจากการวิจัยทำให้ทราบว่าระบบสมการการส่งผ่านกำลังดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทำนายผลการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่บริเวณต่าง ๆ ภายในอาคารที่มีความซับซ้อนได้ โดยเมื่อสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของหลักการ Statistical energy analysis ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นได้ จะสามารถประมาณค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่บริเวณต่าง ๆ ภายในอาคารได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้งานวิจัยของ M.J. Kim et al. [13] ที่ศึกษาเกี่ยวกับการทำนายและการประมาณค่าการส่งผ่านเสียงรบกวนภายในสิ่งก่อสร้างจำพวกอพาร์ทเมนต์ซึ่งมีโครงสร้างใน

ลักษณะต้านทานแรงทางด้านข้าง (Shear wall structural system) ได้นำหลักการ Statistical energy analysis มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเช่นเดียวกัน โดยเนื่องจากอพาร์ทเมนต์ภายในประเทศเกาหลีมีการก่อสร้างให้พื้นและผนังของทุกชั้นติดกัน มีจุดประสงค์เพื่อให้สิ่งก่อสร้างทนทานต่อลมหรือแม้แต่แผ่นดินไหวก็ตาม แต่ปัญหาที่ตามมาคือเสียงรบกวนจะสามารถส่งผ่านจากจุดกำเนิดไปสู่บริเวณต่าง ๆ ได้ผ่านจุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นหรือภายในชั้นเดียวกัน จากปัญหาดังกล่าว M.J. Kim et al. [13] จึงได้เริ่มต้นงานวิจัยโดยมีจุดประสงค์หลัก คือ ตรวจสอบความเป็นไปได้ของการทำนายการส่งผ่านเสียงรบกวนภายในอพาร์ทเมนต์ซึ่งมีโครงสร้างในลักษณะต้านทานแรงทางด้านข้างด้วยหลักการ Statistical energy analysis โดยการเปรียบเทียบเสียงรบกวนที่ถูกส่งผ่านภายในสิ่งก่อสร้างที่ทำนายด้วยหลักการ Statistical energy analysis กับเสียงรบกวนที่วัดได้จริงจากภายในอาคาร ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวทำให้ทราบว่าหลักการ Statistical energy analysis สามารถใช้ในการทำนายค่าการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนภายในสิ่งก่อสร้างได้อย่างสมบูรณ์

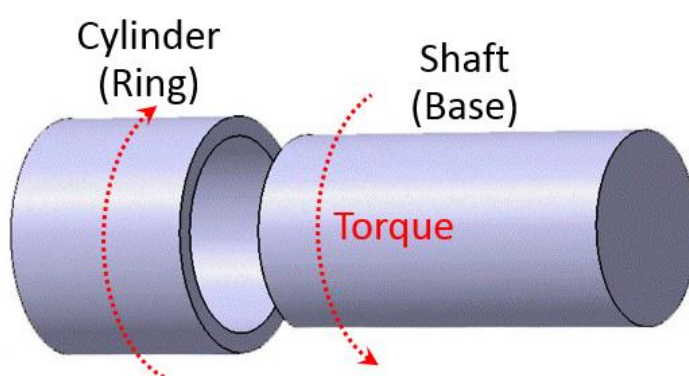
บทที่ 4

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยละเอียด

หลังจากได้ทำการศึกษางานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องมาแล้วในบทที่ 2 และได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับหลักการ Statistical energy analysis ซึ่งเป็นหลักการที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลภายในงานวิจัยฉบับนี้ในบทที่ 3 ในบทนี้จะนำเสนอขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลัก ๆ คือ การวิเคราะห์โดยประยุกต์ทฤษฎีของ Metherell และ Dilller [6] ในหัวข้อที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์มีค่าต่ำลงจะส่งผลทำให้กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากข้อจำกัดบางประการของทฤษฎีของ Metherell และ Dilller [6] กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของ Metherell และ Dilller [6] จึงเป็นเพียงแค่ค่าประมาณเท่านั้น จากปัญหาดังกล่าวจึงนำไปสู่การศึกษาในขั้นตอนที่สอง คือ การวิเคราะห์ผลจากการทำการทดสอบกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ซึ่งมีค่า Interference fit ต่าง ๆ กัน โดยการกระตุ้นด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ได้แก่ ค้อนเคาะ (Impact hammer) และเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration exciter) จะส่งผลทำให้โครงสร้างของชิ้นทดสอบเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้ที่บริเวณต่าง ๆ บนชิ้นทดสอบจะนำไปใช้ในการคำนวณด้วยหลักการ Statistical energy analysis ซึ่งจะทำให้ทราบถึงปริมาณของกำลังการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองแต่ละชุดซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบระหว่างกันได้ ผลที่ได้จะทำให้ทราบถึงผลของค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ต่อปริมาณของกำลังการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง โดยรายละเอียดที่จะนำเสนอในบทนี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อต่างๆ ได้แก่ การประยุกต์ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย, การออกแบบแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ, การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ, การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนด้วยค้อนเคาะ, การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน และการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis ซึ่งรายละเอียดของแต่ละหัวข้อ จะมีดังนี้

4.1 การประยุกต์ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

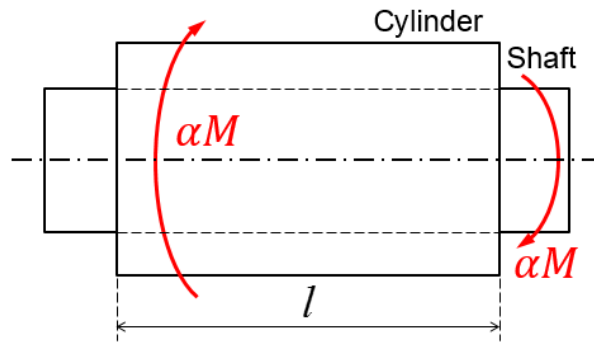
ในขั้นตอนการศึกษารรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นอกจากจะทำให้เข้าใจถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาแล้ว ยังสามารถนำทฤษฎีต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาจนเข้าใจเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับประเด็นที่เป็นที่สนใจของงานวิจัยฉบับนี้ได้ ผลที่ได้จะสามารถทำให้เข้าใจประเด็นต่าง ๆ ได้มากขึ้นและสามารถกำหนดแนวทางในการวิจัยขั้นต่อไปได้ โดยทฤษฎีที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาผลของค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในส่วนนี้ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างกลไกแรงเสียดทานผิวสัมผัสกับการสูญเสียพลังงานการสั่นสะเทือนเนื่องจากความหน่วงจากแรงเสียดทานของ Metherell และ Dilller [6] ซึ่งได้จำลองปรากฏการณ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในลักษณะของแผ่นชิ้นงานทั้งสองที่ประกบติดกันและเคลื่อนที่สัมผัสกันอย่างช้า ๆ โดยจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ โดยเปลี่ยนจากความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นชิ้นงานสองแผ่นเป็นความสัมพันธ์ในรูปแบบของเพลาและทรงกระบอกกลวง (Shaft and Cylinder) ที่ประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งเพลาจะแทนฐานของสปินเดิลมอเตอร์ และทรงกระบอกกลวงจะแทนวงแหวนขดลวดเหนียวน่า ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ในลักษณะของเพลาและทรงกระบอกกลวงซึ่งเคลื่อนที่สัมผัสกัน

จากรูปที่ 4.1 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของเพลาและทรงกระบอกกลวงซึ่งประกอบเข้าด้วยกันแบบแน่น (Interference fit) และเกิดการเคลื่อนที่สัมผัสกันอย่างช้า ๆ และแรงดันผิวสัมผัสจะเกิดจากการกดอัดส่วนประกอบเข้าด้วยกัน ถ้าค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองเพิ่มขึ้นหรือลดลง จะทำให้แรงดันผิวสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตาม ซึ่งการนำงานวิจัยของ Metherell และ Dilller [6] มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาผลของค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวด

เหนียวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ต่อการส่งผ่านการสัมผัสเพื่อระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ การคำนวณหาค่าแรงเสียดทานบิดต่อหน่วยความยาว และขั้นตอนที่สอง คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดภายใน และระยะขจัดเชิงมุม โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนจะแสดงในส่วนของภาคผนวก ก ต่อไป



รูปที่ 4.2 แบบจำลองการสวมอัดระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์
ในสองมิติ

ผลจากการประยุกต์ทฤษฎีของ Metherell และ Diller [6] ในขั้นตอนแรกจะทำให้ทราบว่าเมื่อทรงกระบอกกลวงถูกแรงบิดขนาด αM มากกระทำตามรูปที่ 4.2 จะทำให้ผิวสัมผัสระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพลลาเกิดแรงเสียดทานขึ้น โดยแรงเสียดทานนี้จะมีความสัมพันธ์กับความดันที่เกิดจากการสวมอัดส่วนประกอบทั้งสองแบบเน้นตามสมการ (4-1) ดังนี้

$$m = 2\pi\mu pR^2 \quad (4-1)$$

โดย m คือ แรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาว (Frictional torque per length)(Nm/m)

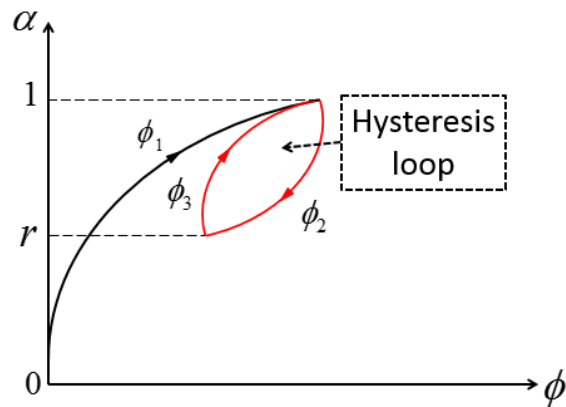
μ คือ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน (Coefficient of friction)

p คือ ความดันที่เกิดจากการสวมอัดระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพลลา (Pa)

R คือ รัศมีของ shaft (m)

และจากการประยุกต์ทฤษฎีของ Metherell และ Diller [6] ในขั้นที่สอง จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดภายใน (αM) และระยะขจัดเชิงมุม (ϕ) ในแต่ละขั้นตอนของกลไกการเกิดแรงเสียดทานผิวสัมผัส ได้แก่ Loading phase (ϕ_1), Unloading phase (ϕ_2)

และ Reloading phase (ϕ_3) ได้ โดยเมื่อนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดเชิงมุมกับค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงปริมาณของแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงไป (α) ในแต่ละขั้นตอนมาวาดในแผนภาพเดียวกัน จะได้แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดเชิงมุมกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดจากภายนอก ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดเชิงมุมกับสัมประสิทธิ์ของแรงบิดที่กระทำภายนอกทรงกระบอกลมวง

จากรูปที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่าเมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดเชิงมุมกับแรงบิดที่กระทำภายนอกทรงกระบอกลมวงตั้งแต่ขั้นตอน Loading phase จนกระทั่งถึงขั้นตอน Reloading phase มาวาดเป็นแผนภาพ จะได้วงแหวนปิดซึ่งเรียกว่วงแหวนนี้ว่า Hysteresis Loop ซึ่งพื้นที่ภายในของวงแหวนปิดนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานสูญเสียที่เกิดจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของส่วนประกอบทั้งสอง โดยสามารถหาพื้นที่ภายในของวงแหวนปิดนี้ได้จากสมการ (4-2) ดังนี้

$$E_{loss} = \frac{2}{3} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) (M_a)^3 \quad (4-2)$$

$$\text{โดย} \quad M_a = \frac{1}{2}(1-r)M \quad ; \quad 0 < r < 1$$

$$k = \frac{G_s I_s}{G_s I_s + G_c I_c}$$

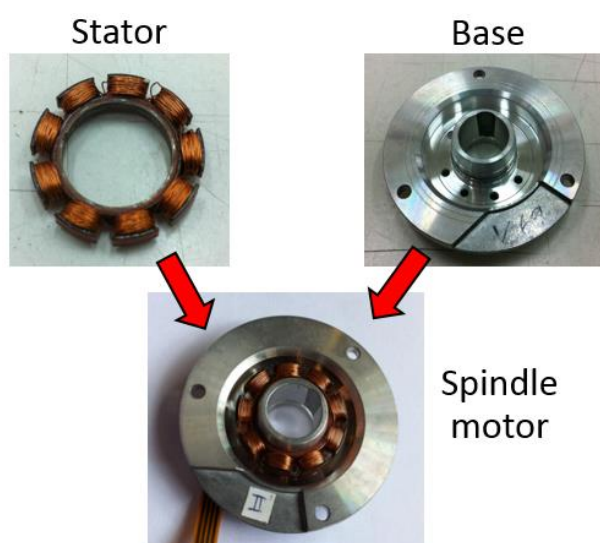
E_{loss} คือ พลังงานสูญเสียที่เกิดจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของสปริงเดลิมาเตอร์ (Joule)

$G_s I_s$	คือ	Torsional stiffness ของเพลลา ($N \cdot m^2$)
$G_c I_c$	คือ	Torsional stiffness ของทรงกระบอกกลวง ($N \cdot m^2$)
M_a	คือ	แอมพลิจูดของแรงบิดที่กระทำภายนอกวงแหวนขดลวด เหนี่ยวนำ ($\frac{N \cdot m}{m}$)

จากสมการ (4-2) จะแสดงให้เห็นว่าพลังงานสูญเสียที่เกิดจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในหนึ่งวัฏจักรนั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของแรงบิดและแรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาว ถ้าแรงบิดภายนอกที่กระทำกับทรงกระบอกกลวงมีค่าคงที่ ค่าพลังงานสูญเสียจากกลไกแรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานแบบแรงบิดระหว่างผิวสัมผัสเพียงตัวเดียวเท่านั้น โดยแรงเสียดทานแบบแรงบิดนี้จะสามารถเชื่อมโยงเข้ากับแรงดันผิวสัมผัสและค่า Interference fit ของการประกอบวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์เข้าด้วยกันแบบสวมอัดได้ด้วยสมการที่ (4-1) กล่าวคือ เมื่อค่า Interference fit หรือค่าแรงดันผิวสัมผัสมีค่าน้อย แรงเสียดทานผิวสัมผัสแบบแรงบิดนี้จะมีค่าลดต่ำลง และจากสมการที่ (4-2) พลังงานสูญเสียเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานจะมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้การส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์มีค่าลดต่ำลง แต่ถ้าค่า Interference fit หรือค่าแรงดันสัมผัสมีค่ามาก แรงเสียดทานผิวสัมผัสแบบแรงบิดนี้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้พลังงานสูญเสียเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานจะมีค่าต่ำลง และทำให้พลังงานการสั่นสะเทือนถูกส่งผ่านสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์มากขึ้นนั่นเอง แต่จากข้อจำกัดของทฤษฎีของ Metherell และ Diller [6] ที่สมมติให้วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์หมุนสัมผัสกันอย่างช้า ๆ แรงที่เกิดขึ้นภายในขึ้นทดสอบจึงอยู่ในลักษณะของ Quasi-static load ทำให้การคำนวณค่าต่าง ๆ สามารถละทิ้งผลจากความเฉื่อยได้ เพราะฉะนั้นพลังงานสูญเสียที่เกิดจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่คำนวณได้จากสมการ (4-2) จึงเป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น ไม่ใช่ค่าที่เกิดขึ้นจริงในการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ตามปกติ จากผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่อไป คือ การวิเคราะห์ผลจากการทำการทดสอบกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่ต่าง ๆ กันด้วยหลักการ Statistical energy analysis โดยผลที่ได้จะช่วยทำให้สามารถประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้ใกล้เคียงความเป็นจริง และนอกจากนั้นจะช่วยทำให้เข้าใจผลของค่า Interference fit ต่างๆ ต่อพฤติกรรมการส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

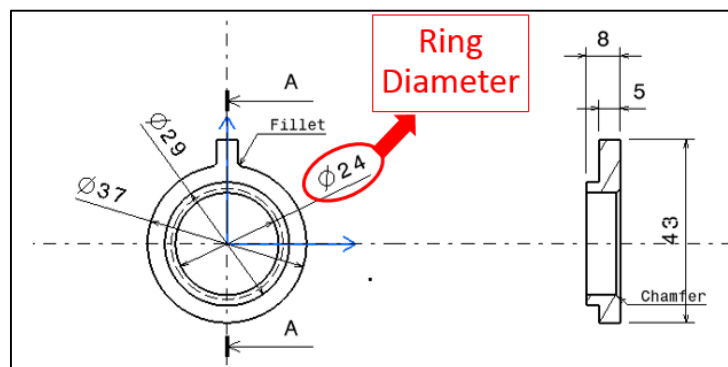
จากความซับซ้อนของโครงสร้างของสปินเดิลมอเตอร์ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ทำให้การศึกษาผลของค่า Interference fit ต่าง ๆ ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์และการประมาณค่าปริมาณพลังงานการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านระหว่างส่วนประกอบทั้งสองให้ใกล้เคียงความเป็นจริงอาจจะเป็นไปได้ยาก เพราะฉะนั้นในส่วนต่อไปจึงได้นำเสนอการศึกษาด้วยการทำการทดสอบกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีค่า Interference fit ต่าง ๆ กัน ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถผลิตให้มีค่า Interference fit ได้ตามต้องการและมีความสะดวกในการนำมาทำการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือน นอกจากนั้นจะนำหลักการ Statistical energy analysis มาประยุกต์ใช้ในวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งเป็นหลักการที่สามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย, ความต้องการอุปกรณ์ในการทดสอบและการวิเคราะห์ที่ต่ำ จึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในงานวิจัยหรือการศึกษาเบื้องต้น โดยในส่วนของการศึกษาผลของค่า Interference fit ต่าง ๆ ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการนำแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์มาใช้ในการทดสอบจะมีขั้นตอน ได้แก่ การออกแบบแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ, การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ, การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนด้วยค้อนเคาะ, การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน และการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2 การออกแบบแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

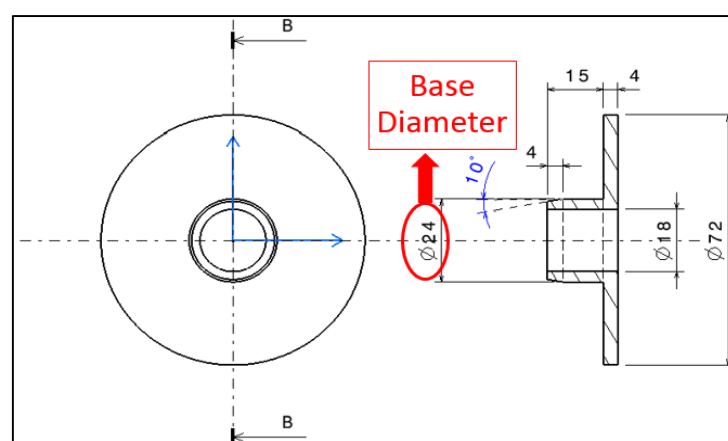


รูปที่ 4.4 สปินเดิลมอเตอร์จริงและส่วนประกอบสำคัญทั้งสองส่วน

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงสปินเดิลมอเตอร์จริงและส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วน คือ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ จะสังเกตได้ว่าการทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยการกระตุ้นทางกลกับสปินเดิลมอเตอร์จริงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากสปินเดิลมอเตอร์จริงมีขนาดเล็ก ทำให้การกระตุ้นและการเก็บค่าการสั่นสะเทือนบางจุดทำได้ลำบาก และไม่สามารถทำให้วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเกิดแรงบิดได้โดยการกระตุ้นทางกล ซึ่งแรงบิดเป็นส่วนสำคัญและส่งผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้การผลิตสปินเดิลมอเตอร์จริงให้มีค่า Interference fit ต่าง ๆ กันตามที่ได้ออกแบบไว้ทำได้ยาก เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ขึ้นใหม่เพื่อใช้ในการศึกษาผลของค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่แตกต่างกันต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง



(ก)

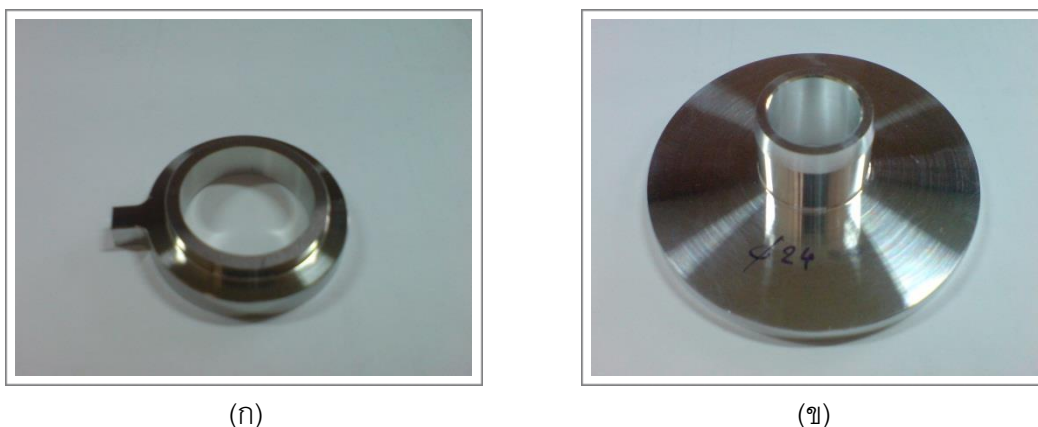


(ข)

รูปที่ 4.5 ภาพวาดและขนาดของแบบจำลอง [14]

(ก) วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) ฐานของสปินเดิลมอเตอร์

แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์จะประกอบไปด้วยแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยแบบจำลองทั้งสองจะถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นส่วนจริงประมาณ 1.5 เท่า แต่จะยังคงมีรูปร่างคล้ายเดิม [14] โดยขนาดและรูปร่างของส่วนประกอบแต่ละส่วนจะแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะถูกออกแบบให้มีส่วนที่ยื่นออกมาเป็นแท่งเพื่อทำให้ง่ายต่อการกระตุ้นให้เกิดแรงบิด และแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นจาน โดยมีผิวราบเรียบเสมอกันตลอดทั้งชิ้น ทั้งนี้เพื่อทำให้ง่ายต่อการวัดค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ผลิตแบบจำลองแต่ละชิ้นจะใช้วัสดุเหมือนกับสปินเดิลมอเตอร์จริง คือ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะใช้เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในการผลิต และฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะใช้อะลูมิเนียม 7075 ในการผลิต และส่วนประกอบของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อผลิตเสร็จจะแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ส่วนประกอบของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อผลิตเสร็จ

(ก) วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) ฐานของสปินเดิลมอเตอร์

โดยเมื่อทราบขนาดของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์จากรูปที่ 4.5 แล้ว จะสามารถออกแบบค่า Interference fit ต่าง ๆ ของชุดแบบจำลองที่จะใช้ในการทดสอบได้ เนื่องจากค่า Interference fit ของชุดแบบจำลองจะมาจากผลต่างของค่ารัศมีภายในของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำกับรัศมีภายนอกของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยค่า Interference fit ที่ได้ออกแบบไว้จะมีทั้งหมด 5 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และชุดแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์หลังประกอบส่วนประกอบทั้งสองเข้าด้วยกันจะแสดงในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.1 ขนาดของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์และค่า Interference fit ของแบบจำลองแต่ละชุด

Model Number	Base Diameter (mm.)	Ring Diameter (mm.)	Interference fit (mm.)
1	24.03	23.989	0.041
2	24.0329	24.0025	0.0304
3	24.0336	24.0167	0.0169
4	24.0331	24.0248	0.0083
5	24.03	24.0251	0.0049



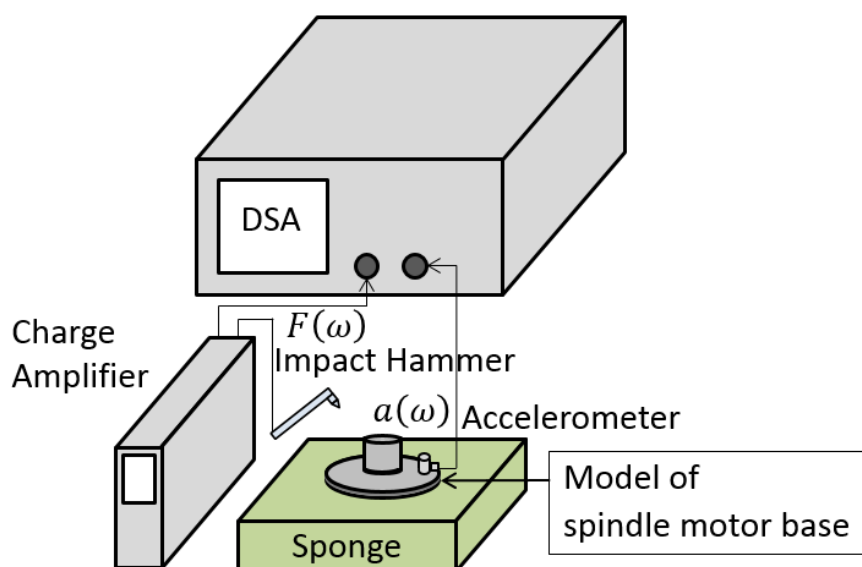
รูปที่ 4.7 ชุดแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์หลังประกอบส่วนประกอบทั้งสองเข้าด้วยกัน

4.3 การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ

4.3.1 การทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ

การทดสอบแบบโมดอล (Modal testing) เป็นการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนรูปแบบหนึ่งโดยการกระตุ้นโครงสร้างของวัตถุใด ๆ ให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยภาระจากภายนอกซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น การกระตุ้นทางกล หรือการกระตุ้นทางไฟฟ้า เป็นต้น โดยผลที่วัดได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปของผลตอบสนองเชิงเวลาหรือเชิงความถี่ซึ่งจะบ่งบอกถึงความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) หรือโหมดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างของวัตถุนั้น ๆ โดยในส่วนของนี้จะนำเสนอการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ (Impact hammer) และ

มีจุดประสงค์เพื่อหาโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น คือ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์และนำไปใช้ประกอบในการวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อ ๆ ไป โดยแบบจำลองที่จะนำมาใช้ในการทดสอบจะมีทั้งหมด 4 ชิ้น คือ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชิ้นที่ 1 และชิ้นที่ 5 และแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 และชิ้นที่ 5



รูปที่ 4.8 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ

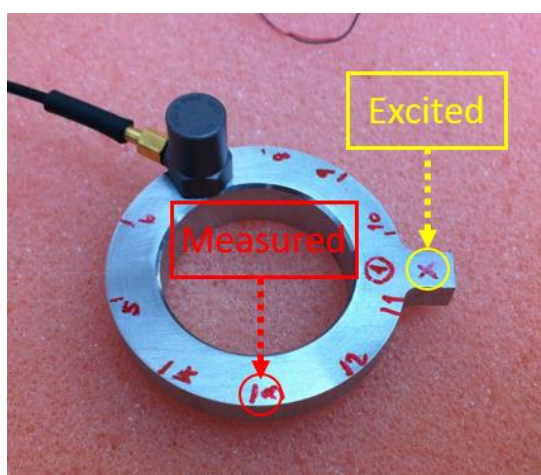
ในการทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.8 โดยการทดสอบจะเริ่มจากการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นโครงสร้างของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นให้เกิดการสั่นสะเทือน ทราบซ์ดิฟเซอร์แบบวัดแรงที่ปลายของค้อนเคาะและทราบซ์ดิฟเซอร์แบบวัดความเร่งหรือ Accelerometer ที่ติดอยู่ที่ผิวแบบจำลอง ณ จุดต่าง ๆ จะวัดแรงที่ใช้ในการกระตุ้นชิ้นทดสอบและวัดความเร่งการสั่นสะเทือนของผิวชิ้นทดสอบ ตามลำดับ แล้วส่งกลับสู่เครื่อง Dynamic signal analyzer (DSA) เพื่อแสดงผลการทดสอบในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งแสดงถึงโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น โดยจะสามารถแบ่งการทดสอบออกตามชิ้นทดสอบได้ ดังนี้

4.3.1.1 แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

ในการทดสอบหาโหมดการสั่นสะเทือนของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็นสองแบบตามทิศทางในการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ คือ กระตุ้นในทิศทางตามแนวแกน (Axial excitation) และกระตุ้นในทิศทางตามแนวสัมผัส (Tangential excitation) โดยสามารถอธิบายวิธีการทดสอบได้ ดังนี้

1. กระตุ้นในทิศทางตามแนวแกน (Axial excitation)

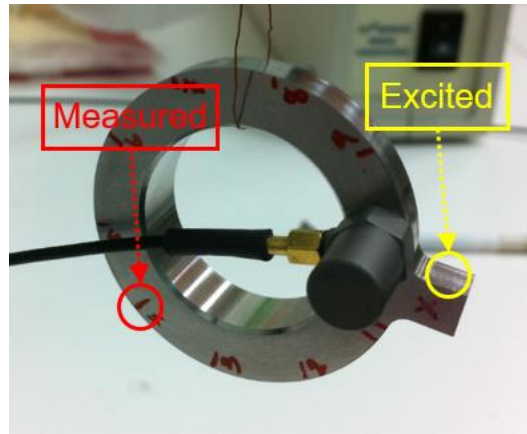
ในการทดสอบนี้จะใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำที่วางอยู่บนฟองน้ำในทิศทางตามแนวแกนที่จุดจุดเดิมตลอดการทดสอบ และวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนตามจุดต่าง ๆ จำนวน 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง รอบ ๆ ขึ้นทดสอบด้วย Accelerometer ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 จุดที่แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวแกนและจุดติด Accelerometer

2. กระตุ้นในทิศทางตามแนวสัมผัส (Tangential excitation)

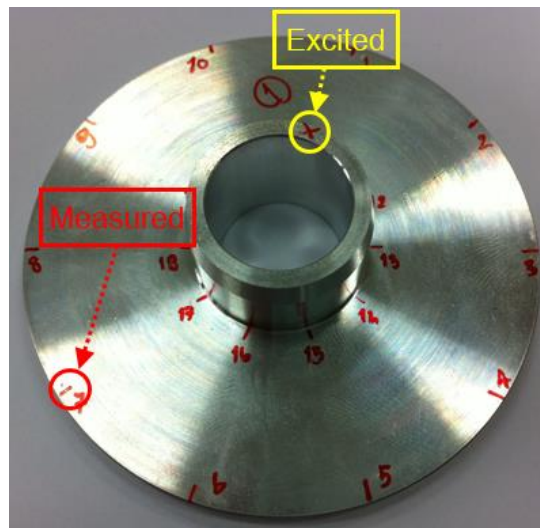
ในการทดสอบนี้จะใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำที่แขวนด้วยลวดทองแดงในทิศทางตามแนวสัมผัสที่จุดจุดเดิมตลอดการทดสอบ และวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนตามจุดต่าง ๆ จำนวน 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง รอบ ๆ ขึ้นทดสอบด้วย Accelerometer ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 จุดที่แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวสัมผัสและจุดติด Accelerometer

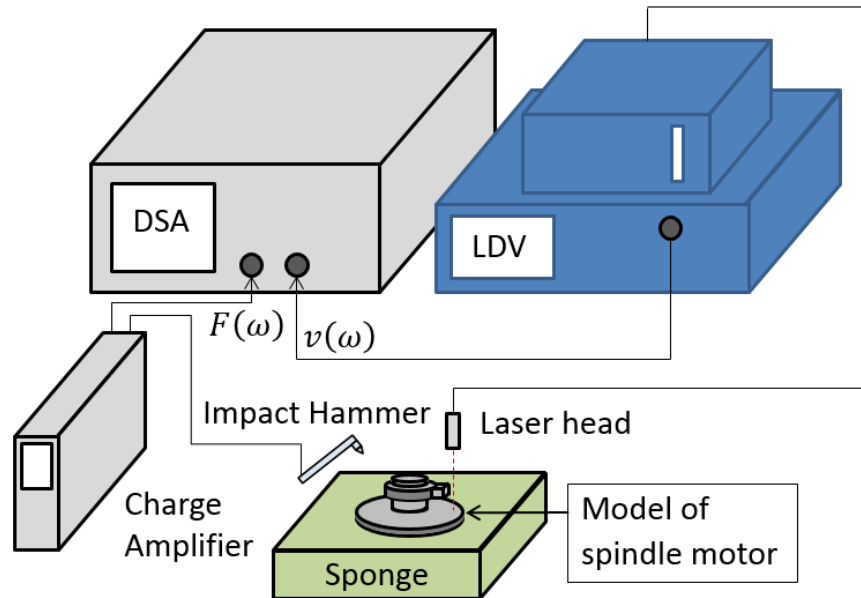
4.3.1.2 แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

ในการทดสอบนี้จะใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่วางอยู่บนฟองน้ำในทิศทางตามแนวแกนที่จุดจุดเดิมตลอดการทดสอบ และใช้ Accelerometer ในการวัดความเร่งการสั่นสะเทือนจำนวน 20 จุด จุดละ 3 ครั้ง รอบ ๆ ขึ้นทดสอบ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 จุดที่แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวแกนและจุดติด Accelerometer

4.3.2 การทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ

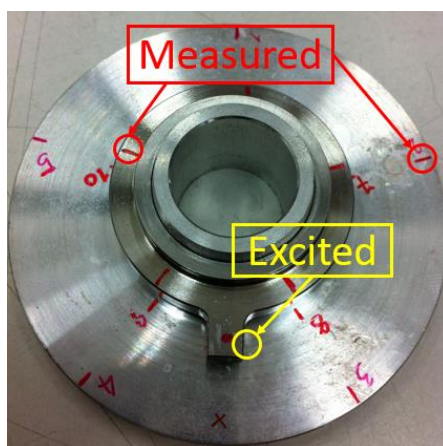


รูปที่ 4.12 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ

ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์จะมีจุดประสงค์เพื่อหาโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ถูกระงับเข้าด้วยกัน และผลที่ได้ไปจะนำไปใช้ประกอบในการวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไป จากรูปที่ 4.12 จะแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ โดยเริ่มจากการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นโครงสร้างของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละชุดให้เกิดการสั่นสะเทือน ทราบชนิดของแรงที่แผ่กระจายของค้อนเคาะและเครื่อง Laser Doppler Vibrometer (LDV) ที่ถูกนำมาใช้ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนของผิวชิ้นทดสอบแต่ละจุด จะวัดค่าของแรงที่ใช้ในการกระตุ้นและค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวชิ้นทดสอบแต่ละจุด ตามลำดับ เพื่อส่งกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อแสดงผลการทดสอบในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งแสดงถึงโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น โดยในการทดสอบจะสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนตามจุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นได้ ดังนี้

4.3.2.1 แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

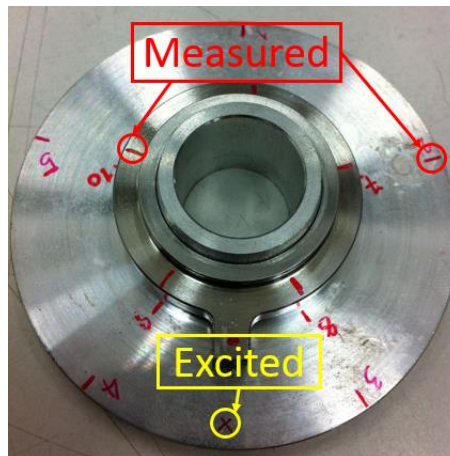
ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์จะนำแบบจำลองชุดที่ 4 มาใช้ โดยค้อนเคาะจะมีหน้าที่ในการกระตุ้นโครงสร้างของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ในรูปของแรงดล ณ บริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตามแนวสัมผัส และจะใช้เครื่อง LDV ในการวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวชิ้นทดสอบบริเวณต่าง ๆ โดยจะกำหนดให้จุดกระตุ้นจะเป็นจุดเดิมตลอดการทดสอบ แต่เปลี่ยนจุดวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV ไป คือ บริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 5 จุด จุดละ 3 ครั้ง และบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จำนวน 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 จุดกระตุ้นด้วยค้อนเคาะและจุดที่วัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV ในการทดสอบแบบโมดอลโดยกระตุ้นแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์บริเวณวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

4.3.2.2 แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

การทดสอบในส่วนนี้จะนำแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 มาใช้ในการทดสอบ โดยค้อนเคาะและเครื่อง LDV จะมีหน้าที่เหมือนเดิมทุกประการ เพียงแต่จะค้อนเคาะมาใช้ในการกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในทิศทางแนวแกนแทน และจะกำหนดให้จุดที่ใช้ในการกระตุ้นจะเป็นจุดเดิมตลอดการทดสอบ และจะใช้เครื่อง LDV วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวชิ้นทดสอบบริเวณต่าง ๆ คือ บริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 5 จุด จุดละ 3 ครั้ง และบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จำนวน 10 จุด จุด 3 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.14



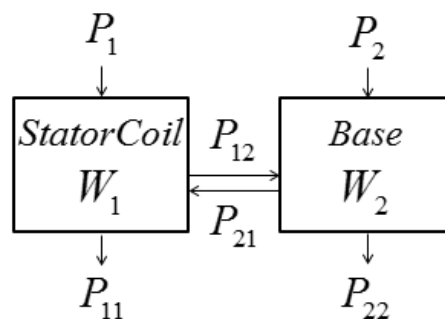
รูปที่ 4.14 จุดกระตุ้นด้วยค้อนเคาะและจุดที่วัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV ในการทดสอบแบบโมดอลโดยกระตุ้นแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์บริเวณฐานของสปินเดิลมอเตอร์

4.4 การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้าน การสั่นสะเทือนด้วยค้อนเคาะ

การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้าน การสั่นสะเทือนด้วยค้อนเคาะกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะมีหลายขั้นตอน โดยจะเริ่มจากการแบ่งระบบของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ ออกเป็นระบบย่อย ๆ เพื่อสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis ไว้ใช้ในการอธิบาย พฤติกรรมการรับพลังงาน, สะสมพลังงานและแลกเปลี่ยนพลังงานกันระหว่างระบบย่อย หลังจากนั้นจึงเริ่มทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหลักการ Statistical energy analysis ได้แก่ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบและสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งจะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละชุด เพื่ออธิบายผลของค่า Interference fit ต่าง ๆ กันต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่าง ส่วนประกอบทั้งสองซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักจุดประสงค์หนึ่งของงานวิจัยฉบับนี้ได้ โดยรายละเอียด การทดสอบแต่ละขั้นตอนจะมีดังนี้

4.4.1 แบบจำลองของ Statistical energy analysis

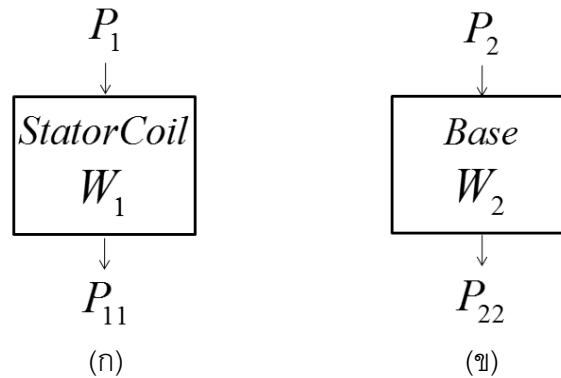
การประยุกต์หลักการของ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของ Statistical energy analysis ซึ่งจะประกอบขึ้นจากระบบย่อยหลาย ๆ ระบบที่มีการรับพลังงาน, สะสมพลังงานและแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน โดยเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ระบบย่อยแทนส่วนประกอบทางกายภาพที่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะสามารถแสดงแบบจำลองของ Statistical energy analysis ที่จะใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ตามรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แบบจำลองของ Statistical energy analysis ที่จะนำมาใช้ประกอบในการวิเคราะห์ผลทางด้านการสั่นสะเทือนด้วยหลักการ Statistical energy analysis

จากรูปที่ 4.15 จะแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Statistical energy analysis ซึ่งแทนระบบที่จะนำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยฉบับนี้ คือ แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ จะประกอบไปด้วยระบบย่อยสองระบบซึ่งแทนส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วน คือ ระบบย่อยที่ 1 จะแทนแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และระบบย่อยที่ 2 จะแทนแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยเมื่อแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยกำลังจากภายนอก จะทำให้โครงสร้างของส่วนประกอบทั้งสองเกิดการสั่นสะเทือนและสะสมพลังงานการสั่นสะเทือนไว้ภายใน พลังงานการสั่นสะเทือนส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบ และอีกส่วนหนึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างระบบย่อยผ่านผิวสัมผัสของส่วนประกอบทั้งสอง จากความสัมพันธ์ดังกล่าวและแบบจำลองของ Statistical energy analysis ตามรูปที่ 4.15 จะถูกนำมาใช้ประกอบการประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบซึ่งจะกล่าวถึงในขั้นตอนต่อ ๆ ไป

4.4.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบ



รูปที่ 4.16 แผนภาพประกอบการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง (ก) แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงหรือ Intrinsic loss factor ของระบบย่อยแต่ละระบบมีหลักการที่สำคัญ คือ จำเป็นต้องแยกส่วนประกอบของระบบที่จะนำมาวิเคราะห์ออกจากกัน แล้วนำระบบย่อยแต่ละระบบเหล่านั้นมาทำการทดสอบแยก ทั้งนี้เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่ได้จากการทดสอบใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด จากรูปที่ 4.16(ก) และ 4.16(ข) จะแสดงแผนภาพประกอบการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ตามลำดับ โดยเมื่อแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยกำลังจากภายนอกจะทำให้เกิดพลังงานการสั่นสะเทือนสะสมไว้ภายในระบบย่อยแต่ละระบบ และเมื่อปล่อยให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว พลังงานดังกล่าวจะสูญเสียไปในรูปของกำลังการสูญเสียเนื่องจากความหน่วงซึ่งจะมีปริมาณเท่ากับกำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละระบบ ซึ่งปริมาณต่าง ๆ เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงตามสมการ (4-3) สำหรับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และสมการ (4-4) สำหรับแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียของแบบจำลองแต่ละชิ้นจากการทดสอบต่อไป

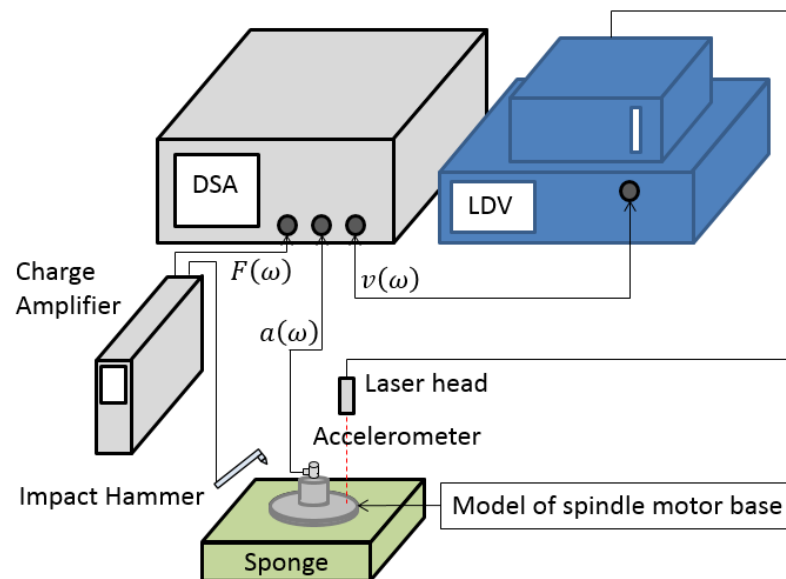
$$P_1 = \omega \eta_1 W_1 \quad (4-3)$$

$$P_2 = \omega \eta_2 W_2 \quad (4-4)$$

โดย	P_1	คือ	กำลังที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (watt)
	P_2	คือ	กำลังที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (watt)
	η_1	คือ	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (1/rad)
	η_2	คือ	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (1/rad)
	W_1	คือ	พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (Joule)
	W_2	คือ	พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (Joule)

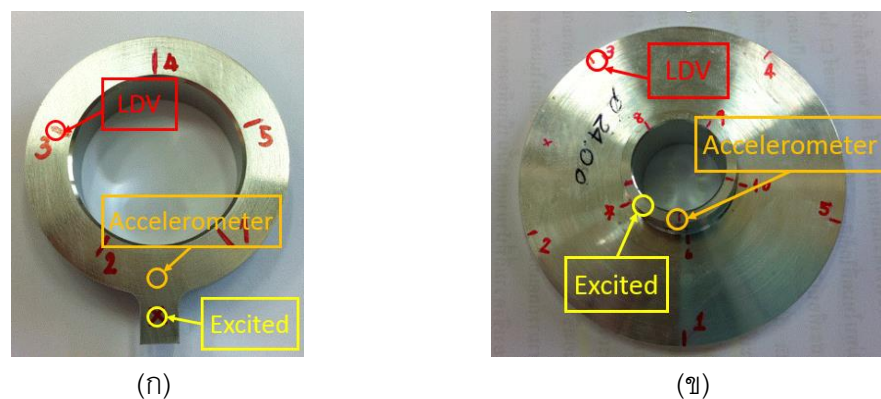
โดยในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงจะสามารถแบ่งเนื้อหาได้เป็นสองส่วน คือ ในส่วนของการทดสอบและการคำนวณ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.2.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง



รูปที่ 4.17 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองโดยการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ

จากรูปที่ 4.17 จะแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ โดยค้อนเคาะจะมีหน้าที่ในการกระตุ้นขึ้นทดสอบในรูปของแรงดล (Impulse force) เพื่อให้ขึ้นทดสอบเกิดการสั่นสะเทือน ทรานซ์ดีวเซอร์แบบวัดแรงที่ติดอยู่ที่ปลายของค้อนเคาะและ Accelerometer ที่ติดอยู่ใกล้กับจุดเคาะจะทำหน้าที่วัดแรงที่ใช้ในการกระตุ้นและค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะตามลำดับ ส่วนเครื่อง LDV จะทำหน้าที่วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวขึ้นทดสอบที่บริเวณต่าง ๆ โดยสัญญาณต่าง ๆ จะถูกส่งกลับเข้าเครื่อง DSA เพื่อทำหน้าที่แสดงผลการทดสอบและนำค่าที่บันทึกผลได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของขึ้นทดสอบแต่ละชิ้นต่อไป ในการทดสอบ จุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นและจุดติด Accelerometer จะเป็นจุดเดิมตลอดการทดสอบ แต่จะใช้เครื่อง LDV ในการวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนรอบ ๆ ผิวขึ้นทดสอบจำนวน 5 จุด จุดละ 3 ครั้ง สำหรับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และ 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง สำหรับแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 จุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นและจุดที่ใช้ Accelerometer และเครื่อง LDV ในการวัดค่าการสั่นสะเทือน

(ก) แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

4.4.2.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง

จากสมการ (4-3) และ (4-4) ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบ จะมีการคำนวณที่สำคัญสองส่วนคือ การคำนวณหาค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละระบบด้วยค้อนเคาะและการคำนวณหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยแต่ละระบบ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1. กำลังที่ใช้ในการกระตุ้น

จากสมการ (4-3) และ (4-4) กำลังที่ใช้ในการกระตุ้นที่จะนำมาใช้ในการคำนวณในสมการดังกล่าวจะเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (4-5) ดังนี้

$$\bar{P}_i = \sum_{j=1}^n \frac{P_j}{n} \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (4-5)$$

โดย \bar{P}_i คือ กำลังเฉลี่ยที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นระบบย่อย i (watt)

P_j คือ กำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละครั้งด้วยค้อนเคาะ (watt)

n คือ จำนวนครั้งที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น

จากสมการ (4-5) กำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละครั้งจะสามารถหาค่าได้จากสมการ (4-6) ดังนี้

$$P_j = F_j \cdot v_j \quad (4-6)$$

โดย F_j คือ แรงที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละครั้งด้วยค้อนเคาะ (N)

v_j คือ ความเร็วการสั่นสะเทือนของระบบย่อยที่เกิดจากการกระตุ้นแต่ละครั้งด้วยค้อนเคาะ (m/s)

จากสมการ (4-6) ค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของระบบย่อยที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะจะสามารถหาได้จากค่าความเร่งการสั่นสะเทือนของระบบย่อยได้จากสมการ (4-7) ดังนี้

$$v_j = \frac{a_j}{\omega} \quad (4-7)$$

โดย a_j คือ ความเร่งการสั่นสะเทือนของระบบย่อยที่เกิดจากการกระตุ้นแต่ละครั้งด้วยค้อนเคาะ (m/s^2)

ω คือ ความถี่ของการสั่นสะเทือน (rad/s)

โดยเมื่อแทนค่าจากสมการ (4-6) และ (4-7) ลงในสมการ (4-5) จะได้สมการ (4-8) ที่ใช้ในการคำนวณกำลังเฉลี่ยที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละระบบด้วยค้อนเคาะเมื่อสามารถวัดค่าแรงที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละครั้งได้จากทรานซ์ดิวเซอร์แบบวัดแรงของค้อนเคาะ และค่าความเร่งการสั่นสะเทือนเมื่อระบบย่อยถูกกระตุ้นจาก Accelerometer ที่ติดบนแบบจำลองใกล้จุดที่ถูกกระตุ้นมากที่สุด

$$\bar{P}_i = \frac{1}{\omega} \sum_{j=1}^n \left(\frac{F_j \cdot a_j}{n} \right) \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (4-8)$$

2. พลังงานการสั่นสะเทือน

จากสมการ (4-3) และ (4-4) พลังงานการสั่นสะเทือนที่จะนำมาใช้ในการคำนวณจะเป็นค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อย โดยจะสามารถคำนวณได้จากสมการ (4-9) ดังนี้

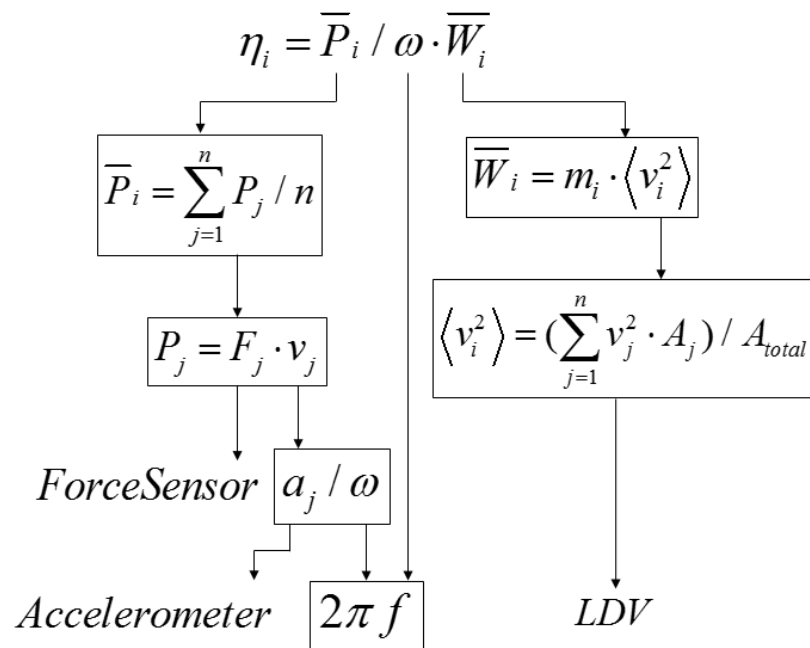
$$\bar{W}_i = m_i \langle v_i^2 \rangle_{sp} \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (4-9)$$

โดย $\langle v_i^2 \rangle_{sp} = \frac{\left(\sum_{j=1}^n (v_i)_j^2 \cdot A_j \right)}{A_{total}}$

\bar{W}_i	คือ	พลังงานการสั่นสะเทือนเฉลี่ยของระบบย่อย i (Joule)
m_i	คือ	มวลของระบบย่อย i (kg)
$\langle v_i^2 \rangle_{sp}$	คือ	ความเร็วการสั่นสะเทือนกำลังสองเฉลี่ยตามพื้นที่ของระบบย่อย i (space-averaged square velocity) ((m/s) ²)
$(v_i)_j$	คือ	ความเร็วการสั่นสะเทือนบนพื้นผิวใด ๆ ของระบบย่อย i (m/s)
n	คือ	จำนวนครั้งที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น
A_j	คือ	พื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใด ๆ (m ²)
A_{total}	คือ	ผลรวมของพื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใด ๆ ทั้งหมดของระบบย่อย i (m ²)

จากสมการ (4-9) จะสามารถนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนเฉลี่ยของระบบย่อยแต่ละระบบได้เมื่อสามารถวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนแต่ละจุดของระบบย่อยได้จากเครื่อง LDV เมื่อระบบย่อยแต่ละระบบถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ โดยจากขั้นตอนการทดสอบจะสังเกตได้ว่าการวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV บนพื้นผิวรอบ ๆ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปริงเด็ลมอเตอร์เป็นจำนวน 5 จุดและ 10 จุด ตามลำดับ จะเป็นการแบ่งพื้นที่ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนออกเป็น 5 ส่วนและ 10 ส่วน เท่า ๆ กันนั่นเอง

โดยจะสามารถสรุปในส่วนของกระบวนการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบให้อยู่ในรูปของแผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ตามรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงสำหรับการทดสอบด้วยค้อนเคาะ

4.4.3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย

หลังจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปริงเด็ลมอเตอร์ถูกประกอบเข้าด้วยกันแล้วจะสามารถนำมาใช้ในทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยได้ และสามารถนำแบบจำลองของ Statistical energy

analysis ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ในรูปที่ 4.15 มาใช้ประกอบในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ใช้ในการกระตุ้น, กำลังการสิ้นสະเทือนการสูญเสียเนื่องจากความหน่วง และกำลังการสิ้นสະเทือนที่สูญเสียระหว่างระบบย่อยในการทดสอบในส่วนนี้ได้ โดยจากรูปที่ 4.15 เมื่อระบบย่อยแต่ละระบบถูกกระตุ้นด้วยกำลังจากภายนอก จะทำให้โครงสร้างของระบบย่อยสะสมพลังงานการสิ้นสະเทือนไว้ภายใน และเกิดการสูญเสียภายในรูปของกำลังการสิ้นสະเทือนการสูญเสียเนื่องจากความหน่วงและกำลังการสิ้นสະเทือนที่ถูกส่งผ่านระหว่างระบบย่อย ซึ่งปริมาณของกำลังการสิ้นสະเทือนที่ถูกส่งผ่านระหว่างระบบย่อยนี้จะมีสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยและพลังงานการสิ้นสະเทือนของระบบย่อยแต่ละระบบตามสมการ (4-10) และ (4-11) ดังนี้

$$P_{12} = \omega \eta_{12} W_1 \quad (4-10)$$

$$P_{21} = \omega \eta_{21} W_2 \quad (4-11)$$

โดย P_{12} คือ กำลังสิ้นสະเทือนที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (watt)

P_{21} คือ กำลังสิ้นสະเทือนที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (watt)

η_{12} คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (1/rad)

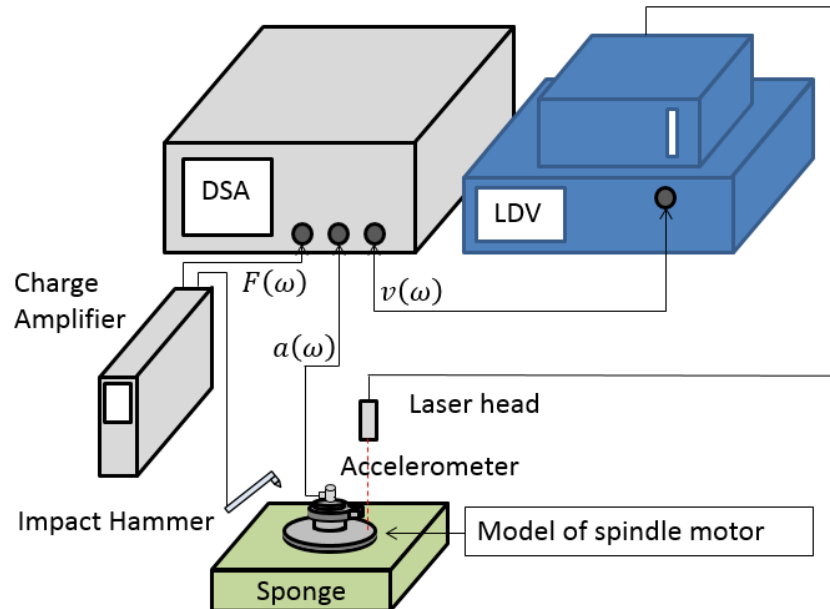
η_{21} คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (1/rad)

W_1 คือ พลังงานการสิ้นสະเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (Joule)

W_2 คือ พลังงานการสิ้นสະเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (Joule)

โดยในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจะสามารถแบ่งเนื้อหาได้เป็นสองส่วน คือ ในส่วนของ การทดสอบและการคำนวณ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.3.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย



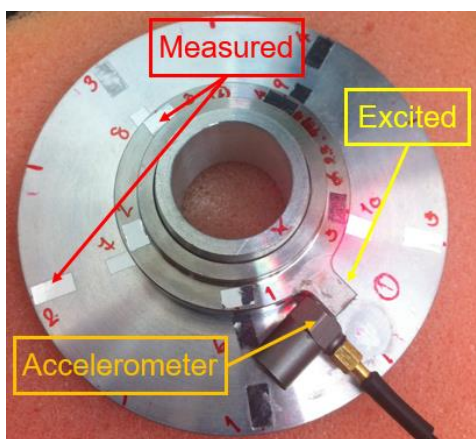
รูปที่ 4.20 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองโดยการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ

ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์จะใช้วิธี Power Injection Method [10] ในการทดสอบ และมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบตามรูปที่ 4.20 โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ จะยังมีหน้าที่เหมือนในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงโดยการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในหัวข้อย่อยที่ผ่านมา แต่จุดที่ติด Accelerometer และจุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นจะเปลี่ยนไป โดยสามารถแบ่งขั้นตอนในการทดสอบออกได้เป็นสองขั้นตอนตามจุดที่จะใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น ดังนี้

1. กระตุ้นแบบจำลองแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

ขั้นตอนแรกของการทดสอบด้วยวิธี Power Injection Method [10] จะเริ่มจากการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะในทิศทางที่ทำให้เกิดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์มากที่สุด คือ ตามแนวสัมผัส และจะติด Accelerometer ที่แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในแนวเดียวกับทิศทางของแรงกระตุ้นเพื่อวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนเนื่องจากการกระตุ้นของค้อนเคาะตามรูปที่ 4.21 ทั้งนี้ผลการวัดค่าจากทรานซ์ดีวเซอร์แบบวัดแรงที่ติดอยู่ที่ปลายของค้อนเคาะและจาก

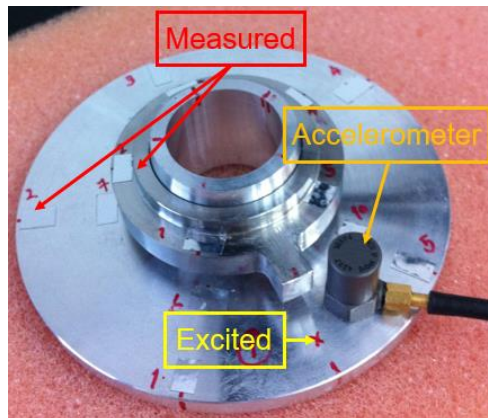
Accelerometer จะนำมาใช้ในการคำนวณค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้น โดยเครื่อง LDV จะทำหน้าที่วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนที่จุดต่าง ๆ บนแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ 5 จุด จุดละ 3 ครั้ง และบนแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง ตามรูปที่ 4.21 เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนบนผิวแบบจำลองแต่ละชิ้นต่อไป



รูปที่ 4.21 จุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ, จุดติด Accelerometer และจุดที่ใช้เครื่อง LDV ในการวัดความเร็วการสั่นสะเทือนที่จุดต่าง ๆ

2. กระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

ขั้นตอนที่สองของการทดสอบด้วยวิธี Power Injection Method [10] จะใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นระบบย่อยอีกระบบหนึ่ง คือ แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยจะเคาะในทิศทางตามแนวแกน และจะติด Accelerometer ให้ใกล้กับจุดเคาะมากที่สุด ตามรูปที่ 4.22 โดยผลการวัดค่าจากทรานซ์ดิวเซอร์แบบวัดแรงที่ติดอยู่ที่ปลายของค้อนเคาะและจาก Accelerometer จะนำมาใช้ในการคำนวณค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้น โดยเครื่อง LDV จะทำหน้าที่วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนที่จุดต่าง ๆ บนแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ 5 จุด จุดละ 3 ครั้ง และบนแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง ตามรูปที่ 4.22 เช่นเดียวกับในขั้นตอนการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนบนผิวแบบจำลองแต่ละชิ้นต่อไป



รูปที่ 4.22 จุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์, จุดติด Accelerometer และจุดที่ใช้เครื่อง LDV ในการวัดความเร็วการสั่นสะเทือนที่จุดต่าง ๆ

4.4.3.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย

จากการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยด้วยวิธี Power Injection Method [10] ซึ่งจะแบ่งขั้นตอนในการทดสอบออกเป็นสองขั้นตอน คือ กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ แล้ววัดผลการสั่นสะเทือนของแบบจำลองทั้งสองส่วน จากนั้นจึงทำการกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ แล้ววัดผลการสั่นสะเทือนของแบบจำลองทั้งสองส่วนเช่นเดิม จากวิธีดังกล่าวและจากแบบจำลองของ Statistical energy analysis ดังรูปที่ 4.15 จะสามารถนำมาเขียนสมการอนุรักษ์พลังงานของระบบย่อยแต่ละระบบในการทดสอบด้วยวิธี Power Injection Method [10] เป็นระบบสมการ (4-12) ได้ ดังนี้

$$\omega \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

โดย W_{11} คือ พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้น (Joule)

W_{12} คือ พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ถูกกระตุ้น (Joule)

W_{21} คือ พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้น (Joule)

W_{22} คือ พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ถูกกระตุ้น (Joule)

โดยจากระบบสมการ (4-12) จะสามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยได้จากการแก้ระบบสมการ (4-13) ดังนี้

$$\begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (4-13)$$

แต่จากการแก้สมการระบบสมการ (4-13) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่คำนวณได้กลับมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยแต่ละระบบอย่างมาก ทำให้ผลที่ได้จากระบบสมการ (4-13) อาจมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง เพราะฉะนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากสมการของ Lalor [10] ตามสมการ (4-14) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ และสมการ (4-15) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียจากแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิโมเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนี้

$$\eta_{12} = \frac{1}{\omega} \left(\frac{W_{21}}{W_{11}} \right) \left(\frac{P_2}{W_{22}} \right) \quad (4-14)$$

$$\eta_{21} = \frac{1}{\omega} \left(\frac{W_{12}}{W_{11}} \right) \left(\frac{P_1}{W_{22}} \right) \quad (4-15)$$

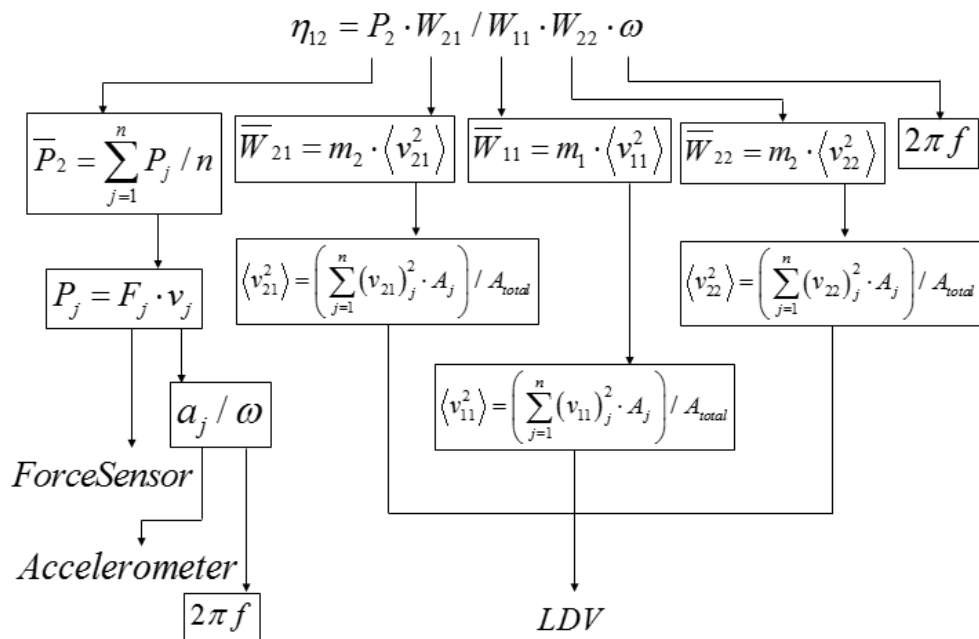
โดยเมื่อสามารถวัดแรงที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลองด้วยค้อนเคาะ, ความเร่งของการสั่นสะเทือนของแบบจำลองบริเวณใกล้กับจุดกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ และความถี่การสั่นสะเทือนของผิวของแบบจำลอง ณ จุดต่าง ๆ ในการทดสอบแบบ Power Injection Method [10] จากทรานซ์ดีวเซอร์แบบวัดแรงที่ปลายของค้อนเคาะ, Accelerometer และเครื่อง LDV แล้วจะสามารถนำค่าต่าง ๆ มาคำนวณหาค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นได้จากสมการ (4-8) และจะสามารถคำนวณหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยแต่ละระบบในขั้นตอนนี้ได้จากสมการ (4-16) ซึ่งมาจากการประยุกต์สมการ (4-9) ในหัวข้อย่อยที่ผ่านมา ดังนี้

$$\bar{W}_{ij} = m_i \langle v_{ij}^2 \rangle_{sp} \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (4-16)$$

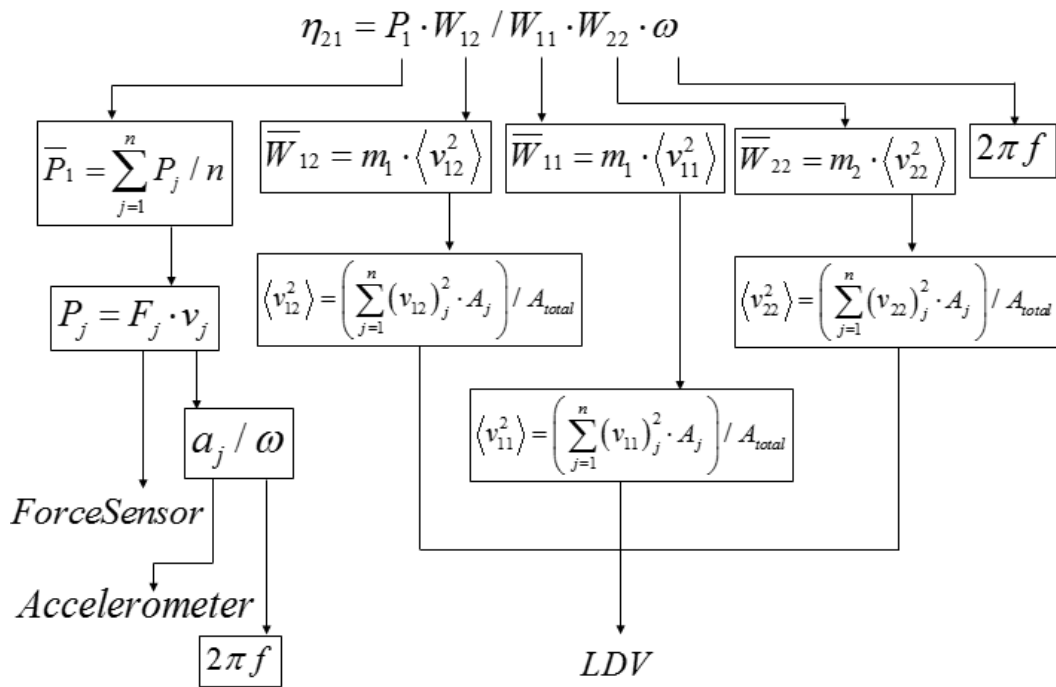
$$\text{โดย} \quad \langle v_{ij}^2 \rangle_{sp} = \frac{\left(\sum_{k=1}^n (v_{ij})_k^2 \cdot A_k \right)}{A_{total}}$$

- \bar{W}_{ij} คือ พลังงานการสั่นสะเทือนเฉลี่ยของระบบย่อย i เมื่อระบบย่อย j ถูกกระตุ้น (Joule)
- m_i คือ มวลของระบบย่อย i (kg)
- $\langle v_{ij}^2 \rangle_{sp}$ คือ ความเร็วการสั่นสะเทือนกำลังสองเฉลี่ยตามพื้นที่ของระบบย่อย i เมื่อระบบย่อย j ถูกกระตุ้น (space-averaged square velocity) ((m/s)²)
- $(v_{ij})_k$ คือ ความเร็วการสั่นสะเทือนบนพื้นผิวใด ๆ ของระบบย่อย i เมื่อระบบย่อย j ถูกกระตุ้น (m/s)
- n คือ จำนวนครั้งที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น
- A_k คือ พื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใด ๆ (m²)
- A_{total} คือ ผลรวมของพื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใด ๆ ทั้งหมดของระบบย่อย i (m²)

หลังจากนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยได้จากสมการ (4-14) และ (4-15) ต่อไป โดยจะสามารถสรุปในส่วนของการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยให้อยู่ในรูปของแผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ตามรูปที่ 4.23 และ 4.24



รูปที่ 4.23 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียจากระบบย่อย 1 สู่ระบบย่อย 2 สำหรับการทดสอบด้วยค้อนเคาะ



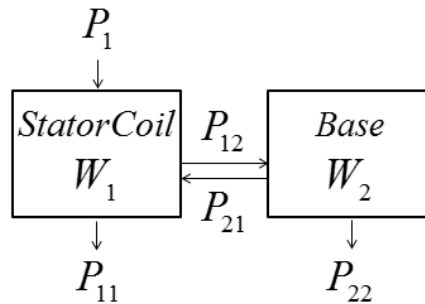
รูปที่ 4.24 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียจากระบบย่อย 2 สู่ ระบบย่อย 1 สำหรับการทดสอบด้วยค้อนเคาะ

เมื่อสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยได้จากการทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยค้อนเคาะแล้วทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (η_{12}) และค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (η_{21}) จะนำไปสู่ขั้นตอนต่อไป คือ การคำนวณเพื่อหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ($P_{1 \rightarrow 2}$) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.4.4 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวม (Total vibration transmission power)

ในการศึกษาผลของค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยฉบับนี้ จะนำปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (Total vibration transmission power from ring to base, $P_{1 \rightarrow 2}$) ของแบบจำลองแต่ละชุดมาใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างกัน ผลที่ได้จะทำให้เข้าใจผลของค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองต่อการ

ส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างกัน นอกจากนั้นแล้วปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมยังแสดงให้เห็นถึงทิศทางการไหลของพลังงานการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์อีกด้วย



รูปที่ 4.25 แบบจำลองการส่งผ่านการสั่นสะเทือนเมื่อวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกระตุ้นโดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะเป็นไปตามแบบจำลองในรูปที่ 4.25 โดยในการทดสอบจะใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งจะเป็นการจำลองเหตุการณ์เสมือนว่าวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกระตุ้นด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแท่งพันขดลวดและโรเตอร์ การกระตุ้นดังกล่าวจะส่งผลทำให้วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการสะสมพลังงานการสั่นสะเทือน โดยส่วนหนึ่งจะสูญสลายไปเนื่องจากความหน่วงของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่านฐานของสปินเดิลมอเตอร์ผ่านผิวสัมผัส ซึ่งจะทำให้ฐานของสปินเดิลมอเตอร์เกิดการสะสมพลังงานการสั่นสะเทือนเช่นเดียวกัน โดยพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญสลายไปเนื่องจากความหน่วงของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ และส่วนหนึ่งจะถูกส่งกลับสู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำผ่านผิวสัมผัส

โดยในคำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะเริ่มจากการคำนวณหาค่ากำลังการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (P_{12}) และค่ากำลังการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (P_{21}) จากสมการ (4-17) และ (4-18) ตามลำดับ ดังนี้

$$P_{12} = \omega \eta_{12} W_{11} \quad (4-17)$$

$$P_{21} = \omega \eta_{21} W_{21} \quad (4-18)$$

โดย W_{11} คือ พลังงานการสันสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวน
ขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้น (Joule)

W_{21} คือ พลังงานการสันสะเทือนของแบบจำลองของฐาน
ของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อแบบจำลองวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้น (Joule)

จากสมการ (4-17) และ (4-18) ค่าของสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบ
ย่อยจะมาจากการทดสอบในส่วนของหัวข้อย่อยที่ผ่านมา และค่าพลังงานการสันสะเทือนจะ
สามารถคำนวณได้จากสมการ (4-16) โดยเมื่อสามารถหาค่ากำลังการสันสะเทือนที่ถูกส่งผ่านจาก
แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์และกำลังการสันสะเทือนที่
ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำได้แล้ว จะ
นำไปสู่การคำนวณหาค่ากำลังการสันสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวด
เหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ($P_{1 \rightarrow 2}$) ตามสมการ (4-19) ดังนี้

$$P_{1 \rightarrow 2} = P_{12} - P_{21} \quad (4-19)$$

และเมื่อแทนสมการ (4-17) และ (4-18) ลงในสมการ (4-19) จะได้สมการสำเร็จที่
ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังการสันสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวด
เหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ดังสมการ (4-20)

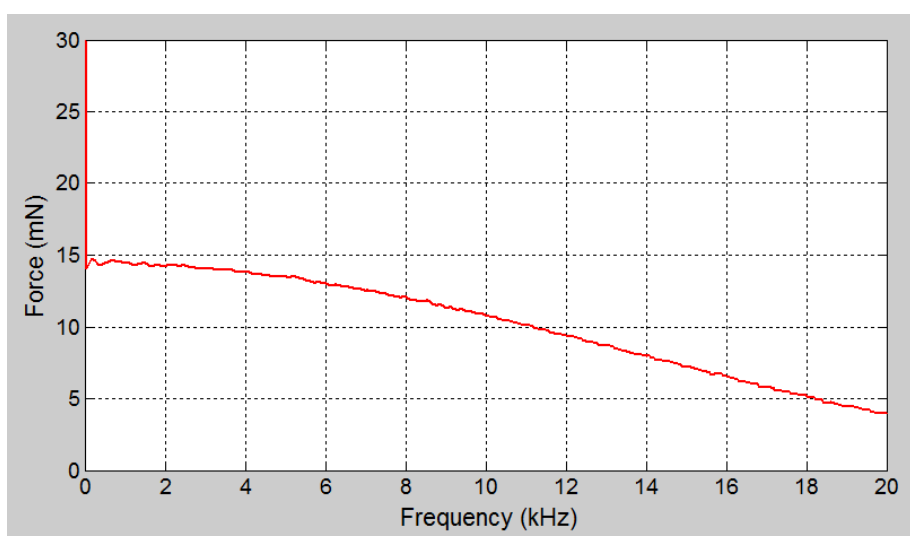
$$P_{1 \rightarrow 2} = \omega \eta_{12} W_{11} - \omega \eta_{21} W_{21} \quad (4-20)$$

จากสมการ (4-20) ผลของค่ากำลังการส่งผ่านการสันสะเทือนรวมที่คำนวณได้จะ
มีค่าเป็นไปได้อย่างบวกและลบ โดยถ้าค่ากำลังการส่งผ่านการสันสะเทือนรวมมีค่าเป็นบวกจะแสดง
ให้เห็นว่ากำลังการสันสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำไปสู่ฐาน
ของสปินเดิลมอเตอร์ได้มากกว่า แต่ถ้าค่ากำลังการส่งผ่านการสันสะเทือนรวมมีค่าเป็นลบจะมี
ความหมายในทางตรงกันข้าม คือ จะแสดงให้เห็นว่ากำลังการสันสะเทือนจะถูกส่งกลับจาก
แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำได้มากกว่า ซึ่งมีประโยชน์
อย่างมากในการบ่งบอกถึงทิศทางในการไหลของพลังงานการสันสะเทือน นอกจากนั้นแล้ว
ปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสันสะเทือนรวมที่คำนวณได้จากสมการ (4-20) จะนำมาใช้ในการ
เปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองแต่ละชุดเพื่อหาผลของค่า Interference fit ต่อการส่งผ่านการ
สันสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง โดยในความเป็นจริงค่ากำลังการส่งผ่านการสันสะเทือน
รวมนี้จะถูกส่งผ่านจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์และส่งผ่านสู่ภายนอก

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กลายเป็นเสียงรบกวนต่อไป เพราะฉะนั้นถ้าปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมนี้ยิ่งลดต่ำลง จะแสดงให้เห็นว่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจะถูกแพร่กระจายจากจุดกำเนิด คือ บริเวณวงแหวนขดลวดเหนียวมา สู่อานของสปินเดิลมอเตอร์และส่วนต่าง ๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และส่งผ่านสู่ภายนอกได้น้อยลง ซึ่งส่งผลดีต่อการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์และเสียงรบกวนจากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ลดลง ปริมาณดังกล่าวจึงเป็นค่าที่งานวิจัยฉบับนี้ให้ความสนใจและความสำคัญ

4.5 การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

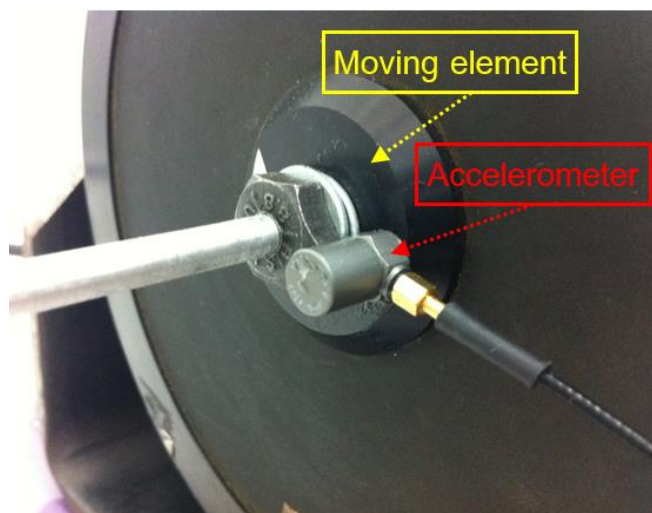
ในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนและนำหลักการ Statistical energy analysis มาใช้ในการวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวและฐานของสปินเดิลมอเตอร์จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระตุ้นขึ้นทดสอบให้เกิดการสั่นสะเทือน ยกตัวอย่าง คือ ค้อนเคาะ ซึ่งได้นำเสนอการนำมาใช้ในการทดสอบไปในหัวข้อที่ผ่านมา โดยแรงที่เกิดจากการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นจะอยู่ในรูปของแรงดล (Impulse) ตามรูปที่ 4.26 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าขึ้นทดสอบจะถูกกระตุ้นที่ทุกความถี่ตั้งแต่ 0 – 20 kHz โดยที่ความถี่ต่ำ ขนาดของแรงกระตุ้นจะสูง และมีค่าลดลงเมื่อค่าความถี่สูงขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้โหมดการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูงมีค่าไม่เด่นชัดหรือไม่ปรากฏ นอกจากนั้นการควบคุมขนาดของแรงที่ใช้ในการกระตุ้นขึ้นทดสอบด้วยค้อนเคาะแต่ละรอบให้เท่า ๆ กันทำได้ยาก จากเหตุผลดังกล่าวการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration exciter) มาใช้ในการกระตุ้นขึ้นทดสอบอาจมีความเหมาะสมมากกว่า



รูปที่ 4.26 แรงดลในโดเมนความถี่ที่เกิดจากการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นขึ้นทดสอบ



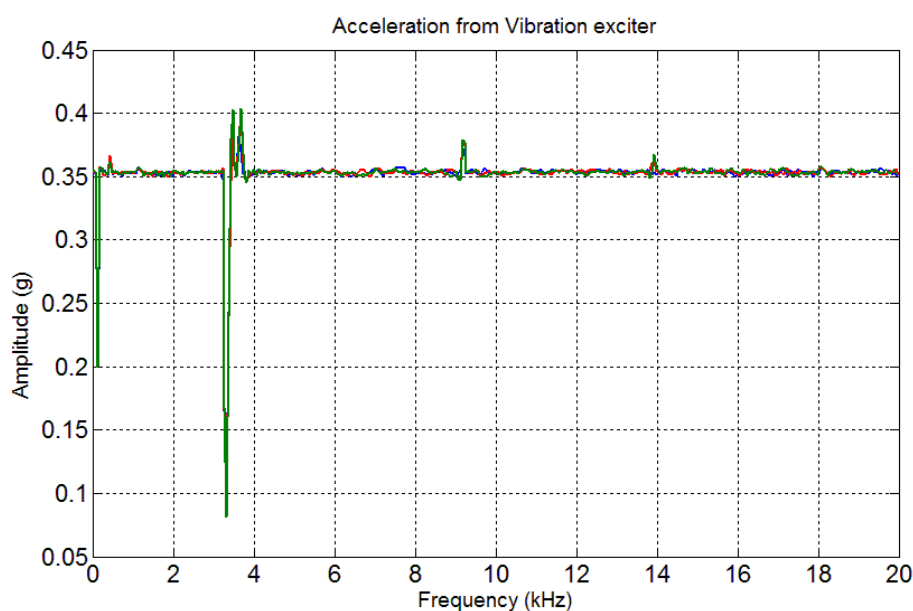
รูปที่ 4.27 เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration exciter)



รูปที่ 4.28 ส่วนเคลื่อนที่ (Moving element) และ Accelerometer ที่ช่วยควบคุมการสั่นสะเทือน

เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน หรือ Vibration exciter ตามรูปที่ 4.27 เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่นิยมใช้ในการกระตุ้นขึ้นทดสอบนอกเหนือไปจากค้อนเคาะ มีข้อได้เปรียบ คือ สามารถควบคุมการสั่นสะเทือนได้ตามลักษณะของแรงดันที่จ่ายเข้าสู่เครื่อง โดยในการทดสอบ เครื่อง Dynamic signal analyzer (DSA) จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้า (Signal generator) โดยจ่ายแรงดันเข้าสู่เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในรูปของ Sweep sine ความถี่ตั้งแต่

0 – 20 kHz และทำให้ส่วนเคลื่อนที่ (Moving element) ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเกิดการสั่นสะเทือน จากรูปที่ 4.28 จะแสดงการติด Accelerometer เพื่อวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและส่งสัญญาณกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันแก่เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนให้สั่นสะเทือนด้วยขนาดคงที่ตลอดช่วงความถี่ 0 – 20 kHz ซึ่งความเร่งการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่ที่วัดได้จาก Accelerometer จะแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้จะมีขนาดค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงความถี่ในการทดสอบ คือ 0 – 20 kHz อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.29 จะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ 100 Hz และ 3.3 kHz จะมีค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่สูงหรือต่ำอย่างผิดปกติ ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากความถี่การสั่นสะเทือนดังกล่าวของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนตรงกับความถี่ธรรมชาติของชิ้นทดสอบที่ถูกกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจึงทำให้ขนาดของความเร่งการสั่นสะเทือนสูงหรือต่ำอย่างผิดปกติ ซึ่งเครื่อง DSA ไม่สามารถควบคุมได้นั่นเอง



รูปที่ 4.29 ความเร่งการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

ในการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ จะมีประเด็นที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ แทะส่งผ่านการสั่นสะเทือน (Stinger) ซึ่งอุปกรณ์นี้จะถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนสู่แบบจำลองที่จุดใดจุดหนึ่ง โดยแทะส่งผ่านการสั่นสะเทือนนี้จะมีผลกระทบต่อผลการสั่นสะเทือนที่ได้จากการทดสอบโดยตรง เพราะฉะนั้นก่อนที่

จะนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้จะต้องมีการทดสอบเพื่อเลือกแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมและส่งผลกระทบต่อการทดสอบน้อยที่สุดด้วยเสมอ และจะสามารถสรุปขั้นตอนการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนโดยเริ่มจากขั้นตอนในการเลือกแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน ได้แก่ การออกแบบแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน, การหาโหมดการสั่นสะเทือนของแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน, การทดสอบเพื่อเลือกแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน โดยหลังจากได้แหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์แล้ว จึงนำแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบแบบโมดอลกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เพื่อหาโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองแต่ละชุด และนำไปใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง, สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย และกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ตามหลักการของ Statistical energy analysis ต่อไป ซึ่งรายละเอียดแต่ละขั้นตอนจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

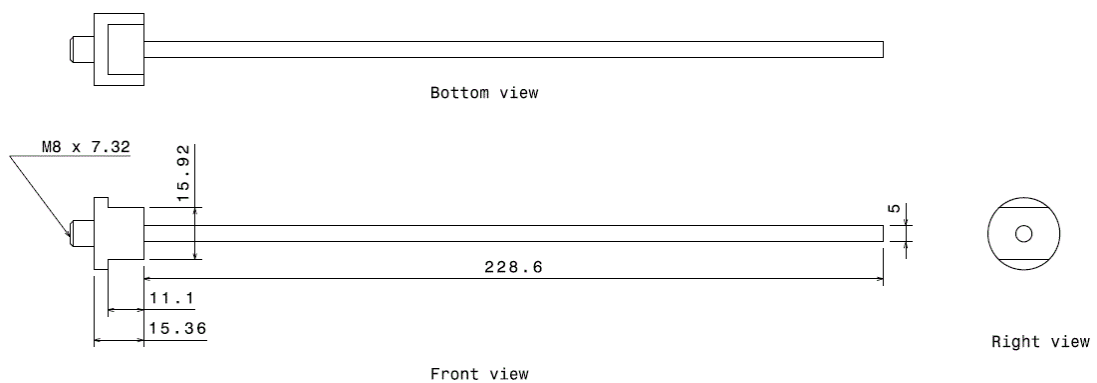
4.5.1 แหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน

การกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์เฉพาะจุดด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จำเป็นต้องมีแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนสู่ชิ้นทดสอบในตำแหน่งที่ต้องการกระตุ้น ซึ่งรูปร่าง, ขนาดและวัสดุของแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนล้วนส่งผลกระทบต่อตอบสนองเชิงความถี่ที่วัดได้จากการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนไปใช้ในการกระตุ้น เพราะฉะนั้นก่อนการทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นจึงต้องทำการออกแบบและสร้างแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน และนำมาทดสอบเพื่อเลือกแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ทำให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่วัดได้จากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนใกล้เคียงกับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่วัดได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะมากที่สุด โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอนจะมีดังนี้

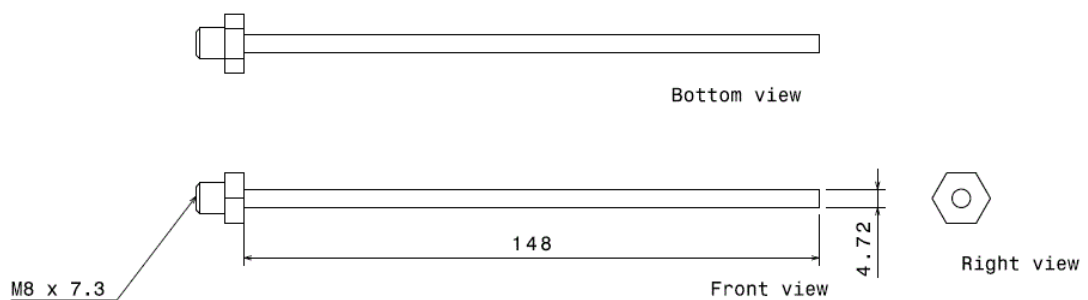
4.5.1.1 การออกแบบและสร้างแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน

ในการทดสอบเพื่อเลือกแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนจะเริ่มจากการออกแบบและสร้างแหล่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน โดยกำหนดให้ปลายที่จะติดกับชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นแท่ง

ทรงกระบอกความยาวแตกต่างกัน มีหน้าตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหมาะสมกับพื้นที่ที่จะถูกกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน หัวอีกด้านหนึ่งของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนจะมีลักษณะเป็นเกลียวเพื่อสวมเข้ากับส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน และวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน ได้แก่ เหล็กเจียร (SKD11), อะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม โดยแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียรจะมีลักษณะตามรูปที่ 4.30 และมีความยาว 6 นิ้ว, 9 นิ้ว และ 12 นิ้ว ส่วนแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีลักษณะตามรูปที่ 4.31 โดยมีความยาว 1 นิ้ว, 3 นิ้ว, 6 นิ้ว, 9 นิ้ว และ 12 นิ้ว



รูปที่ 4.30 รูปแบบของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ทำมาจากเหล็กเจียร

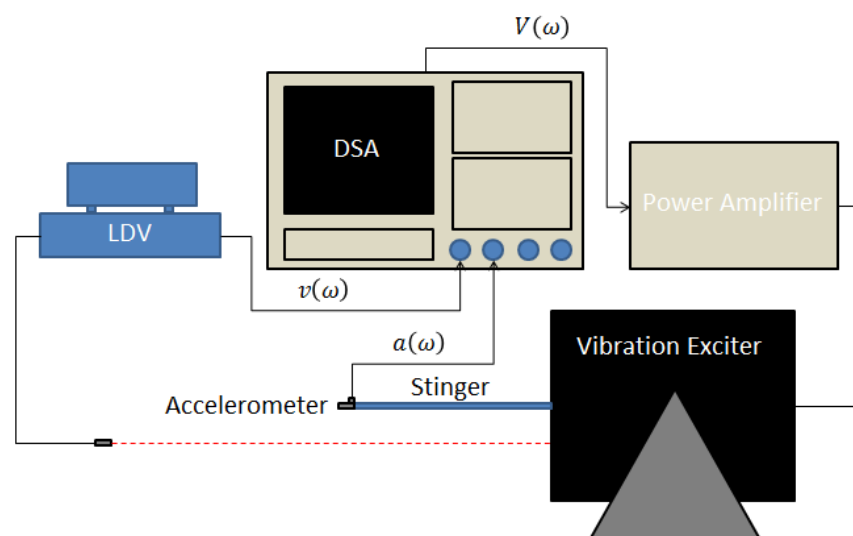


รูปที่ 4.31 รูปแบบของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ทำมาจากอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

4.5.1.2 การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน

หลังจากออกแบบและผลิตแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแท่ง

ส่งผ่านการสั่นสะเทือน โดยมีจุดประสงค์ คือ หาโหมดการสั่นสะเทือนของแต่ละส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแห่ง เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์โหมดการสั่นสะเทือนที่ทดสอบได้จากการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการกระตุ้นขึ้นทดสอบในขั้นตอนการทดสอบเพื่อเลือกส่งผ่านการสั่นสะเทือน และนอกจากนั้นจะนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ทดสอบได้ในขั้นตอนการประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน โดยการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบจะแสดงในรูปที่ 4.32



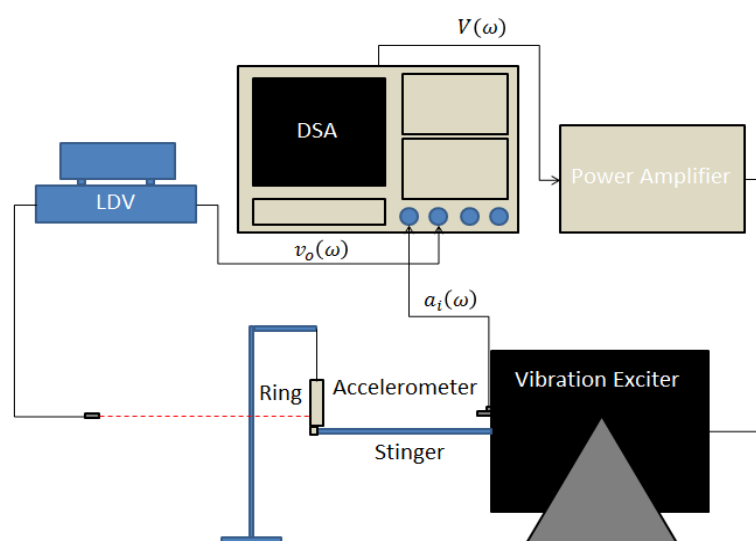
รูปที่ 4.32 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาโหมดการสั่นสะเทือนของแต่ละส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแห่ง

จากรูปที่ 4.32 เครื่อง DSA จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) ควบคุมแรงดันที่ส่งเข้าสู่เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและทำหน้าที่เป็นเครื่องแสดงผลสัญญาณที่วัดได้จาก Accelerometer และเครื่อง LDV โดย Accelerometer จะทำหน้าที่วัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่ปลายของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน และเครื่อง LDV จะทำหน้าที่วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นสัญญาณเอาท์พุทและสัญญาณอินพุทของการทดสอบตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ปลายของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนมีความขรุขระสูง การนำเครื่อง LDV มาใช้ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนจึงเป็นไปได้ยาก จึงใช้ Accelerometer ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนที่ปลายของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนและนำเครื่อง LDV มาใช้ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนแทน

ในการทดสอบเพื่อหาโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนจะเริ่มจากเครื่อง DSA จ่ายแรงดันในรูปแบบของสัญญาณ Sweep sine ที่ความถี่ตั้งแต่ 0 – 20 kHz เข้าสู่เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเพื่อทำให้ส่วนเคลื่อนที่เกิดการสั่นสะเทือน เครื่อง LDV ที่ทำหน้าที่วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่จะส่งสัญญาณกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อควบคุมขนาดของแรงดันที่จ่ายเข้าสู่เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนให้มีขนาดการสั่นสะเทือนที่คงที่ตลอดช่วง 0 – 20 kHz และนอกจากนั้นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่อง LDV และ Accelerometer จะถูกส่งกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแท่งอีกด้วย ซึ่งจากการทดสอบจะสังเกตได้ว่าขนาดความเร็วการสั่นสะเทือนของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ได้จากการควบคุมด้วยสัญญาณจากเครื่อง LDV จะมีการแกว่งมากกว่าการควบคุมด้วยสัญญาณจาก Accelerometer ซึ่งเป็นจุดด้อยของการทดสอบด้วยวิธีนี้

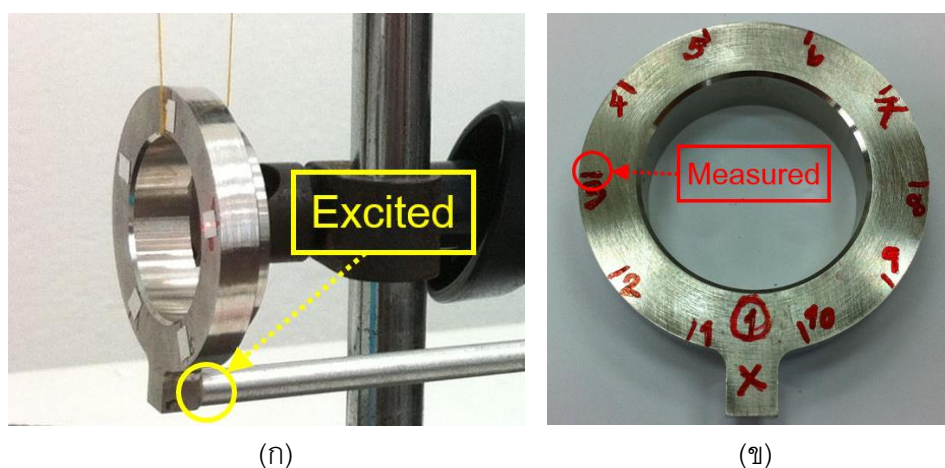
4.5.1.3 การทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน

หลังจากสามารถหาโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแท่งได้แล้ว จึงนำแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนทั้งหมดมาใช้ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเพื่อหาโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบ โดยเพื่อความสะดวกในการทดสอบ จะเลือกเพียงแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำมาใช้ในการทดสอบเท่านั้น ผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับโหมดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ โดยการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบจะแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 4.33 เครื่อง DSA จะทำหน้าที่เช่นเดียวกับการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแท่งส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนในหัวข้อย้อยที่ผ่านมา คือ ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณส่งเข้าสู่เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือน และทำหน้าที่แสดงผลของสัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่ที่วัดได้จาก Accelerometer และสัญญาณความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวชิ้นทดสอบที่วัดได้จากเครื่อง LDV ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของการทดสอบตามลำดับ โดยในการทดสอบจะใช้เครื่อง LDV วัดค่าการสั่นสะเทือนบนผิวรอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง แต่จุดที่ใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตามแนวแกนและจุดติด Accelerometer จะเป็นจุดเดิมตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 จุดที่กระตุ้นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV

(ก) จุดกระตุ้น (ข) จุดวัดค่าการสั่นสะเทือน

การทดสอบจะเริ่มจากเครื่อง DSA เริ่มจ่ายสัญญาณแรงดันแบบ Sweep sine ความถี่ตั้งแต่ 0 – 20 kHz เข้าสู่เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเพื่อเริ่มกระตุ้นชิ้นทดสอบ หลังจากนั้น Accelerometer ที่ติดอยู่บนส่วนเคลื่อนที่ที่วัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน แล้วส่งสัญญาณกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อควบคุมขนาดของการสั่นสะเทือนของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนให้คงที่ตลอดช่วงความถี่ นอกจากนั้นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จาก Accelerometer และเครื่อง LDV จะถูกส่งกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อแสดงผลตอบสนองของเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละจุด ซึ่งจะแตกต่างกันไปเมื่อเปลี่ยน

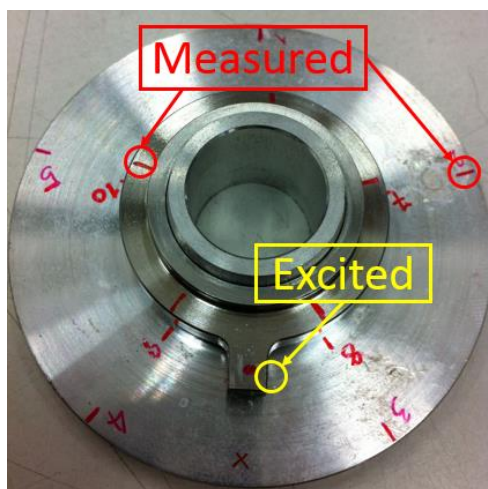
แห่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการส่งผ่านการสั่นสะเทือน ผลที่ได้เหล่านี้จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกันระหว่างแห่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแห่งเมื่อเทียบกับผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำที่ได้จากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะเพื่อเลือกแห่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมที่สุดต่อไป โดยจากการสังเกตพบว่าค่าความเร่งการสั่นสะเทือนของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ได้จากการควบคุมด้วยสัญญาณจาก Accelerometer จะมีการแกว่งของสัญญาณที่น้อยกว่าเมื่อควบคุมด้วยสัญญาณจากเครื่อง LDV ซึ่งเป็นจุดเด่นของการทดสอบนี้

โดยเมื่อลองนำแห่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนเหล็กเจียรขนาด 6 นิ้วมาใช้ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแบบจำลองวงแหวนขดลวดเหนียวนำชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการทดสอบกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำแต่ละชั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นในการทดสอบเพื่อเลือกแห่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำชั้นที่ 1 มาใช้ในการทดสอบเพียงชั้นเดียวได้ โดยผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 ที่ได้จากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและแห่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนเหล็กเจียรขนาด 6 นิ้วจะแสดงให้เห็นในส่วนของผลการทดสอบในบทต่อไป

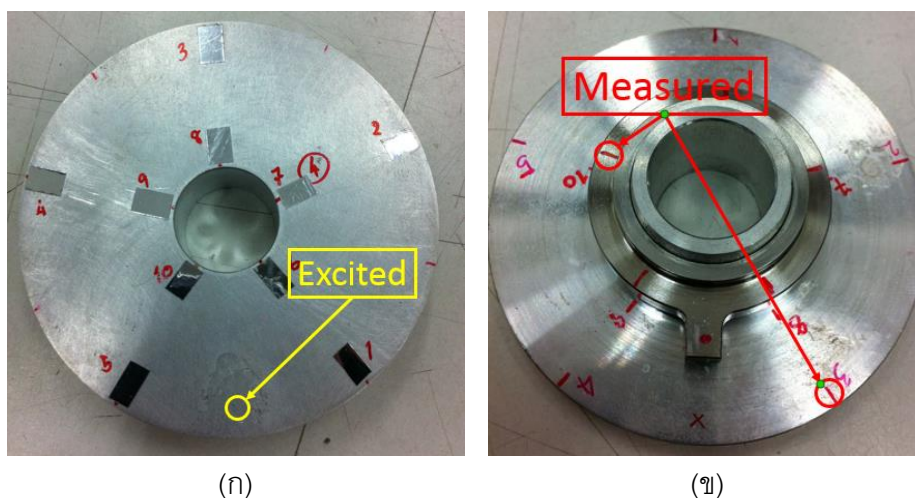
4.5.2 การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์

เมื่อสามารถเลือกแห่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมที่สุดได้จากขั้นตอนก่อนหน้านี้แล้ว จึงลองนำแห่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เลือกมาใช้ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชุด โดยมีจุดประสงค์เพื่อนำโหมดการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากการทดสอบในขั้นตอนนี้ไปเปรียบเทียบกับโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ที่บันทึกได้จากการทำการทดสอบด้วยค้อนเคาะ และนอกจากนั้นจะนำผลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลของโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ต่อสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยในส่วนของการวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือนด้วยหลักการ Statistical Energy Analysis

ในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะนำแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 มาใช้ในการทดสอบเพียงชุดเดียว และจะสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนตามจุดที่จะใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้น คือ กระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตามแนวสัมผัส และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ตามแนวแกน โดยการทดสอบทั้งสองส่วนจะนำเครื่อง LDV มาใช้ในการวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนบริเวณต่าง ๆ ได้แก่ บนผิวแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 5 จุด จุดละ 3 ครั้ง และบนผิวแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จำนวน 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง ดังแสดงในรูป 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ และ Accelerometer จะถูกติดอยู่บนส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเพื่อวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่กระตุ้นขึ้นทดสอบแล้วส่งกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อคอยควบคุมให้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมีการสั่นสะเทือนที่คงที่ตลอดช่วงความถี่ 0 – 20 kHz ซึ่งผลตอบสนองเชิงความถี่ที่บันทึกได้จะแสดงให้เห็นในส่วนของผลการทดสอบในบทต่อไป



รูปที่ 4.35 จุดที่กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและจุดที่ใช้เครื่อง LDV วัดค่าการสั่นสะเทือน



รูปที่ 4.36 การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน
 (ก) จุดกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (ข) จุดวัดค่าความเร็วการ
 สั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV

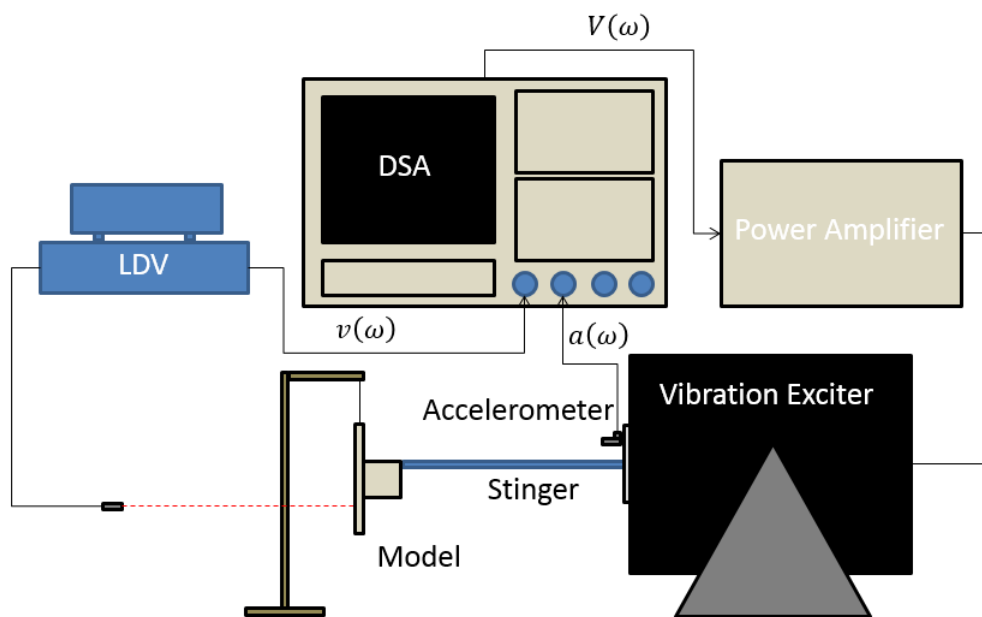
4.5.3 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบ

ในการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบจะมีหลักการเหมือนกับการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ ซึ่งเริ่มจากการแยกแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ออกเป็นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ แล้วนำมาทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงแยกทีละระบบ โดยจะสามารถแบ่งเนื้อหาในส่วนนี้ได้เป็นสองส่วน คือ ในส่วนของการทดสอบและการคำนวณ ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

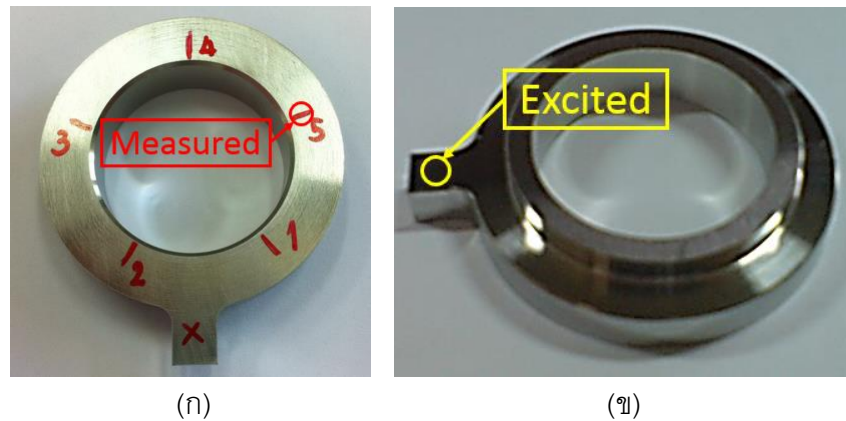
4.5.3.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง

ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 4.37 โดยเมื่อ DSA จ่ายสัญญาณแรงดันในรูป Sweep sine ในช่วงความถี่ 0 – 20 kHz ส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจะเคลื่อนที่และส่งแรงสั่นสะเทือนสู่ชิ้นทดสอบผ่านแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ปลายติดอยู่กับชิ้นทดสอบ ส่วน Accelerometer ที่ติดอยู่บนส่วนเคลื่อนที่จะทำหน้าที่วัดค่า

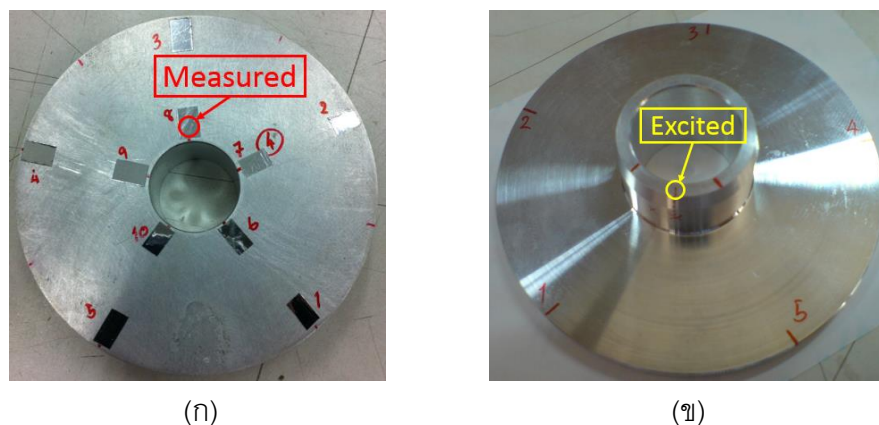
ความเร่งการสั่นสะเทือนแล้วส่งสัญญาณกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนให้กระตุ้นขึ้นทดสอบด้วยความเร่งการสั่นสะเทือนที่คงที่ ส่วนเครื่อง LDV จะคอยวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนรอบ ๆ ผิวขึ้นทดสอบแล้วส่งสัญญาณกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อแสดงผลการสั่นสะเทือนและนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงต่อไป โดยในการทดสอบ จุดที่จะใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปริงเดลิมาเตอร์ในทิศทางตามแนวแกน และจุดติด Accelerometer จะเป็นจุด ๆ เดิมตลอดการทดสอบ แต่จะใช้เครื่อง LDV ในการวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนรอบ ๆ ผิวขึ้นทดสอบจำนวน 5 จุด จุดละ 3 ครั้ง สำหรับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และ 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง สำหรับแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิมาเตอร์ ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของขึ้นทดสอบโดยการกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 4.38 จุดกระตุ้นและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ
(ก) จุดวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV (ข) จุดกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 4.39 จุดกระตุ้นและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์
(ก) จุดวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV (ข) จุดกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

4.5.3.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วง

หลังจากทำการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกับแบบจำลองแต่ละชิ้นเรียบร้อยแล้ว ค่าที่บันทึกได้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองแต่ละชิ้นได้จากสมการ (4-3) และ (4-4) และจะสามารถแบ่งการคำนวณที่สำคัญออกเป็นสองส่วน คือ การคำนวณหาค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละระบบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน และการคำนวณหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบ

ย่อยแต่ละระบบ โดยรายละเอียดในการคำนวณจะเหมือนกับในส่วนของ การกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ ในหัวข้อย่อยที่ผ่านมา แต่เนื่องจากวิธีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระตุ้นในขั้นตอนนี้เปลี่ยนไป ขั้นตอนที่ในการคำนวณหาค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยจึงเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยจากสมการ (4-5) ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังเฉลี่ยที่ใช้ในการกระตุ้น คือ

$$\bar{P}_i = \sum_{j=1}^n \frac{P_j}{n} \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (4-5)$$

และกำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละครั้ง (P_j) จะสามารถหาค่าได้จาก สมการ (4-6) ดังนี้

$$P_j = F_j \cdot v_j \quad (4-6)$$

ซึ่งจากสมการ (4-6) จะสามารถประมาณค่าของแรงและความเร็วการสั่นสะเทือน ที่เกิดจากการใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละระบบได้จากสมการ (4-21) และ (4-22) ตามลำดับ ดังนี้

$$F_j = m_i \cdot a_j \quad (4-21)$$

$$v_j = \frac{a_j}{\omega} \quad (4-22)$$

โดย m_i คือ มวลของระบบย่อย i ที่ถูกกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (kg)

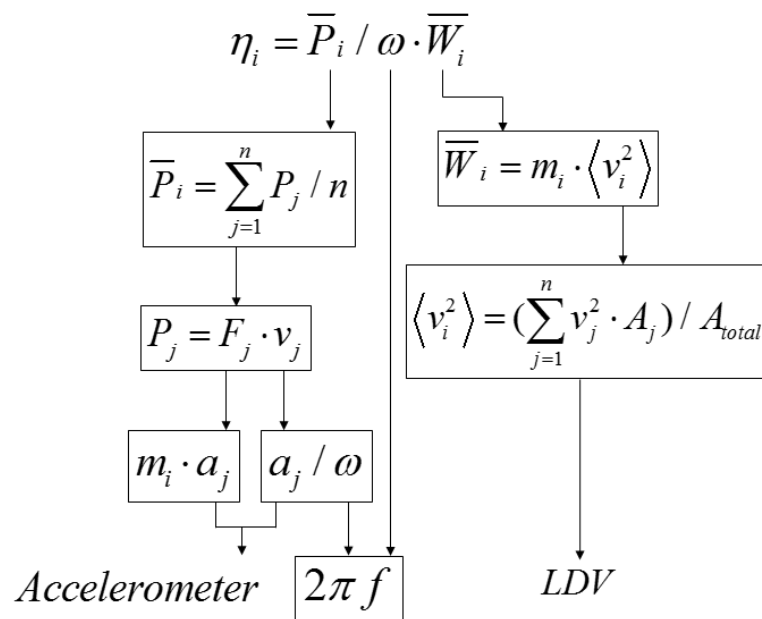
j คือ การกระตุ้นครั้งที่ j

a_j คือ ความเร่งการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (m/s^2)

โดยเมื่อแทนค่าจากสมการ (4-6), (4-21) และ (4-22) ลงในสมการ (4-5) แล้ว จะได้สมการ (4-23) ที่ใช้ในการคำนวณกำลังเฉลี่ยที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละระบบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเมื่อสามารถวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

$$\bar{P}_i = \frac{m_i}{\omega} \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_j^2}{n} \right) \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (4-23)$$

โดยเมื่อสามารถหาค่ากำลังเฉลี่ยที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลองแต่ละชิ้นด้วย เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนได้จากสมการ (4-5) และสามารถคำนวณหาค่าพลังงานการ สั่นสะเทือนของระบบย่อยแต่ละระบบได้จากสมการ (4-9) แล้วจะสามารถนำค่าต่าง ๆ เหล่านี้ไป ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละ ระบบได้จากสมการ (4-3) และ (4-4) ต่อไป โดยจะสามารถสรุปในส่วนของการคำนวณให้อยู่ในรูป ของแผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ตามรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของ ระบบย่อยแต่ละระบบสำหรับการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

4.5.4 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย

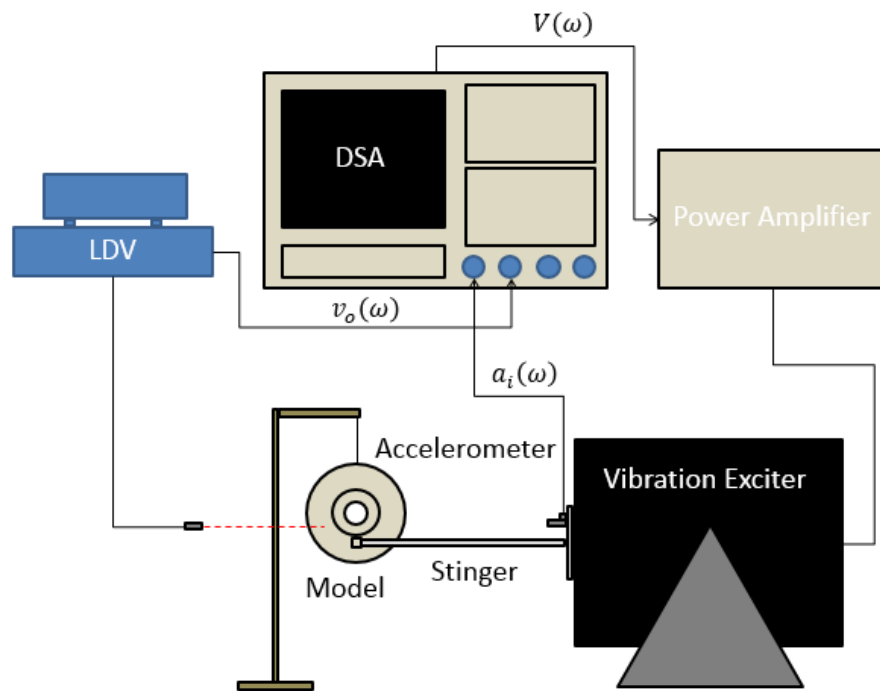
ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยโดยการ ใช้ เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้น จะสามารถแบ่งเนื้อหาออกได้เป็นสองส่วน คือ ในส่วน ของการทดสอบและการคำนวณ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.5.4.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย

ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของ แบบจำลองของสปริงเดลมอเตอร์แต่ละชุดโดยการ ใช้ เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นจะ ใช้วิธีการทดสอบแบบ Power Injection Method [10] เช่นเดียวกับขั้นตอนในการทดสอบด้วยค้อน

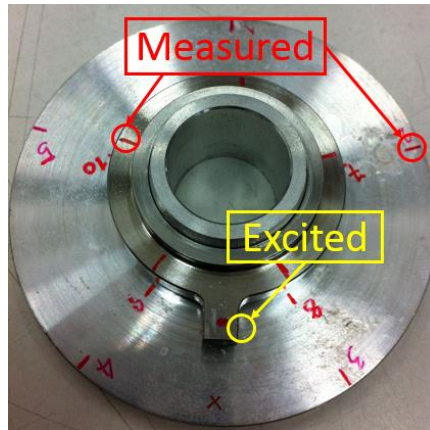
เคาะ และจะสามารถแบ่งขั้นตอนในการทดสอบออกเป็นสองขั้นตอนตามจุดที่จะใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นได้ ดังนี้

1. กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ



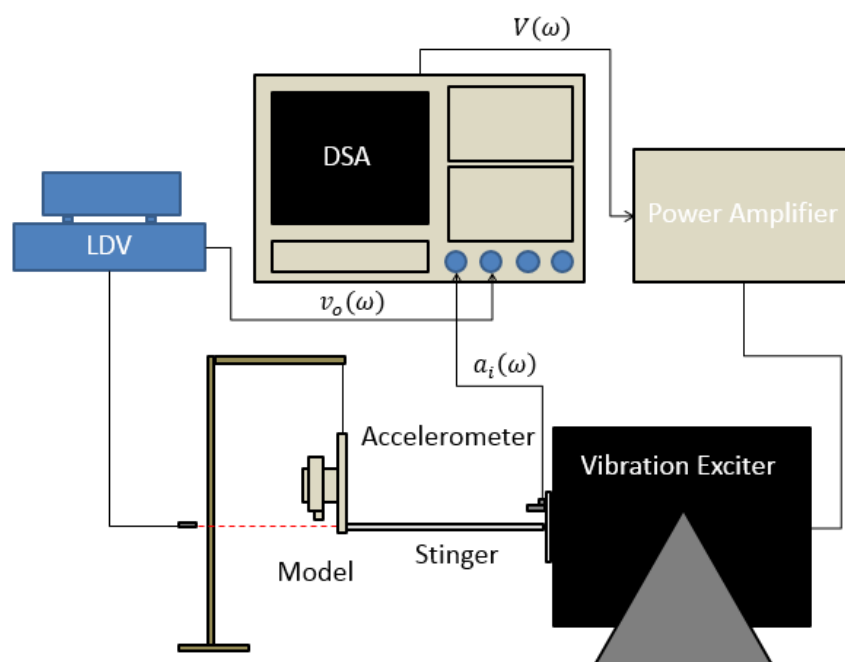
รูปที่ 4.41 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

การทดสอบในส่วนนี้จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 4.41 โดยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจะใช้ในการกระตุ้นขึ้นทดสอบบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตามแนวสัมผัส และ Accelerometer ที่ติดตั้งอยู่ที่ส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจะทำหน้าที่วัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่กระตุ้นแบบจำลอง แล้วส่งกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อคอยควบคุมการจ่ายแรงดันให้ความเร่งการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่มีค่าคงที่ ส่วนเครื่อง LDV จะทำหน้าที่วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวขึ้นทดสอบ ณ จุดต่างๆ บริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 5 จุด จุดละ 3 ครั้ง และบริเวณผิวแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จำนวน 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง โดยจุดที่ใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นและจุดติด Accelerometer จะเป็นจุดเดิมตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 จุดกระตุ้นและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

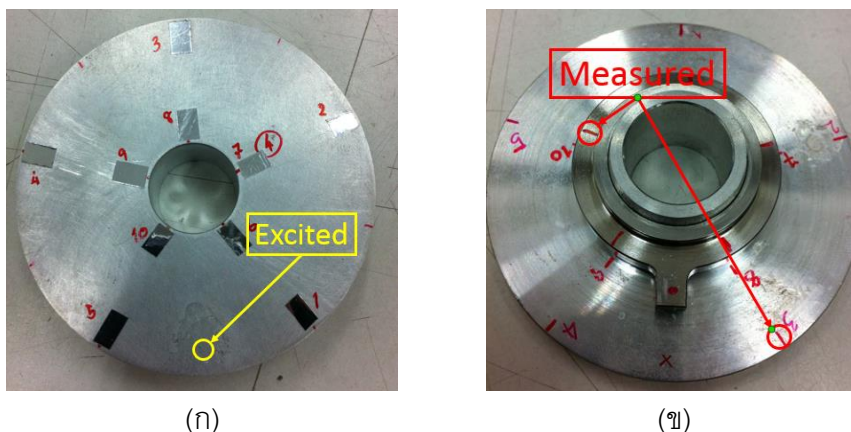
2. กระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์



รูปที่ 4.43 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

การทดสอบในขั้นตอนนี้ จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบตามรูปที่ 4.43 และ อุปกรณ์ทุกอย่างจะทำหน้าที่เหมือนกันกับขั้นตอนในการกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ เพียงแต่ในขั้นตอนนี้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจะถูกนำมาใช้ในการกระตุ้นขึ้น

ทดสอบบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในทิศทางตามแนวแกน โดยจุดที่ใช้ในการกระตุ้นนี้และจุดวัด Accelerometer จะเป็นจุดเดิมตลอดการทดสอบ และเครื่อง LDV จะใช้ในการวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 5 จุด จุดละ 3 ครั้ง และผิวแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จำนวน 10 จุด จุดละ 3 ครั้ง ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.44

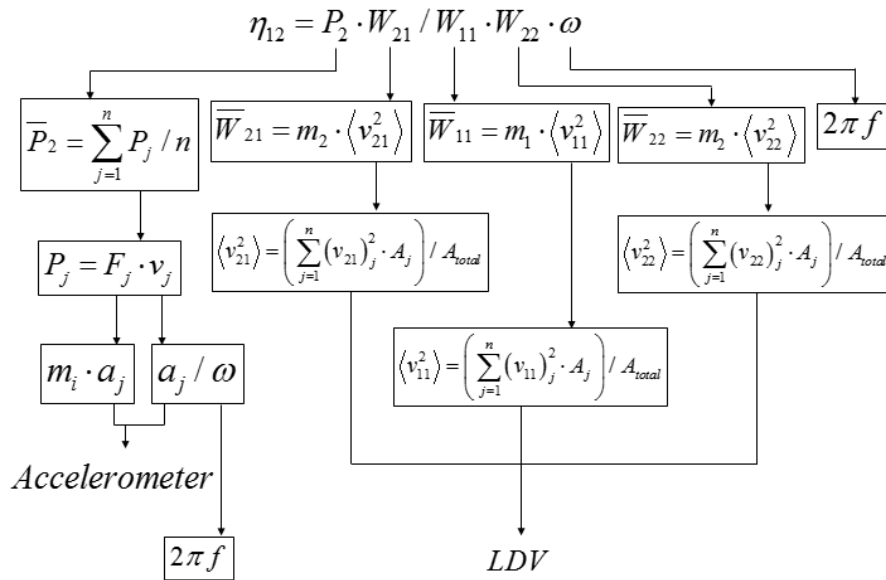


รูปที่ 4.44 จุดกระตุ้นและจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดสอบโดยการใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์
(ก) จุดกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (ข) จุดวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยเครื่อง LDV

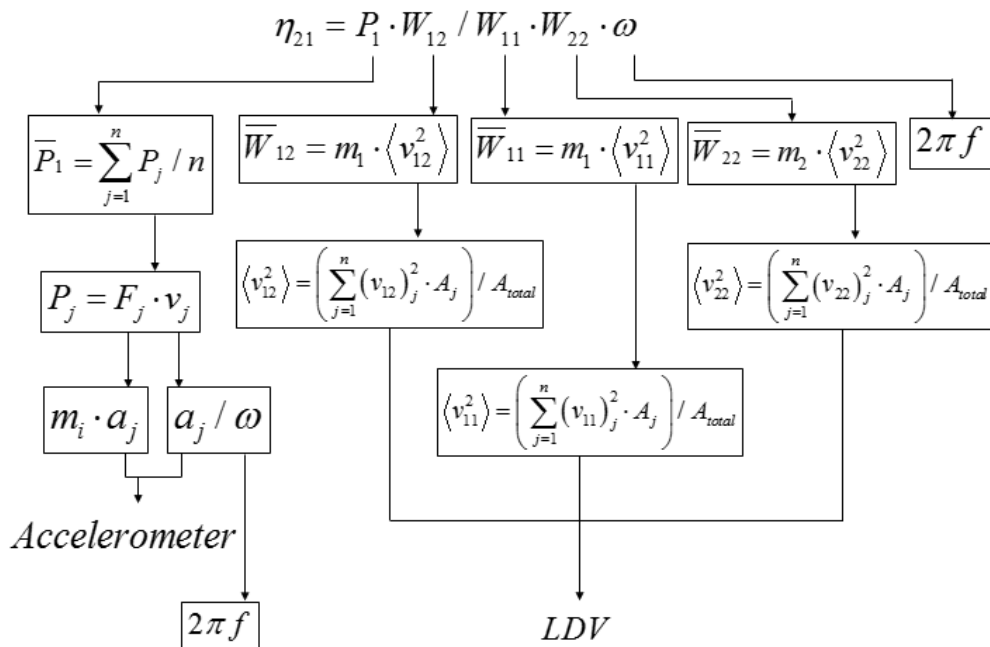
4.5.4.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย

เมื่อทำการทดสอบแบบ Power Injection Method [10] กับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละชุดเรียบร้อยแล้ว จะสามารถนำค่าการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้มาใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยได้จากสมการของ Lalor [10] คือ สมการ (4-14) และ (4-15) โดยจะมีขั้นตอนการคำนวณที่สำคัญสองส่วน ส่วนแรก คือ การคำนวณหาค่ากำลังที่ใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้น โดยเมื่อสามารถวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนของส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นแบบจำลองแต่ละส่วนได้แล้ว จะสามารถคำนวณหาค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบย่อยแต่ละระบบได้จากสมการ (4-23) และส่วนที่สอง คือ การคำนวณหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยแต่ละระบบ โดยเมื่อสามารถวัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวชิ้นทดสอบบริเวณต่าง ๆ ได้ จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยแต่ละระบบได้จากสมการ (4-16)

โดยจะสามารถสรุปในส่วนของการคำนวณให้อยู่ในรูปของแผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ตามรูปที่ 4.45 และ 4.46 ดังนี้



รูปที่ 4.45 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากระบบย่อย 1 ไปสู่ระบบย่อย 2 สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



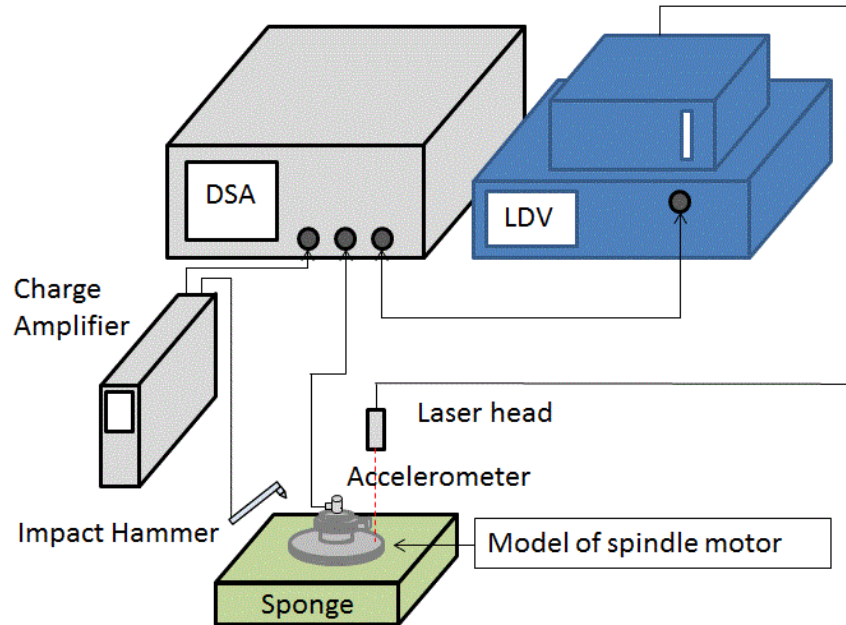
รูปที่ 4.46 แผนภาพสรุปขั้นตอนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากระบบย่อย 2 ไปสู่ระบบย่อย 1 สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

4.5.5 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวม

หลังจากสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยได้จากหัวข้อย่อยที่ผ่านมา ค่าดังกล่าวจะนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยการทดสอบในส่วนนี้จะเหมือนกับการทดสอบเพื่อหากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมโดยใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นในหัวข้อย่อยที่ผ่านมาทุกประการตามรูปที่ 4.25 คือ จะใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตามแนวสัมผัส และวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณผิวแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่อง LDV ซึ่งการทดสอบดังกล่าวจะเป็นการจำลองการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่มีสาเหตุมาจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยเมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยและสามารถคำนวณหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยแต่ละระบบเนื่องจากการกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนได้จากสมการ (4-16) แล้ว จะสามารถคำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้จากสมการ (4-20) โดยค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนนี้จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละชุดเพื่อศึกษาผลของค่า Interference fit ที่แตกต่างกันต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ต่อไป

4.6 การทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis

จากข้อดีประการหนึ่งของการนำหลักการ Statistical energy analysis มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือน คือ เมื่อสามารถหาค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ได้แก่ กำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบ (P_i), สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบ (Intrinsic loss factor, η_i) และค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย (Coupling loss factor, η_{ij}) แล้วจะสามารถประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบย่อยใดๆ ได้ เพราะฉะนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ยกข้อดีข้อนี้มาใช้ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis โดยการทดสอบในส่วนนี้จะนำแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1, 2 และ 3 มาใช้ในการทดสอบและจะสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนตามอุปกรณ์ที่นำมาใช้ทดสอบ ดังนี้

4.6.1 ค้อนเคาะ

รูปที่ 4.47 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis ด้วยค้อนเคาะ

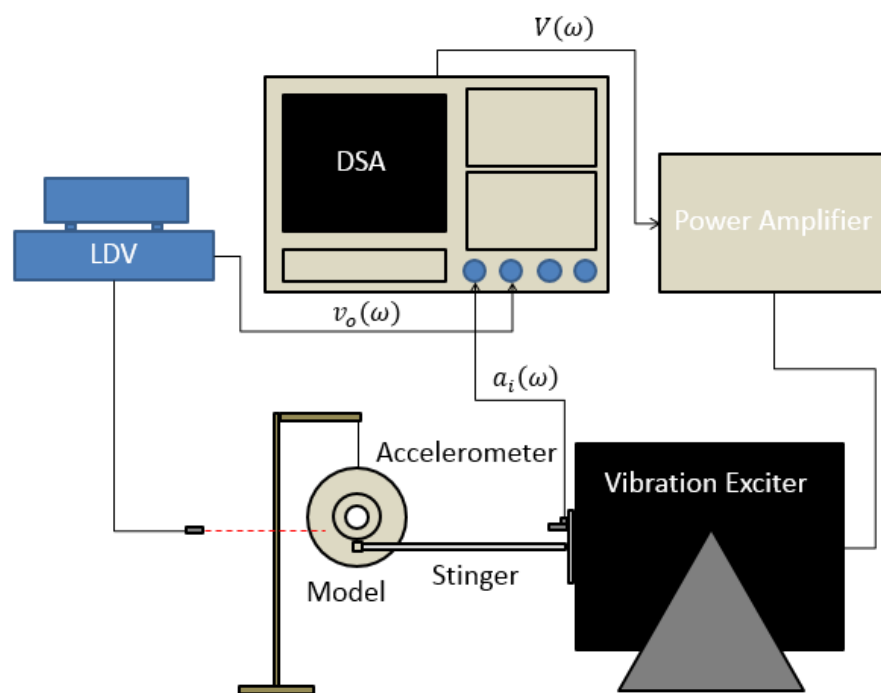
จากรูปที่ 4.47 จะใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตามแนวสัมผัส โดย Accelerometer ที่ติดอยู่ใกล้และในทิศทางเดียวกับการกระตุ้นจะวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลอง ส่วนเครื่อง LDV จะทำหน้าที่วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนที่ผิวของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จริงที่วัดได้ ($W_{21,measured}$) โดยค่าที่วัดได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่ประมาณค่าได้ ($W_{21,calculated}$) จากระบบสมการ (3-14) ตามหลักการของ Statistical energy analysis ดังต่อไปนี้

$$\omega \begin{pmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

หรือจะสามารถจัดรูประบบสมการ (3-14) ใหม่เพื่อความสะดวกในการคำนวณหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิทอมอเตอร์ได้ตามสมการ (4-24) ดังนี้

$$W_{21,calculated} = \frac{P_1 \eta_{12}}{\omega [(\eta_1 + \eta_{12})(\eta_2 + \eta_{21}) - \eta_{12} \eta_{21}]} \quad (4-24)$$

4.6.2 เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 4.48 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 4.48 จะใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นแบบจำลองของสปริงเดลิทอมอเตอร์บริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตามแนวสัมผัส และ Accelerometer จะคอยทำหน้าที่วัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนแล้วส่งกลับสู่เครื่อง DSA เพื่อคอยควบคุมแรงดันทำให้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนสั่นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือนคงที่ตลอดช่วงความถี่ 0 – 20 kHz โดยเนื่องจากสามารถกำหนดให้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนสั่นด้วยขนาดความเร่งเท่าใดก็ได้ตามต้องการ การทดสอบในส่วนนี้จึงจะกำหนดให้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนสั่นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือนประมาณ

175 mg และ 525 mg ซึ่งมีค่าเป็น 0.5 และ 1.5 เท่าของความเร่งการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลองในการทดสอบปกติ ส่วนเครื่อง LDV จะคอยทำหน้าที่วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนบนผิวของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิมาเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิมาเตอร์จริงที่วัดค่าได้ ($w_{21,measured}$) โดยค่าที่วัดได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิมาเตอร์ที่ประมาณค่าได้ ($w_{21,calculated}$) จากสมการ (4-24) ตามหลักการของ Statistical energy analysis

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะนำเสนอผลที่ได้จากการทดสอบตามแต่ละชั้นตอนที่ได้นำเสนอไปแล้ว ในบทที่ผ่านมา โดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะอยู่ในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งจะแสดงถึง โหมดการสั่นสะเทือนของจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนแต่ละจุดบนชิ้นทดสอบ แต่เนื่องจากผลการทดสอบในรูปของแผนภูมิมีจำนวนมากจึงจะแสดงให้เห็นโดยละเอียดในส่วนของภาคผนวก ค ต่อไป แต่จะสามารถสรุปโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นในรูปแบบตารางได้ โดยจะแบ่ง การแสดงผลออกได้เป็นสามส่วนตามชนิดของชิ้นทดสอบที่นำมากระตุ้นด้วยค้อนเคาะ ได้แก่ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ, แบบจำลองของฐานของสปริงเดียมอเตอร์ และ แบบจำลองของสปริงเดียมอเตอร์เมื่อประกอบส่วนประกอบทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน โดยจะมีผลการ ทดสอบ ดังนี้

5.1.1 แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

ในส่วนนี้จะสามารถแบ่งผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำได้ตามทิศทางที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น ดังนี้

5.1.1.1 กระตุ้นในทิศทางตามแนวแกน

ผลการทดสอบจะแสดงในรูปของโหมดการสั่นสะเทือนของแต่ละจุดวัดค่าการ สั่นสะเทือนทั้ง 10 จุดรอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ ในทิศทางตามแนวแกนและเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อใช้ค้อนเคาะ กระตุ้นในทิศทางตามแนวแกน

Point	Model	Frequency (Hz)								
1	1	48	9856	10720	11900	14640	15280	16370		
	5	48	8304	9280	9936	10000	13870	15280	15580	16270
2	1	48	9568	10420	11020	14740	15200	15840	16800	
	5	16	9648	10500	14590	15650	16100			
3	1	16	8000	9072	13150	15140				
	5	16	9744	11230	13940	15550	15820			
4	1	16	10260	10560	14960	16000				
	5	16	10640	14850	15970					
5	1	16	48	8656	9088	10400	13790	15230	15570	15950
	5	16	9168	9504	10540	14210	15840			
6	1	16	48	9408	10430	11070	14370	15820	16980	
	5	9200	9520	10530	14300	15900				
7	1	16	9888	10530	14370	15180	15550	15940		
	5	16	10110	10660	15040	16060				
8	1	16	48	9152	13460	15730				
	5	16	9360	10640	13520	15790				
9	1	48	8832	9232	10340	10720	14500	16370		
	5	48	9184	10140	10350	14340	15020	16270		
10	1	48	8880	9632	10530	11820	14480	15250	15580	
	5	48	9360	10300	10610	11730	14110	15540	16130	
Summary		0 – 100 Hz, 9 – 11 kHz, 14 – 17 kHz								

จากตารางที่ 5.1 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 และขึ้นที่ 5 เมื่อถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวแกน จะอยู่ในช่วง 0 – 100 Hz, 9 – 11 kHz และ 14 – 17 kHz และที่ความถี่ได้แก่ 16 Hz, 48 Hz, 9 kHz, 9.5 kHz, 10 kHz, 10.5 kHz, 12 kHz, 13.46 kHz, 14.5 kHz, 15.2 kHz, 15.5 kHz และ 15.8 kHz โดยโหมด

การสั่นสะเทือนที่อยู่ในช่วงความถี่ประมาณ 13.15 – 13.8 kHz และ 14.3 – 14.8 kHz จะมีขนาดที่สูงกว่าโหมดการสั่นสะเทือนในช่วงอื่นอย่างเห็นได้ชัด

5.1.1.2 กระตุ้นในทิศทางตามแนวสัมผัส

ผลการทดสอบจะแสดงในรูปของโหมดการสั่นสะเทือนของจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนทั้ง 10 จุดรอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวสัมผัสและเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชิ้นที่ 1 และชิ้นที่ 5 ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อใช้ค้อนเคาะกระตุ้นในทิศทางตามแนวสัมผัส

Point	Model	Frequency (Hz)								
1	1	16	9232	9616	9824	11100	14530	15410	17380	
	5	16	10030	11100	14720	15580	17150			
2	1	16	9760	9952	10510	11090	14830	15360	16980	17060
	5	10080	10960	14880	15390	16960				
3	1	16	9760	13950	15500	15700	16860			
	5	16	9472	13700	15420		16320			
4	1	16	14020	15090	15380	15600				
	5	16	10160	14720	15390	15700				
5	1	16	9488	10800	11500	14220	15710	17550		
	5	16	9360	10480	11220	14320	15730			
6	1	16	9024	10750	11140	14030	15330	15620	16880	
	5	16	9584	11380	14370	15630	15810	17420		
7	1	16	9904	10480	14770	15860	17140			
	5	16	10220	14750	15250	15820				
8	1	16	9824	13460	13660	15380	15760	16460		
	5	16	9616	10620	13280	15950				

ตารางที่ 5.2 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อใช้ค้อนเคาะ กระตุ้นในทิศทางตามแนวสัมผัส

Point	Model	Frequency (Hz)								
9	1	16	9824	10930	14720	15340	16240			
	5	16	9024	9808	11070	14740	15680	16610		
10	1	16	9552	10530	14530	15630	16020			
	5	16	8720	11140	13580	15250	15620			
Summary		0 – 100 Hz, 9 – 11 kHz, 14 - 17 kHz								

จากตารางที่ 5.2 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 และขึ้นที่ 5 เมื่อถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวสัมผัส จะอยู่ในช่วงความถี่ 0 – 100 Hz, 9 – 11 kHz และ 14 – 17 kHz โดยโหมดการสั่นสะเทือนที่อยู่ในช่วงความถี่ประมาณ 9.61 – 9.9 kHz, 11.1 kHz, 13.95 – 14.77 kHz และ 15.62 – 15.86 kHz จะมีขนาดที่สูงกว่าโหมดการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่อื่นอย่างชัดเจน

5.1.2 แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

ผลการทดสอบจะแสดงในรูปของโหมดการสั่นสะเทือนของจุดวัดค่าการสั่นสะเทือนทั้ง 20 จุดรอบแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวแกน และเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ขึ้นที่ 1 และขึ้นที่ 5 ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

Point	Model	Frequency (Hz)								
1	1	80	4000	6480	8016	12100	14930			
	5	16	96	4000	6416	7920	11860	14690		
2	1	16	96	3984	6480	8016	12020	14860		
	5	96	3984	6480	8064	11440	12210	14860		
3	1	16	96	3952	6416	7968	8976	9328	11870	14750
	5	16	96	3952	6944	8480	9200	9696	11310	14510

ตารางที่ 5.3 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเด็ลมอเตอร์

Point	Model	Frequency (Hz)								
4	1	16	96	3888	4336	6128	7376	8976	11340	14770
	5	16	96	3968	4320	6480	7904	9904	11380	14690
		15920								
5	1	16	96	3936	4336	6464	8096	9760	12350	14960
	5	16	96	3984	4336	6512	8048	9632	11500	12130
		14880	16830							
6	1	16	48	96	3968	6368	7808	9312	11730	14660
	5	16	96	3968	6352	6816	7696	9088	11520	14580
7	1	16	96	3968	4352	6432	8000	9552	12210	15010
	5	16	96	4000	4352	6512	8096	9680	11540	12320
		14980	16850							
8	1	16	112	3984	4336	6400	7904	9440	11410	12050
		14930								
	5	16	96	3984	4368	6544	8112	9776	11020	11470
		12380	14980	16580						
9	1	112	3984	6480	7984	11260	11940	14820		
	5	96	3984	6560	8144	9856	10940	12530	14960	16560
10	1	112	4000	6384	6960	7824	8608	11360	11780	14640
	5	16	96	4016	6592	8176	9984	11010	12740	15010
11	1	112	4416	6784	8864	10380	11500	12780	15470	
	5	16	96	4416	6736	11230	15420			
12	1	96	4384	6640	9040	11070	11390	15420		
	5	16	96	4416	4576	6800	10450	15490		
13	1	16	80	4400	6912	9104	11280	15410		
	5	16	80	4416	6784	8912	11140	11970	15390	

ตารางที่ 5.3 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

Point	Model	Frequency (Hz)								
14	1	16	96	4400	6720	8992	10880	11330	15440	
	5	16	96	4416	6784	8960	10340	11440	15460	
15	1	16	96	4400	6736	8992	10800	11340	15420	
	5	16	96	4416	6800	8960	10420	11940	12420	15460
16	1	16	96	4400	6784	9008	10610	11360	15420	
	5	16	96	4416	6800	8960	10420	12020	12350	15460
17	1	16	96	4400	6752	9072	11020	11460	15360	
	5	16	96	4400	6784	8976	10580	11360	15410	
18	1	16	96	4400	6752	9008	11010	11300	15390	
	5	16	96	4400	6784	8976	10420	11520	15410	
19	1	16	80	4400	6784	9040	10960	11330	15390	
	5	16	96	4416	6800	8960	10430	11730	12140	15460
20	1	16	96	4384	6752	11010	11360	15390		
	5	16	112	4416	6800	10460	11070	12430	15460	
Summary	0 – 100 Hz, 4 kHz, 4.4 kHz, 6.4 kHz, 6.8 kHz, 8 kHz, 9 kHz ,9 – 11 kHz, 12 – 13 kHz, 14.5 – 17kHz									

จากตารางที่ 5.3 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ขึ้นที่ 1 และขึ้นที่ 5 เมื่อขึ้นทดสอบถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวแกนจะอยู่ในช่วงความถี่ได้แก่ 0 – 100 Hz, 4000 Hz, 4400 Hz, 6400 Hz, 6800 Hz, 8000 Hz, 9000 Hz, 9 – 11 kHz, 12 – 13 kHz และ 14.5 – 17 kHz โดยโหมดการสั่นสะเทือนที่อยู่ในช่วงความถี่ประมาณ 4000 Hz, 4400 Hz, 6400 Hz, 6800 Hz, 8000 Hz และ 10.38 – 12.1 kHz จะมีขนาดที่สูงกว่าโหมดการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่อื่น และจะสังเกตได้ว่าโหมดการสั่นสะเทือนบางโหมดที่วัดได้จากผิวขอบในของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะเลื่อนไปจากโหมดการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากผิวขอบนอกของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ประมาณ 400 Hz

5.1.3 แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนตามจุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น คือ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยจะสามารถแสดงผลได้ดังนี้

5.1.3.1 กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

ผลการทดสอบจะแสดงในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ของจุดวัดการสั่นสะเทือนรอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 5 จุด และรอบแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ 10 จุด เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 ด้วยค้อนเคาะบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำตามแนวสัมผัส ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นในตาราง 5.4

ตารางที่ 5.4 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวสัมผัส

Measured	Point	Frequency (Hz)									
Ring	1	96	4990	5220	6750	8000		14400		17700	19800
	2	128		5470	6750			14400		17300	19800
	3	96		5630	6750			14400		17300	19800
	4	96		5600	6750			14400		17400	19800
	5	96	5220	5470	6750			14400		17300	19800
Base	1	96	4830		6750	7970	9220	14400	15500	17400	19700
	2	128	4860	5470	6750		9180	14400		17400	19700
	3	96	4860	5630	6750	7940	9220	14500	15500	17300	19700
	4	96	4860	5730	6750	7970	9220		15500	17400	19700
	5	96	4860		6750		9220		15500	17200	19700
	6	96	4860	5660	6780	8260	9180	14500		17400	19800
	7	128	4860		6780	8540	9220	14500		17500	19700
	8	96	4860		6750	8100		14400		17400	19700
	9	96	4860	5500	6780		9220	14400		17300	19700

ตารางที่ 5.4 โหมดการสั้นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวสัมผัส

Measured	Point	Frequency (Hz)									
Base	10	96	4860	5760	6780	7970	9220	14300		17400	19700
Summary		96 Hz, 4.86 kHz, 5.6 kHz, 6.75 kHz, 8 kHz, 9.22 kHz, 14.4 kHz, 15.5 kHz, 17.4 kHz, 19.7 kHz									

จากตารางที่ 5.4 โหมดการสั้นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวสัมผัส จะได้แก่ที่ความถี่ 96 Hz, 4860 Hz, 5600 Hz, 6750 Hz, 8000 Hz, 9220 Hz, 14400 Hz, 15500 Hz, 17400 Hz และ 19700 Hz โดยที่ความถี่ 4860 Hz, 6750 Hz และ 8000 Hz จะเป็นโหมดของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ส่วนที่ความถี่ 9220 Hz, 14400 Hz, 15500 Hz และ 17400 Hz จะเป็นโหมดของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และที่ความถี่ 96 Hz จะเป็นไปได้ทั้งโหมดการสั้นสะเทือนของแบบจำลองทั้งสองชิ้น ส่วนที่ความถี่ 5600 Hz และ 19700 Hz จะเป็นโหมดที่เกิดจากการประกอบสองส่วนเข้าด้วยกัน

5.1.3.2 กระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

ผลการทดสอบจะแสดงในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ของจุดวัดการสั้นสะเทือนรอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 5 จุด และรอบแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ 10 จุด เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 ด้วยค้อนเคาะบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ตามแนวแกน ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นในตาราง 5.5

ตารางที่ 5.5 โหมดการสั้นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวแกน

Measured	Point	Frequency (Hz)										
Ring	1	96	4190		5280	6340	6780			15600		18100
	2	96	4160	4640	5310	6370	6780	8220		15600	16400	18100
	3	96	4160	4640	5310	6340	6780	8320				18100

ตารางที่ 5.5 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นบริเวณ
แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวแกน

Measured	Point	Frequency (Hz)										
Ring	4	96	4290	4640	5310	6340	6780	8290		15600	16400	18100
	5	96	4190	4640	5310	6370	6780	8320		15600		
Base	1	96	4190	4640	5280	6340	6780			15600		
	2	96	4190	4640	5280	6050	6750	8800	14900	15600	16100	
	3	96	4190	4640		6340	6780			15600	16300	
	4	96	4260	4640	5280		6780	8260	15000		16300	
	5	96	4220	4640	5340	6050	6750	7200	8260	15600	16400	17100
	6	96	4320	4640	5240		6750	8450		15600	16400	
	7	96	4130	4640	5250	6300	6850	8060	14900	15600	16200	
	8	96	4190	4640	5250			8060		15600		
	9	96	4290	4640	5280	6270	6780	8220	15000	15600	16400	
	10	96	4260	4640	5280	6340	6820	8260	15000	15600	16400	
Summary		96 Hz, 4.19 kHz, 4.64 kHz, 5.28 kHz, 6.34 kHz, 6.75 kHz, 8.26 kHz, 15 kHz, 15.6 kHz, 16.4 kHz, 18.1 kHz										

จากตารางที่ 5.5 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อ
แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในทิศทางตามแนวแกน จะได้แก่
ที่ความถี่ 96 Hz, 4190 Hz, 4640 Hz, 5280 Hz, 6340 Hz, 6750 Hz, 8260 Hz, 15000 Hz, 15600
Hz, 16400 Hz และ 18100 Hz โดยที่ความถี่ 4190 Hz, 4640 Hz, 6340 Hz, 6750 Hz และ 8260
Hz จะเป็นโหมดของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ส่วนที่ความถี่ 15000 Hz, 15600
Hz และ 16400 Hz จะเป็นโหมดของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และที่ความถี่ 96
Hz จะเป็นที่ความถี่ที่โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองทั้งสองชิ้น ส่วนที่ความถี่ 5280 Hz และ
18100 Hz จะเป็นโหมดที่เกิดจากการประกอบชิ้นส่วนทั้งสองเข้าด้วยกัน

จากผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของสปิน
เดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะนั้น จะสามารถสรุปการสังเกตได้ดังต่อไปนี้

1. โหมดการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากแบบจำลองของสปริงเดิลมอเตอร์ ณ จุดต่าง ๆ จะเกิดจากการผสมกันของโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียว และโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์ โดยแต่ละโหมดจะมีการเลื่อนไปจากตำแหน่งปกติเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการประกอบเข้าด้วยกันของส่วนประกอบทั้งสองส่วน

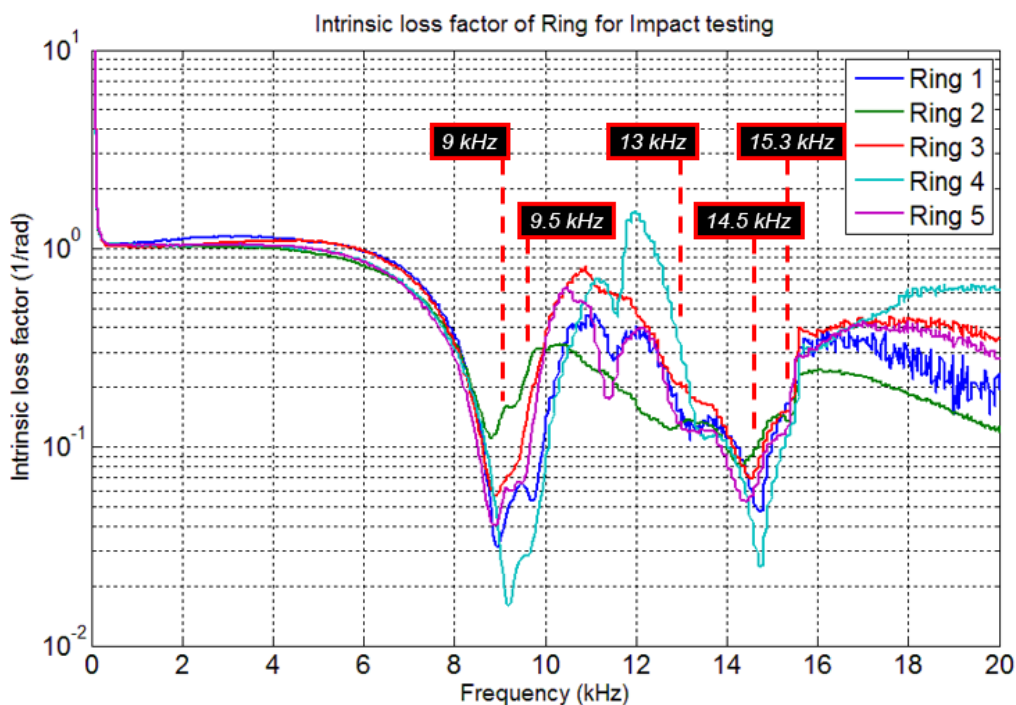
2. โหมดการสั่นสะเทือนบางโหมดที่บันทึกได้จากแบบจำลองของสปริงเดิลมอเตอร์ ณ จุดต่าง ๆ จะเกิดจากการประกอบเข้าด้วยกันของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวและฐานของสปริงเดิลมอเตอร์ เช่น โหมดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ประมาณ 5280 Hz, 18100 Hz และ 19700 Hz เป็นต้น

3. การกระตุ้นแบบจำลองของสปริงเดิลมอเตอร์ ณ จุดที่แตกต่างกัน จะทำให้โหมดการสั่นสะเทือนบางโหมดหายไป เช่น การกระตุ้นที่แบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์ จะทำให้โหมดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ประมาณ 9.2 kHz ซึ่งเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวหายไป เป็นต้น

5.2 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบด้วยค้อนเคาะ

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนตามการแบ่งระบบที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวและฐานของสปริงเดิลมอเตอร์ และมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

5.2.1 แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

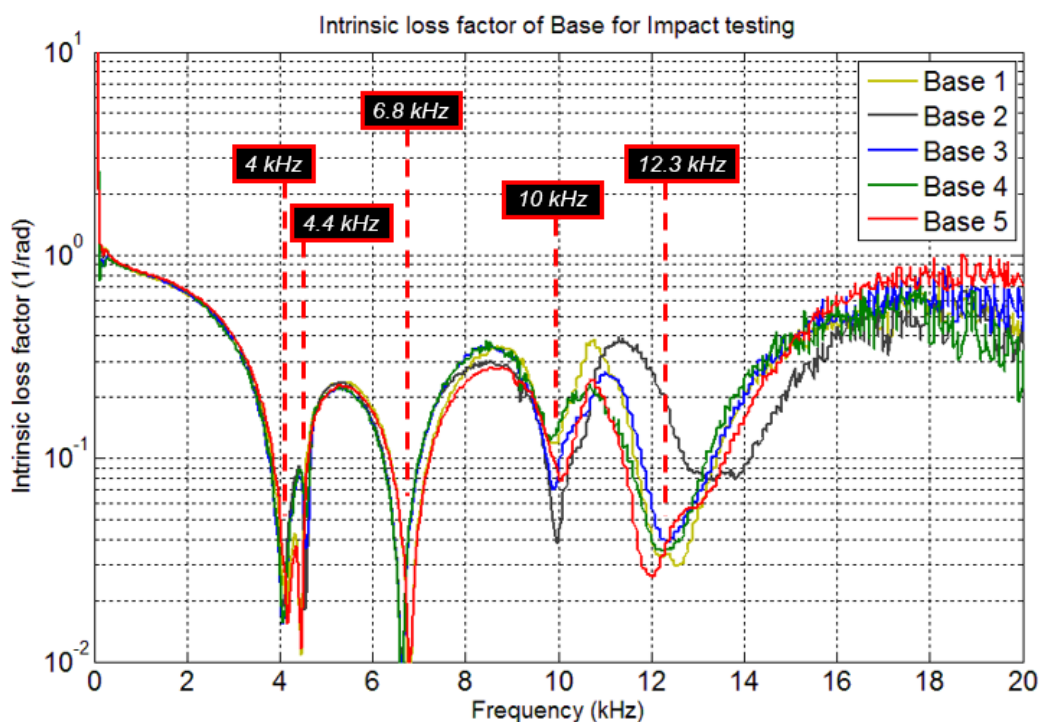


รูปที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 5 ชั้นจากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ

จากรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ จะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ 9 kHz, 9.5 kHz, 13 kHz, 14.5 kHz และ 15.3 kHz ซึ่งเป็นค่าความถี่ธรรมชาติหรือโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงจะมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงกับค่าพลังงานการสั่นสะเทือนสะสมภายในของชิ้นทดสอบซึ่งแปรผกผันกัน โดยเมื่อความถี่การสั่นสะเทือนตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบจะทำให้พลังงานการสั่นสะเทือนสะสมภายในที่ความถี่นั้นมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่ความถี่นั้นมีค่าต่ำลง และจากรูปที่ 5.1 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่คำนวณได้จากการทดสอบโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะจะมีค่าไม่คงที่เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละชั้นทั้งที่แบบจำลองแต่ละชั้นผลิตจากวัสดุเดียวกันและขนาดเท่ากัน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะในแต่ละรอบนั้นมีค่าไม่คงที่ซึ่งควบคุมได้ยาก และอาจจะเป็นผล

เนื่องมาจากการเกิดขึ้นแบบสุ่มของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแต่ละรอบ โดยถึงแม้ว่าจะทำการทดสอบหลายรอบแล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนในการคำนวณในขั้นต่อไปก็อาจจะยังเกิดค่าความคลาดเคลื่อนกันระหว่างการทดสอบแต่ละรอบได้

5.2.2 แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์



รูปที่ 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชิ้นจากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ

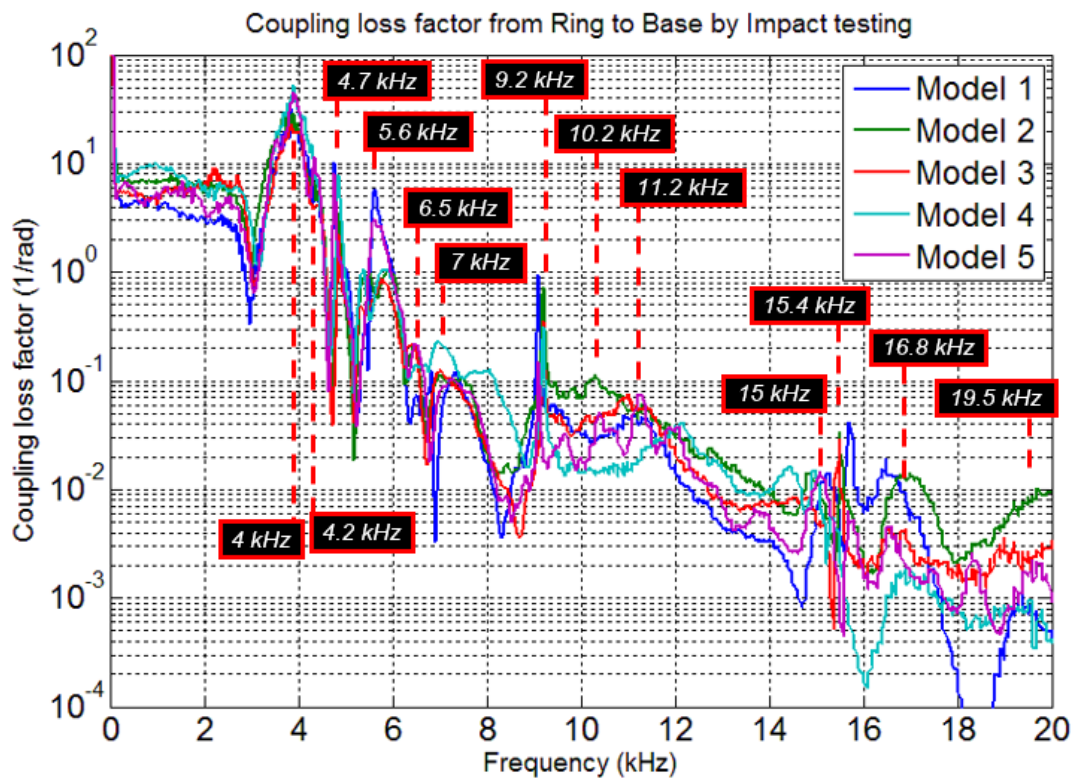
จากรูปที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ จะสังเกตได้ว่าที่ความถี่ 4 kHz, 4.4 kHz, 6.8 kHz, 10 kHz และ 12.3 kHz ซึ่งเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงต่ำลง ซึ่งเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงและค่าพลังงานการสั่นสะเทือนสะสมภายในของชิ้นทดสอบซึ่งแปรผกผันกันเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ โดยจากรูปที่ 5.2 จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่ได้จากการทำการทดสอบกับแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะมีค่าค่อนข้างคงที่มากกว่าแบบจำลองของ

วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่คำนวณได้จากการทดสอบจะยังคงมีการแกว่งอยู่พอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจากสาเหตุของการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นขึ้นทดสอบและการเกิดขึ้นแบบสุ่มของสัญญาณการสั่นสะเทือนเช่นเดียวกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

5.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ และค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

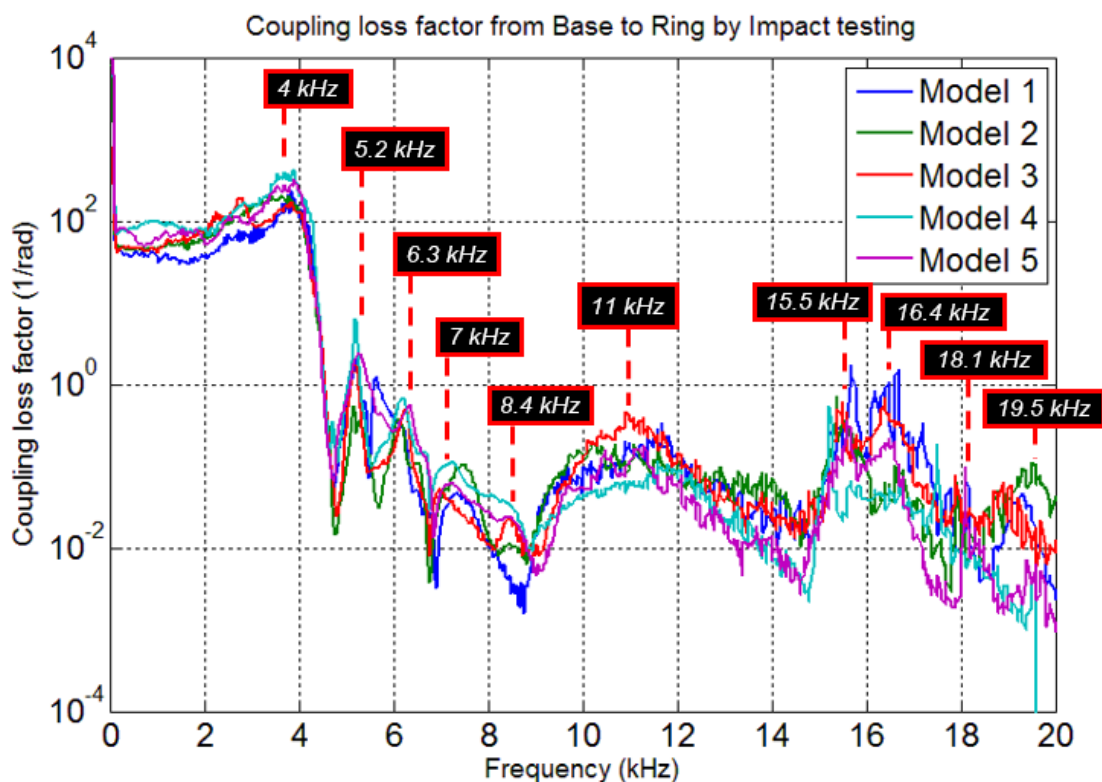
5.3.1 สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์



รูปที่ 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์จากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ

จากรูปที่ 5.3 จะสังเกตได้ว่าที่ความถี่ 4000 Hz, 4200 Hz, 4700 Hz, 5600 Hz, 6500 Hz, 7000 Hz, 9200 Hz, 10200 Hz, 11200 Hz, 15000 Hz, 15400 Hz, 16800 Hz และ 19500 Hz จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ที่สูงกว่าที่ความถี่อื่น ๆ โดยที่ความถี่ดังกล่าวจะตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปีนเดิลมอเตอร์ที่ได้แสดงไปแล้วในหัวข้อย่อยที่ผ่านมา โดยโหมดที่ความถี่ 4000 Hz, 4200 Hz, 4700 Hz, 6500 Hz, 7000 Hz และ 10200 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ ส่วนโหมดที่ความถี่ 9200 Hz, 11200 Hz, 15000 Hz, 15400 Hz และ 16800 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนที่ความถี่ 5600 Hz และ 19500 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการประกอบกันของชิ้นส่วนทั้งสอง เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่ตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบจะมีค่าที่สูงกว่าที่ความถี่อื่น ซึ่งมีความเป็นไปได้สูง เพราะพลังงานการสั่นสะเทือนบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย โดยเมื่อความถี่การสั่นสะเทือนตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบจะยิ่งทำให้พลังงานการสั่นสะเทือนมีค่าสูง ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยมีค่าสูงขึ้นตามมานอกจากนั้นจากรูปที่ 5.3 จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่ได้จากการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะจะมีค่าไม่เท่ากันระหว่างชิ้นทดสอบทั้งห้าชิ้น โดยยิ่งความถี่มีค่าสูงขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่คำนวณได้จะยิ่งสูงขึ้นตาม ซึ่งเป็นข้อดีของการกระตุ้นชิ้นทดสอบด้วยค้อนเคาะที่ยากต่อการควบคุมแรงในการกระตุ้นแต่ละครั้งและที่ความถี่แต่ละความถี่นั่นเอง

5.3.2 สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

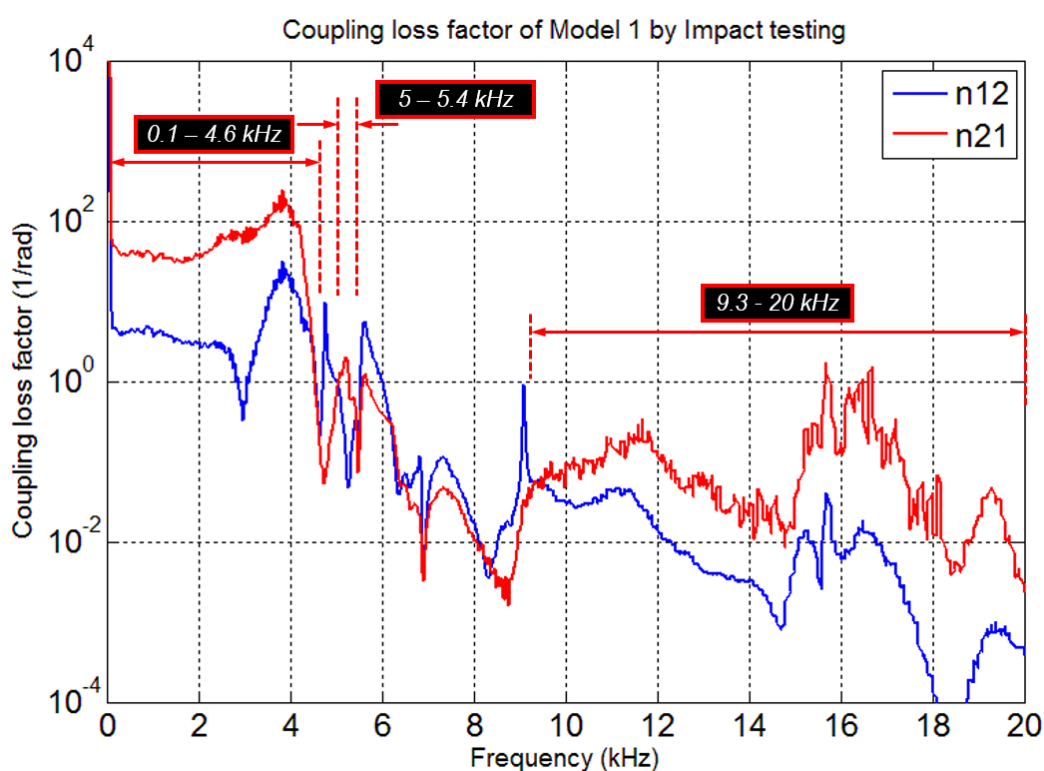


รูปที่ 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจากการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบ

จากรูปที่ 5.4 จะสังเกตได้ว่าที่ความถี่ 4000 Hz, 5200 Hz, 6300 Hz, 7000 Hz, 8400 Hz, 11000 Hz, 15500 Hz, 16400 Hz, 18100 Hz และ 19500 Hz จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำที่สูงกว่าที่ความถี่อื่น ๆ โดยที่ความถี่ดังกล่าวจะตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ที่ได้แสดงไปแล้วในหัวข้อย่อยที่ผ่านมา โดยโหมดที่ความถี่ 4000 Hz, 6300 Hz, 7000 Hz และ 8400 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ส่วนโหมดที่ความถี่ 11000 Hz, 15500 Hz และ 16800 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนที่ความถี่ 5200 Hz, 18100 Hz และ 19500 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการประกอบกันของชิ้นส่วนทั้งสอง เพราะฉะนั้นจะสามารถสรุปได้เหมือนกับผลในส่วนของการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิล

มอดเตอร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่ตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบจะมีค่าที่สูงกว่าที่ความถี่อื่น โดยมีเหตุผลเดียวกัน และจากรูปที่ 5.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าการนำค้อนเคาะมาใช้ในการกระตุ้นชิ้นทดสอบจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่คำนวณได้จะมีค่าคลาดเคลื่อนไม่ตรงกันเมื่อเทียบกับระหว่างแบบจำลองทั้งห้าชุด โดยยิ่งค่าความถี่การสั่นสะเทือนมีค่าสูงขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนจะยิ่งมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นข้อด้อยของการนำค้อนเคาะมาใช้ในการกระตุ้นนั่นเอง

โดยเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์และสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 มาลองเปรียบเทียบภายในแผนภูมิเดียวกันจะเป็นไปตามรูปที่ 5.5



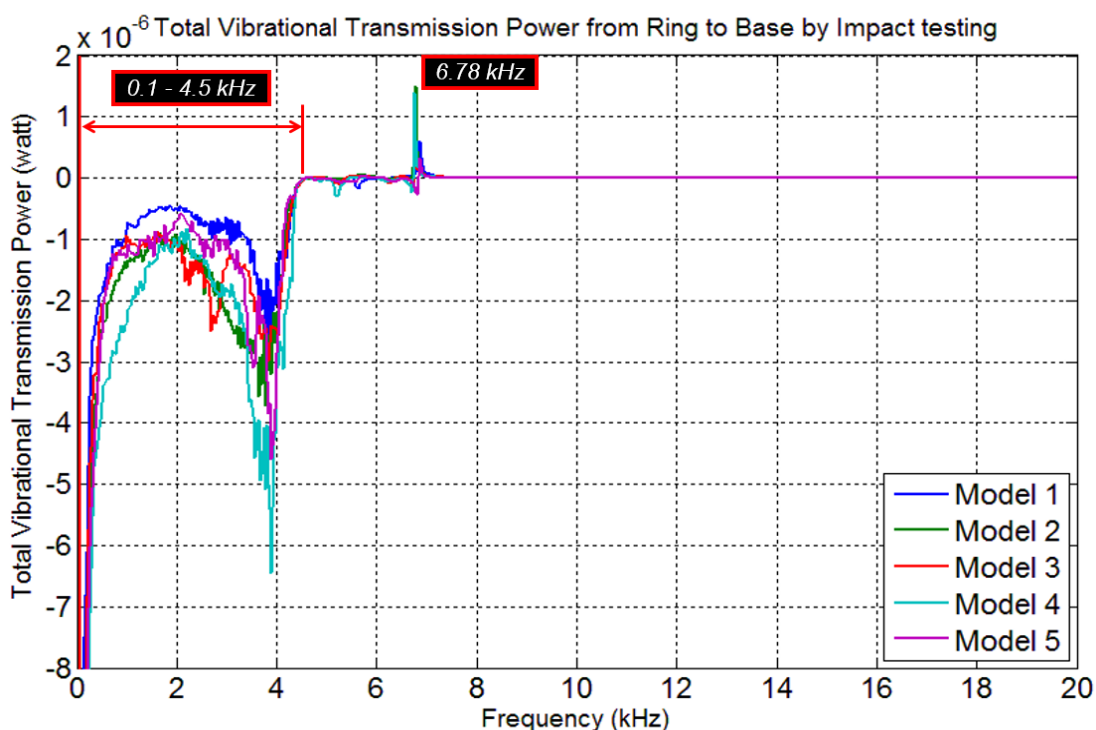
รูปที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะ

จากรูปที่ 5.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ 100 Hz – 4.6 kHz, 5 – 5.4 kHz และ 9.3 – 20 kHz ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบ

ย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งหมายความว่า ในช่วงความถี่ดังกล่าวพลังงานการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำได้ดีกว่า โดยในช่วงความถี่อื่น ๆ นอกจากที่ได้กล่าวไปข้างต้น จะมีผลที่ตรงข้ามกัน คือ พลังงานการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้ดีกว่านั่นเอง ซึ่งถือเป็นประโยชน์อีกประการหนึ่งจากการประยุกต์ใช้หลักการ Statistical energy analysis ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ผ่านมา ๆ มา คือ ทำให้ทราบถึงทิศทางการส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนของระบบที่นำมาวิเคราะห์ในเบื้องต้นได้

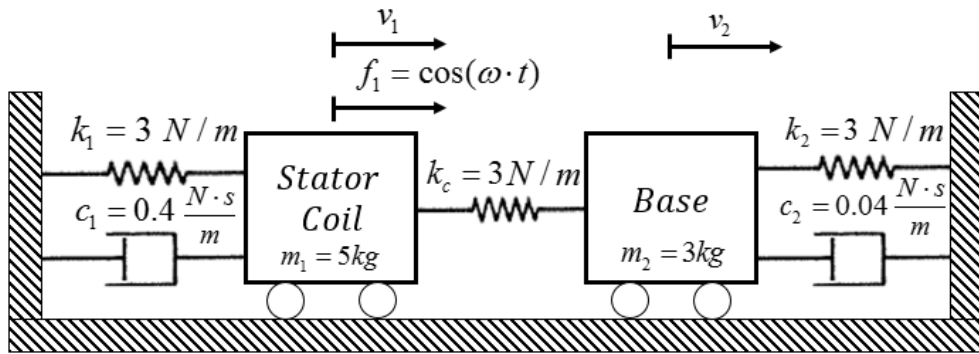
5.4 ผลการทดสอบหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ

ผลของค่ากำลังการสั่นสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อทดสอบด้วยค้อนเคาะจะอยู่ในรูปของแผนภูมิเทียบกับความถี่ตั้งแต่ 0 – 20 kHz ซึ่งจะเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.6

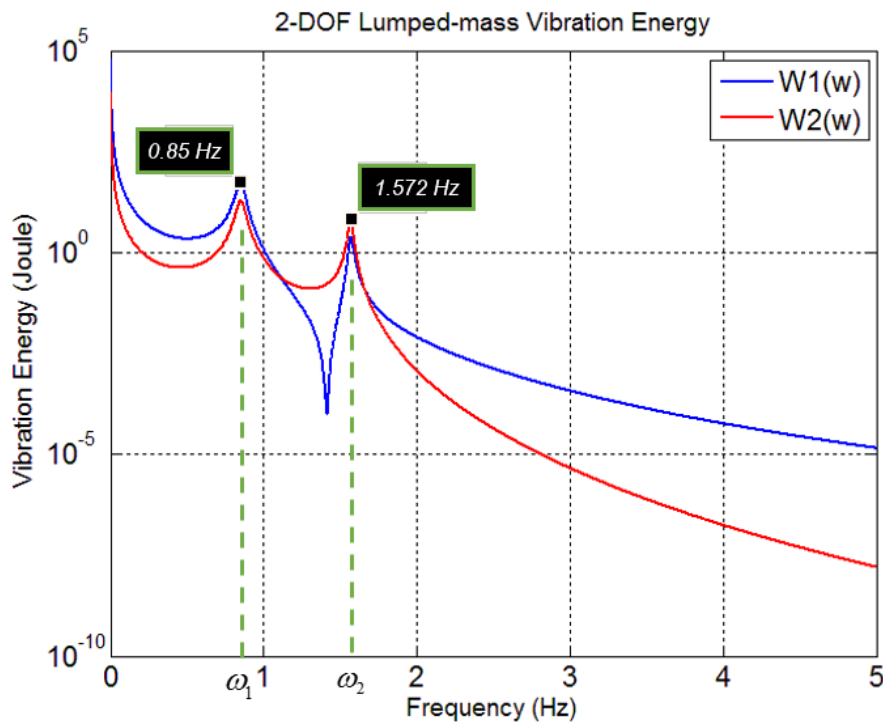


รูปที่ 5.6 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการทดสอบด้วยค้อนเคาะ

จากรูปที่ 5.6 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะเป็นไปได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยถ้าค่าเป็นบวกแสดงว่ากำลังการสั่นสะเทือนจะมีทิศทางส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ และถ้าค่าเป็นลบแสดงว่ากำลังการสั่นสะเทือนจะมีทิศทางส่งผ่านจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และจะสังเกตได้ว่าที่ความถี่ต่ำ คือ ที่ความถี่ตั้งแต่ 0 – 4.5 kHz กำลังการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในปริมาณที่สูงกว่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่อื่นอย่างชัดเจน โดยเป็นผลเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ ได้แก่ ประการแรก คือ ในช่วงความถี่ดังกล่าว ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์อยู่หลายเท่าตามรูปที่ 5.5 ประการที่สอง คือ การกระตุ้นด้วยค้อนเคาะที่ความถี่ต่ำ จะมีพลังงานการสั่นสะเทือนที่สูงและจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น และประการสุดท้าย คือ เนื่องจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันจะมีมวลและค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ดังกล่าวที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่ผลิตจากอะลูมิเนียมและมีลักษณะเป็นแผ่นจานบาง โดยเมื่อแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกกระตุ้นจากแรงภายนอกจะส่งผลทำให้พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์มีค่าสูงกว่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และจะสามารถจำลองการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ในรูปแบบของแบบจำลองมวลรวมแบบก้อนที่มีการเคลื่อนที่สององศาอิสระเพื่อศึกษาผลของค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองแต่ละชิ้นได้ดังรูปที่ 5.7 โดยตัวหน่วงการสั่นสะเทือน (Damper) จะแทนการหน่วงการสั่นสะเทือนเนื่องจากโครงสร้างภายในของแบบจำลองแต่ละระบบ และสปริงจะแทนการเชื่อมต่อระหว่างแบบจำลองสองชิ้นเข้าด้วยกัน และสมมติให้มวลก้อนแรกมีมวลและค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนที่สูงกว่ามวลก้อนที่สอง โดยผลของค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของมวลแต่ละก้อนเมื่อมวลก้อนแรกถูกกระตุ้นจากแรงภายนอก จะแสดงในรูปที่ 5.8 โดยที่ความถี่การสั่นสะเทือน 0.85 Hz และ 1.572 Hz จะเป็นความถี่ธรรมชาติของระบบรวม



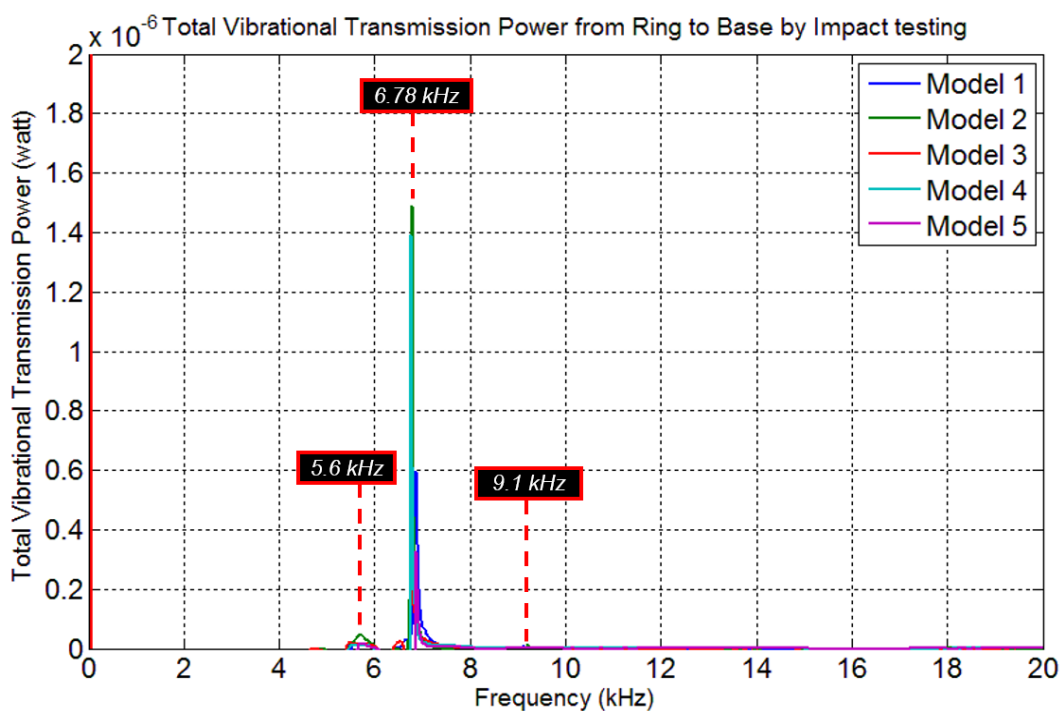
รูปที่ 5.7 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปริงเดลมอเตอร์ในรูปแบบของแบบจำลองมวลรวมแบบก่อนที่มีการเคลื่อนที่สององศาอิสระ



รูปที่ 5.8 พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปริงเดลมอเตอร์ในรูปแบบของแบบจำลองมวลรวมแบบก่อนที่มีการเคลื่อนที่สององศาอิสระ

จากรูปที่ 5.8 จะสังเกตเห็นได้ว่าพลังงานการสั่นสะเทือนของมวลก่อนที่สองที่มีความถี่ 1.572 Hz จะมีค่าสูงกว่ามวลก่อนแรกอย่างเห็นได้ชัด จึงสามารถสรุปได้ว่า ถึงแม้แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะถูกกระตุ้นเพียงขึ้นเดียว แต่มีโอกาสที่แบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์จะมีค่าพลังงานการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำได้

โดยจากสาเหตุทั้งสามประการดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นจะส่งผลทำให้กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมที่คำนวณได้จากสมการ (4-20) มีค่าเป็นลบสูงมากตามรูปที่ 5.6 นั่นเอง



รูปที่ 5.9 ค่าบวกของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการทดสอบด้วยค้อนเคาะ

จากรูปที่ 5.6 เมื่อนำค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมเฉพาะที่มีค่าเป็นบวกดังรูปที่ 5.9 มาลองพิจารณาถึงสาเหตุสำคัญที่ส่งผลทำให้ค่ากำลังการสั่นสะเทือนรวมมีทิศทางส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์แล้ว จะสังเกตเห็นว่าที่ความถี่ประมาณ 5.6, 6.78 และ 9.1 kHz ค่ากำลังการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในปริมาณสูงอย่างชัดเจน ทั้งนี้จะมาจากสาเหตุหลายประการ ได้แก่ ความถี่ดังกล่าวจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำอยู่หลายเท่าดังรูปที่ 5.5 และสาเหตุอีกประการหนึ่ง คือ ที่ความถี่ดังกล่าวจะตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นที่แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำดังแสดงในตารางที่ 5.4 จากสาเหตุสองประการนี้จึงส่งผลทำให้ที่ความถี่ดังกล่าวค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่

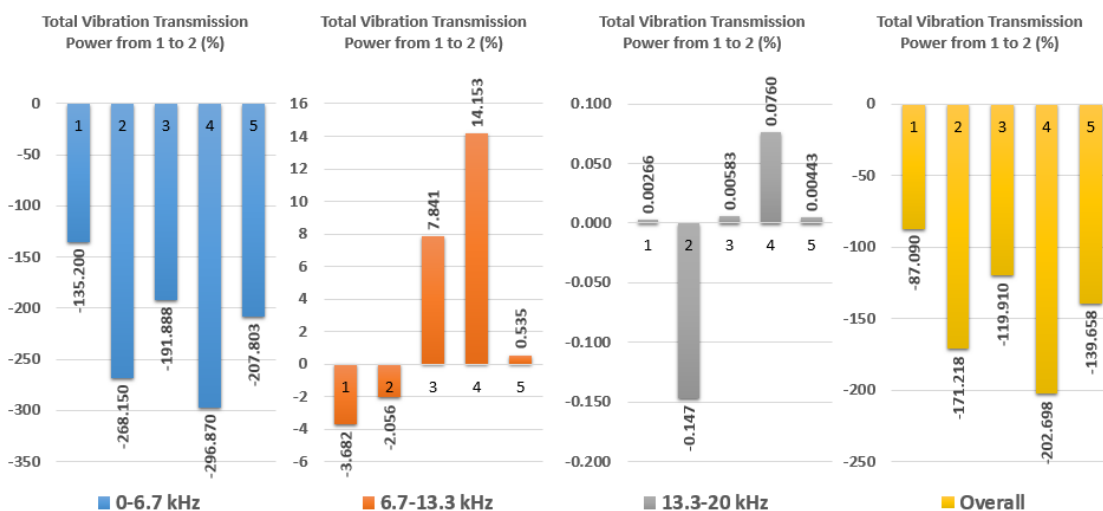
ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จากสมการ (4-20) จะมีค่าบวกสูงกว่าที่ความถี่อื่น ๆ นั้นเอง เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยและโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์จะส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง ซึ่งเป็นจริงตามสมการ (4-20) ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยจากรูปที่ 5.6 จะสามารถสรุปปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ตลอดช่วงความถี่ 0 – 20 kHz ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการทดสอบด้วยค้อนเคาะได้ตามตารางที่ 5.6 ดังนี้

ตารางที่ 5.6 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในการทดสอบด้วยค้อนเคาะ

Model		Frequency (kHz)			Overall
		0 – 6.7	6.7 – 13.3	13.3 - 20	
1	P_{1to2} (μ W)	-176.048	-0.652	0.00146	-176.699
	P_1 (μ W)	130.213	17.709	54.97100	202.893
	P_{1to2}/P_1 (%)	-135.200	-3.682	0.00266	-87.090
2	P_{1to2} (μ W)	-361.592	-0.356	-0.08700	-362.035
	P_1 (μ W)	134.847	17.312	59.28800	211.447
	P_{1to2}/P_1 (%)	-268.150	-2.056	-0.147	-171.218
3	P_{1to2} (μ W)	-251.770	1.569	0.00335	-250.198
	P_1 (μ W)	131.207	20.009	57.43800	208.654
	P_{1to2}/P_1 (%)	-191.888	7.841	0.00583	-119.910
4	P_{1to2} (μ W)	-384.001	2.603	0.03070	-381.367
	P_1 (μ W)	129.350	18.392	40.40400	188.146
	P_{1to2}/P_1 (%)	-296.870	14.153	0.0760	-202.698
5	P_{1to2} (μ W)	-260.226	0.103	0.00185	-260.121
	P_1 (μ W)	125.227	19.264	41.76500	186.256
	P_{1to2}/P_1 (%)	-207.803	0.535	0.00443	-139.658

จากตารางที่ 5.6 เนื่องจากค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนระหว่างระบบย่อย อาจจะมีค่าสูงต่ำได้ตามปริมาณของกำลังที่ใช้ในการกระตุ้นระบบรวม เพราะฉะนั้นจึงได้นำ อัตราส่วนระหว่างกำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมระหว่างระบบย่อยต่อกำลังที่ใช้ในการ กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลอง ของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชุดแทน นอกจากนั้นจะสังเกตได้ว่าผลรวมของกำลังการส่งผ่านการ สั้นสะเทือนรวมในแต่ละช่วงความถี่จะเป็นไปได้ทั้งค่าบวกและลบ โดยถ้ามีค่าเป็นบวกแสดงว่า กำลังการสั้นสะเทือนจะมีทิศทางส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐาน ของสปินเดิลมอเตอร์ และถ้ามีค่าเป็นลบจะแสดงให้เห็นว่ากำลังการสั้นสะเทือนจะมีทิศทาง ส่งผ่านจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์กลับสู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ โดยในความเป็นจริงค่ากำลังการสั้นสะเทือนรวมนี้จะถูกส่งผ่านจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปิน เดิลมอเตอร์และส่งผ่านสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กลายเป็นเสียงรบกวนต่อไป เพราะฉะนั้นถ้าค่า กำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมนี้มีค่าลดต่ำลง จะแสดงให้เห็นว่ากำลังการสั้นสะเทือนจะถูก ส่งผ่านจากจุดกำเนิด คือ บริเวณวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ สู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์และส่วน ต่าง ๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และส่งผ่านสู่ภายนอกกลายเป็นเสียงรบกวนได้น้อยลงนั่นเอง

จากตารางที่ 5.6 ในช่วงความถี่การสั้นสะเทือน 0 – 20 kHz แบบจำลองชุดที่ 1 ซึ่งมีค่า Interference fit สูงที่สุด จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์สูงที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 3, 5, 2 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมลดต่ำลงตามลำดับ และเมื่อลองแบ่งช่วง ความถี่ในการพิจารณาออกเป็นสามช่วง คือ 0 - 6.7 kHz, 6.7 – 13.3 kHz และ 13.3 – 20 kHz จะ พบว่าในช่วงความถี่ต่ำหรือช่วง 0 – 6.7 kHz แบบจำลองชุดที่ 1 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการ สั้นสะเทือนรวมสูงที่สุดเช่นเดียวกับในช่วงความถี่ 0 – 20 kHz รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 3, 5, 2 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมน้อยลงตามลำดับ และเมื่อลองพิจารณาช่วง ความถี่กลาง หรือช่วงความถี่ 6.7 – 13.3 kHz จะพบว่าแบบจำลองชุดที่ 1 จะมีค่ากำลังการส่งผ่าน การสั้นสะเทือนรวมที่ต่ำที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 2, 5, 3 และ 4 จะมีค่ากำลังการ ส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมสูงขึ้นตามลำดับ และเมื่อลองพิจารณาในช่วงความถี่สูง หรือช่วง 13.3 – 20 kHz จะพบว่าแบบจำลองชุดที่ 2 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมต่ำที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 1, 5, 3 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนสูงขึ้น ตามลำดับ โดยจากตารางที่ 5.6 จะสามารถแสดงผลในรูปของแผนภูมิแบบแท่งเพื่อความสะดวก ในการวิเคราะห์ผลได้ตามรูปที่ 5.10 ดังนี้



รูปที่ 5.10 แผนภูมิแบบแท่งของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในการทดสอบด้วยค้อนเคาะ

จากรูปที่ 5.10 จะสังเกตได้ว่าค่า Interference fit ต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะส่งผลต่อกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์อย่างชัดเจนในช่วงความถี่กลาง หรือในช่วงความถี่ 6.7 – 13.3 kHz คือ เมื่อค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าลดลง จะส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อค่า Interference fit ลดลงจนเกินค่าหนึ่งแล้วจะส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมนี้มีค่าลดลงแทน ดังจะสังเกตได้จากแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 ที่มีค่า Interference fit ต่ำที่สุด จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองในช่วงความถี่กลางลดลงจากแบบจำลองชุดที่ 4 ที่มีค่า Interference fit มากกว่าแทน ส่วนผลของค่า Interference fit ต่อกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองในช่วงความถี่ต่ำ, ความถี่สูง และความถี่รวมนั้นจะยังไม่เป็นที่แน่ชัด เนื่องจากในช่วงความถี่ดังกล่าวจะมีผลจากแบบจำลองบางชุดที่มีค่าแตกต่างกันออกไป ซึ่งทำให้ยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนในขั้นตอนนี้ โดยทั้งนี้จะมีสาเหตุเนื่องมาจากการนำค้อนเคาะมาใช้ในการกระตุ้นแต่ละรอบนั้นมีค่าไม่คงที่ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองแต่ละชุดนั้นมีค่าคลาดเคลื่อนสูง ส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมของแบบจำลองแต่ละชุดนั้นมีค่าผิดแปลกไป ดังนั้นในขั้นตอนต่อไป จึงได้นำเสนอผลของการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะมีข้อได้เปรียบ

กว่าค้อนเคาะ คือ แรงที่กระตุ้นจะมีค่าคงที่มากกว่าและสามารถควบคุมได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นในขั้นตอนต่อไป

5.5 ผลการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะแบ่งเป็นสามหัวข้อย่อยตามขั้นตอนการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน ได้แก่ ผลการทดสอบหาโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน, ผลการเปรียบเทียบโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขั้นที่ 1 และขั้นที่ 5 เมื่อใช้แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียรขนาด 6 นิ้วในการกระตุ้น และผลการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน โดยผลในแต่ละหัวข้อย่อย จะมีดังนี้

5.5.1 ผลการทดสอบหาโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะอยู่ในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ของแท่งส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนที่ผลิตขึ้นทั้ง 13 แท่ง แต่ผลการทดสอบในรูปแบบนี้มีจำนวนมาก จึงจะแสดงให้เห็นในส่วนของภาคผนวกต่อไป แต่จะสามารถแสดงผลโดยสรุปโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่แท่งในรูปแบบของตารางได้ตามตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 โหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน

Stinger	Length (in.)	Frequency (Hz)					
Aluminium	1"	9926	11130	18080	19280		
	3"	9326	18430	19530			
	6"	5676	5926	6226	16130	16580	19680
	9"	4326	12580	13380	18680	19580	
	12"	3426	10430	16230	16630	17330	
Stainless Steel	1"	11980					
	3"	9226	19580				
	6"	6026	12930	15330	16330	19630	
	9"	4426	12130	12630	18830	19530	
	12"	3526	10430	16130	16480		

ตารางที่ 5.7 โหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน

Stinger	Length (in.)	Frequency (Hz)					
เหล็กเจียร	6"	6076	9226	11480	11930		
	9"	4526	10230	16180			
	12"	3626	9376	11380	13080	19780	

จากตารางที่ 5.7 ซึ่งแสดงโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแท่ง จะสังเกตได้ว่ามีประเด็นที่น่าสนใจอยู่หลายประการดังนี้

1. การเพิ่มขึ้นของมวลของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากการเปลี่ยนวัสดุหรือแม้แต่การเพิ่มความยาว จะส่งผลทำให้โหมดการสั่นสะเทือนเกิดการเลื่อนในทิศทางที่ความถี่ต่ำลง ดังจะสังเกตได้จากการเปรียบเทียบโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแท่งเมื่อมีความยาวเท่ากัน

2. เมื่อแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนมีความยาวเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้โหมดการสั่นสะเทือนเกิดการเลื่อนในทิศทางที่ความถี่ต่ำลงเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของมวล ดังจะสังเกตได้จากการเปรียบเทียบโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละชนิดเมื่อความยาวมีค่าเปลี่ยนไป นอกจากนั้นจะมีโอกาสทำให้เกิดโหมดการสั่นสะเทือนใหม่ขึ้นเนื่องการเปลี่ยนของความยาวอีกด้วย ดังจะเห็นได้จากโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากอะลูมิเนียมความยาว 6 นิ้ว ที่ความถี่ประมาณ 6 kHz จะเกิดโหมดการสั่นสะเทือนใหม่แบ่งเป็นสามโหมด คือ 5676 Hz, 5926 Hz และ 6226 Hz

3. เมื่อลองนำโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนทั้งสามชนิดมาเปรียบเทียบกัน จะสังเกตได้ว่าความยาวของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนจะส่งผลทำให้โหมดการสั่นสะเทือนเกิดการเลื่อนมากกว่าผลจากการเพิ่มขึ้นของมวล ดังจะสังเกตได้จากการเปรียบเทียบโหมดการสั่นสะเทือนระหว่างแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม โดยการเพิ่มขึ้นของมวลและความยาวของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนจะส่งผลต่อการเลื่อนของโหมดการสั่นสะเทือนมากขึ้นเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความถี่ต่ำ การเพิ่มขึ้นของมวลจะส่งผลต่อการเลื่อนของโหมดการสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

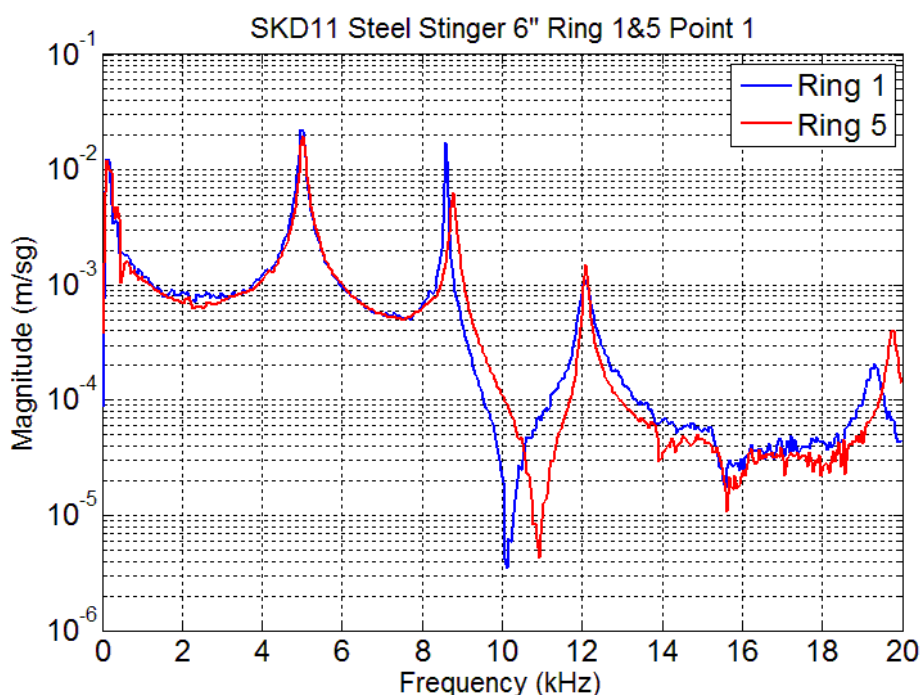
4. ผลของการเปลี่ยนวัสดุของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน จะเป็นการเปลี่ยนค่าความแข็งแรงของวัสดุและเปลี่ยนมวลของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนไป โดยเมื่อลองนำโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนทั้งสามชนิดมาเปรียบเทียบกันเมื่อความยาวมีค่าเท่ากัน

โหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร์ ซึ่งมีค่าความแข็งเกร็งสูงกว่าวัสดุอีกสองชนิดเหลือ จะมีโอกาสเกิดโหมดการสั่นสะเทือนใหม่เนื่องจากการเพิ่มลดของความยาวของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่น้อยกว่าวัสดุอีกสองชนิดที่เหลือ

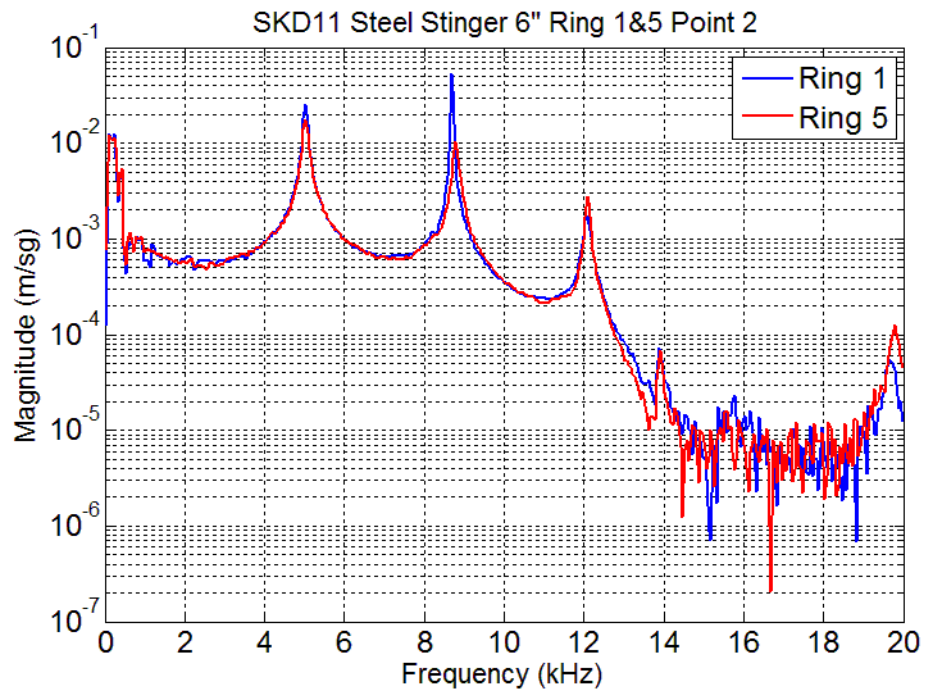
จากผลการทดสอบข้างต้นและผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวไปแล้ว จะถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมในการใช้ทดสอบภายในงานวิจัยฉบับนี้ในหัวข้อต่อ ๆ ไป

5.5.2 ผลการเปรียบเทียบโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อใช้แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร์ขนาด 6 นิ้วในการกระตุ้น

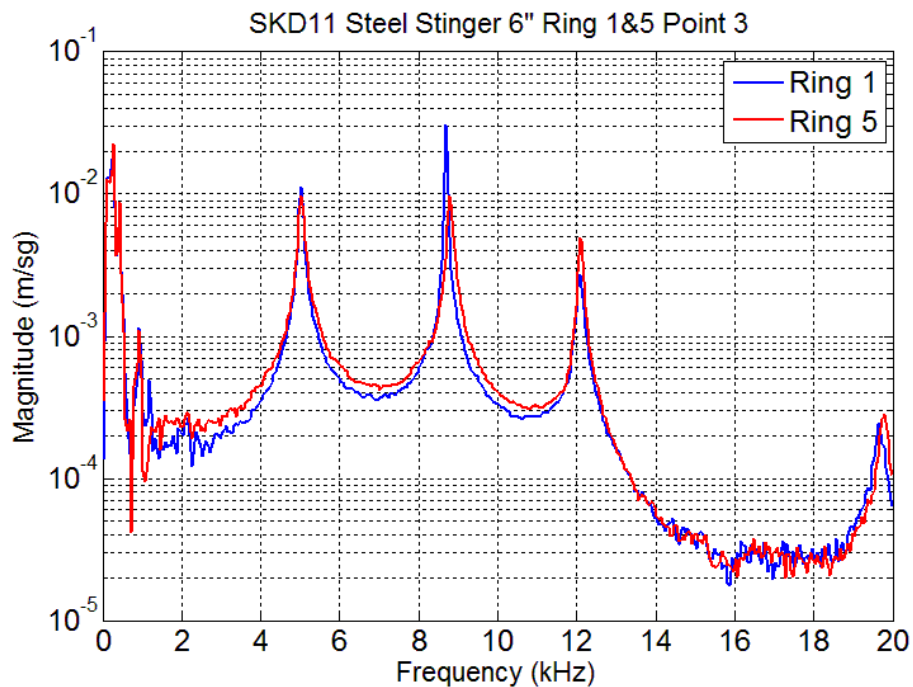
ผลการทดสอบในส่วนนี้จะแสดงอยู่ในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ ณ จุดวัดค่าการสั่นสะเทือน 5 จุด ได้แก่ จุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ชั้นที่ 1 เปรียบเทียบกับชั้นที่ 5 ดังแสดงในรูป 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 และ 5.15 ดังนี้



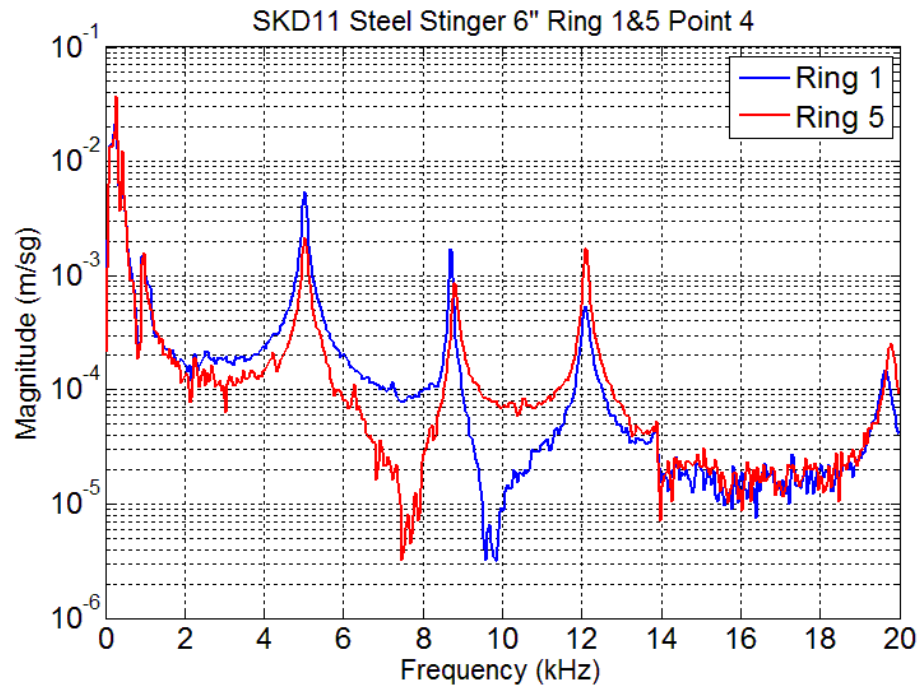
รูปที่ 5.11 ผลการสั่นสะเทือน ณ จุดที่ 1 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร์ขนาด 6 นิ้ว



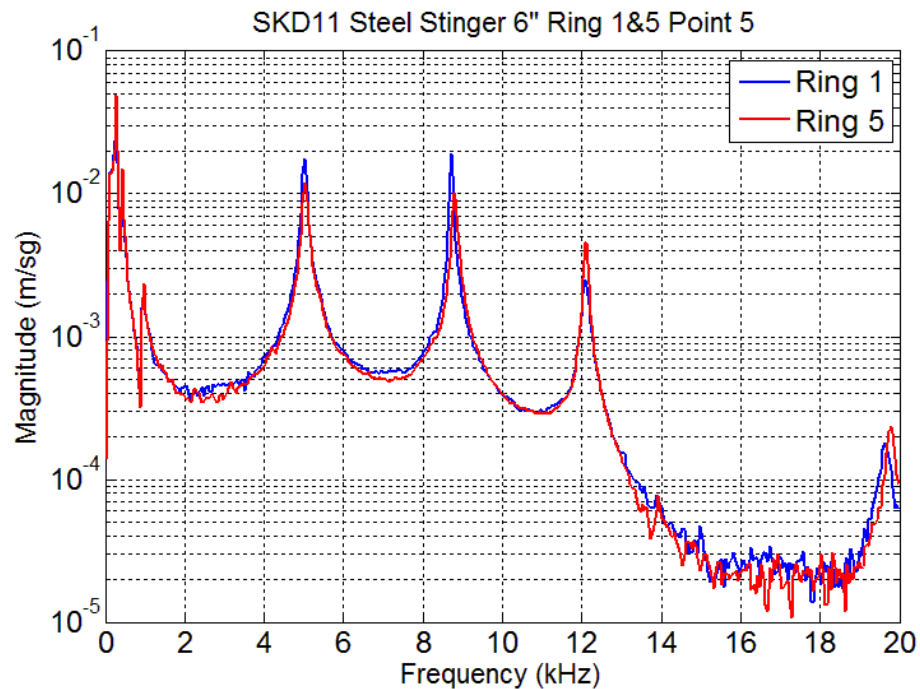
รูปที่ 5.12 ผลการสั่นสะเทือน ณ จุดที่ 2 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร์ขนาด 6 นิ้ว



รูปที่ 5.13 ผลการสั่นสะเทือน ณ จุดที่ 3 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร์ขนาด 6 นิ้ว



รูปที่ 5.14 ผลการสั่นสะเทือน ณ จุดที่ 4 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร์ขนาด 6 นิ้ว

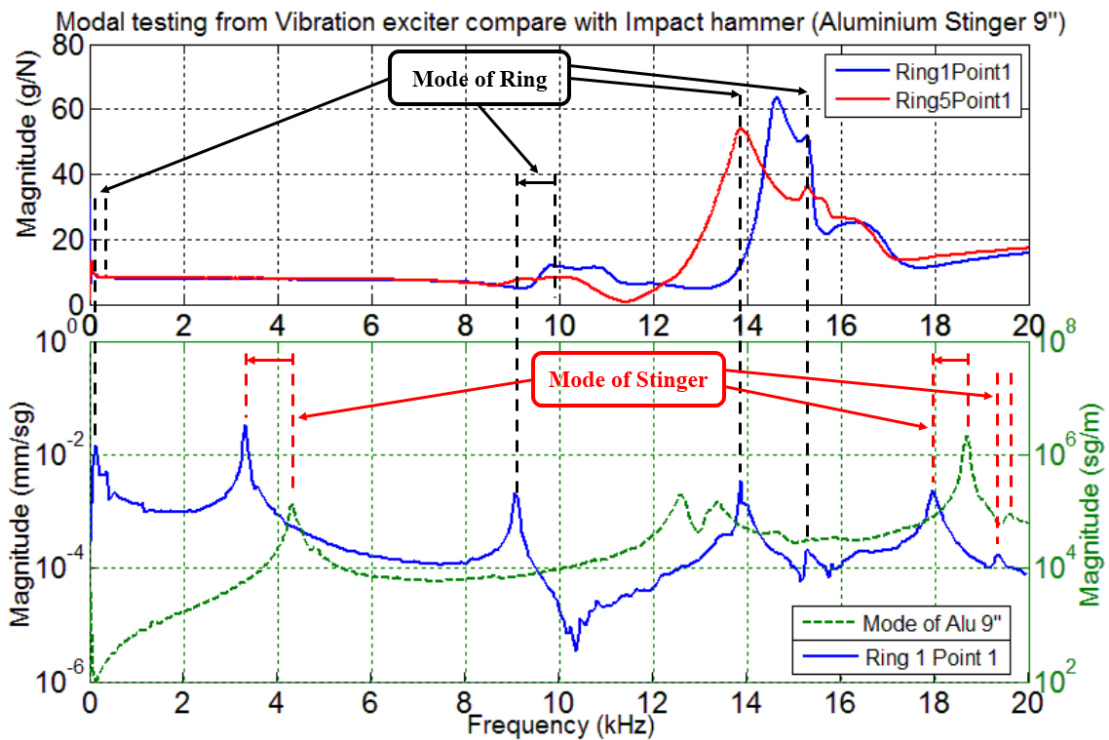


รูปที่ 5.15 ผลการสั่นสะเทือน ณ จุดที่ 5 ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 5 ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียร์ขนาด 6 นิ้ว

จากรูปที่ 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 และ 5.15 จะแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ทดสอบได้จากการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากเหล็กเจียรขนาด 6 นิ้ว จะมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นในการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนในขั้นตอนต่อไป จึงสามารถนำแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 เพียงชั้นเดียวมาใช้ในการทดสอบได้

5.5.3 ผลการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน

จากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน โดยเปลี่ยนแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนไป ผลที่ได้จะในรูปแบบของผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งแสดงโหมดการสั่นสะเทือนแต่ละจุดรอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับโหมดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะที่แสดงไปแล้วในหัวข้อย่อย่อก่อนหน้านี้ จะทำให้สามารถเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ทำให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่บันทึกได้จากการกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมีผลใกล้เคียงกับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่บันทึกได้จากการกระตุ้นค้อนเคาะและแสดงโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำได้อย่างชัดเจนได้ แต่เนื่องจากผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแท่งในรูปแบบของผลตอบสนองเชิงความถี่มีจำนวนมาก ในหัวข้อย่อย่อนี้จึงนำผลของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมที่สุดมาแสดงเท่านั้น โดยผลที่เหลือจะนำไปแสดงในส่วนของภาคผนวกต่อไป



รูปที่ 5.16 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำขึ้นที่ 1 จุดที่ 1 จากการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 9 นิ้วเทียบกับผลจากค้อนเคาะ

จากการทดสอบหาโหมดการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแท่ง จะสังเกตได้ว่าค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากแต่ละจุดรอบ ๆ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำจะมีขนาดและโหมดการสั่นสะเทือนที่ใกล้เคียงกันทั้ง 10 จุด เพราะฉะนั้นจึงสามารถนำผลการทดสอบจากจุดใดจุดหนึ่งมาใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นได้ โดยจากรูปที่ 5.16 จะแสดงผลการเปรียบเทียบโหมดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการใช้เครื่องมือทั้งสองชนิดในการหาโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำขึ้นที่ 1 ที่จุดที่ 1 โดยใช้แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 9 นิ้วในการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะมีทั้งโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 9 นิ้ว คือ ที่ความถี่ประมาณ 3.3 kHz, 18 kHz และ 19.3 kHz และโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบ คือ ที่ความถี่ประมาณ 100 Hz, 9 kHz, 14 kHz และ 15.2 kHz ซึ่งโหมดดังกล่าวทั้งหมดจะเกิดการเลื่อนไปจากโหมดการสั่นสะเทือนจริงเนื่องจากผลจากการเปลี่ยนแปลงมวลในระบบ โดยจากรูปที่ 5.16 จะแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบด้วยแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียม

ขนาด 9 นิ้ว จะแสดงโหมดการสั่นสะเทือนที่สำคัญของชั้นทดสอบได้อย่างชัดเจนและใกล้เคียง โหมดการสั่นสะเทือนจริงมากกว่าการใช้แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแท่งอื่นซึ่งจะแสดงผลในภาคผนวกต่อไป โดยผลที่ได้มีทั้งโหมดการสั่นสะเทือนของชั้นทดสอบเกิดการเลื่อนสูงและผลของไม่ชัดเจน เพราะฉะนั้นการทดสอบในชั้นตอนนี้จึงเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 9 นิ้วมาใช้ในการทดสอบชั้นต่อไป

5.6 ผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนตามจุดที่ใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้น คือ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยจะสามารถแสดงผลได้ดังนี้

5.6.1 กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

ผลการทดสอบจะแสดงในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ของจุดวัดการสั่นสะเทือนรอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 5 จุด และรอบแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จำนวน 10 จุด เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำตามแนวสัมผัส ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นในตาราง 5.8

ตารางที่ 5.8 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในทิศทางตามแนวสัมผัส

Measured	Point	Frequency (Hz)									
		Ring	1	176	426	1180	1760	5380	5580	6930	7780
12900	14600			15500	17400	19700					
2	176		426	5360	5560	6930	9960	10300	12900	15500	17400
	18200		19100	19700							
3	126		376	1780	5330	5580	6580	6930	7730	9980	10300
	11200		12800	15500	17400	18200	19100	19700			

ตารางที่ 5.8 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของ
วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในทิศทางตามแนวสัมผัส

Measured	Point	Frequency (Hz)									
Ring	4	176	426	626	1230	1780	5280	5580	6930	7660	9980
		10300	11800	12800	15500	15800	17400	18200	19000	19700	
	5	176	426	626	1230	1780	5580	6930	7680	9980	10300
		11800	12800	15500	17400	18200	19100	19700			
Base	1	176	426	1160	1780	3730	4930	5280	5580	7730	9280
		9980	10300	12800	15500	15600	17400	19700			
	2	176	426	626	1230	1780	4930	5580	6930	9280	9980
		10300	15600	17400	18000	19700					
	3	126	426	1230	2280	3830	4930	5530	6580	6930	7730
		9280	9980	10300	15500	17400	18100	19700			
	4	176	426	626	1230	1780	2330	4930	5280	5580	6930
		9230	9980	10300	15800	17300	18200	19700			
	5	176	426	626	1230	1780	2330	3880	4930	5330	5580
		6930	9280	9980	10300	15500	17400	19700			
	6	176	1180	1780	3730	4880	6930	9260	9980	10300	15500
		17400	19700								
	7	176	426	626	1230	1760	4930	5630	9330	9960	10300
		15500	18100	19700							
	8	126	376	626	1230	1760	3980	4930	5630	9280	9980
		10300	15500	15600	17400	18100	19700				
	9	176	426	626	1230	1780	2330	4880	5580	6930	9280
		9960	10300	15500	19700						

ตารางที่ 5.8 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในทิศทางตามแนวสัมผัส

Measured	Point	Frequency (Hz)									
Base	10	176	426	626	1230	1760	2330	4930	6860	9280	9980
		10300	15500	17400	19700						
Summary		176 Hz, 426 Hz, 626 Hz, 1230 Hz, 1780 Hz, 2330 Hz, 3880 Hz, 4930 Hz, 5360 Hz, 5580 Hz, 6930 Hz, 7730 Hz, 9280 Hz, 9980 Hz, 10300 Hz, 11800 Hz, 12800 Hz, 15500 Hz, 17400 Hz, 18100 Hz, 19700 Hz									

จากตารางที่ 5.8 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะได้แก่ความถี่ที่ 176 Hz, 426 Hz, 626 Hz, 1230 Hz, 1780 Hz, 2330 Hz, 3880 Hz, 4930 Hz, 5360 Hz, 5580 Hz, 6930 Hz, 7730 Hz, 9280 Hz, 9980 Hz, 10300 Hz, 11800 Hz, 12800 Hz, 15500 Hz, 17400 Hz, 18100 Hz และ 19700 Hz และเมื่อนำโหมดการสั่นสะเทือนที่วัดได้เทียบกับการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะจุดต่อจุดแล้ว จะสังเกตได้ว่าการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจะมีผลของแ่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยในตารางที่ 5.8 จะทำให้เกิดโหมดใหม่ขึ้น คือที่ความถี่ 176 Hz, 426 Hz, 626 Hz และ 1230 Hz และจะมีโหมดของแ่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนร่วมด้วย คือ ที่ความถี่ 1780 Hz, 9980 Hz, 10300 Hz, 12800 Hz และ 15500 Hz นอกจากนี้จะทำให้เกิดการเลื่อนของโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ 300 – 400 Hz โดยที่ความถี่ 3880 Hz, 4930 Hz, 6930 Hz, 7730 Hz, 11800 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ และที่ความถี่ 9280 Hz และ 17400 Hz จะเป็นความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนโหมดที่ความถี่ 5360 Hz, 5580 Hz, 18100 Hz และ 19700 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการประกอบขึ้นส่วนทั้งสองเข้าด้วยกัน

5.6.2 กระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

ผลการทดสอบจะแสดงในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ของจุดวัดการสั่นสะเทือนรอบแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 5 จุด และรอบแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จำนวน 10 จุด เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ด้วย

เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ตามแนวแกน ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นในตาราง 5.9

ตารางที่ 5.9 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในทิศทางตามแนวแกน

Measured	Point	Frequency (Hz)										
Ring	1	75.6	1930	3680	5030	5330	5680	6580	7730	8460	10100	
		12500	15500	18200	19900							
	2	75.6	376	576	1180	1930	2280	5030	5330	5680	6580	
		8460	10100	12500	15500	18200	19900					
	3	75.6	376	1230	1930	2280	3680	5030	5330	5680	6580	
		8460	10100	12500	15500	15700	18200	19800				
	4	75.6	376	626	1180	1930	2280	5030	5330	5680	6580	
		8460	10100	12500	12800	15500	18200	19200	19900			
	5	75.6	1930	3680	5030	5330	5680	6580	7730	8460	9780	
		10100	12500	15500	18200	19900						
	Base	1	126	1930	2280	3680	5030	5380	5680	6580	8480	9330
			10200	12500	15500	15800	16300	19900				
2		75.6	376	626	1230	1930	2280	3880	5030	5380	5680	
		6130	6580	8480	9280	10200	12500	12600	15500	16100	19900	
3		126	376	1230	1930	3680	5030	5380	5680	6580	8480	
		10100	12500	15500	15700	16000	19600					
4		75.6	376	676	1930	2280	3680	5030	5330	5680	6580	
		8480	9330	10100	12500	15300	15500	15700	16300	18200	19200	
		19900										
5		126	1930	2260	3680	5030	5330	5680	6580	8480	9330	
		10200	12500	15500	15600	16000	18100	19100	19900			
6		75.6	1180	1930	3780	5030	5680	6530	8480	9330	10100	
		12500	15500	15800	16100	19900						

ตารางที่ 5.9 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในทิศทางตามแนวแกน

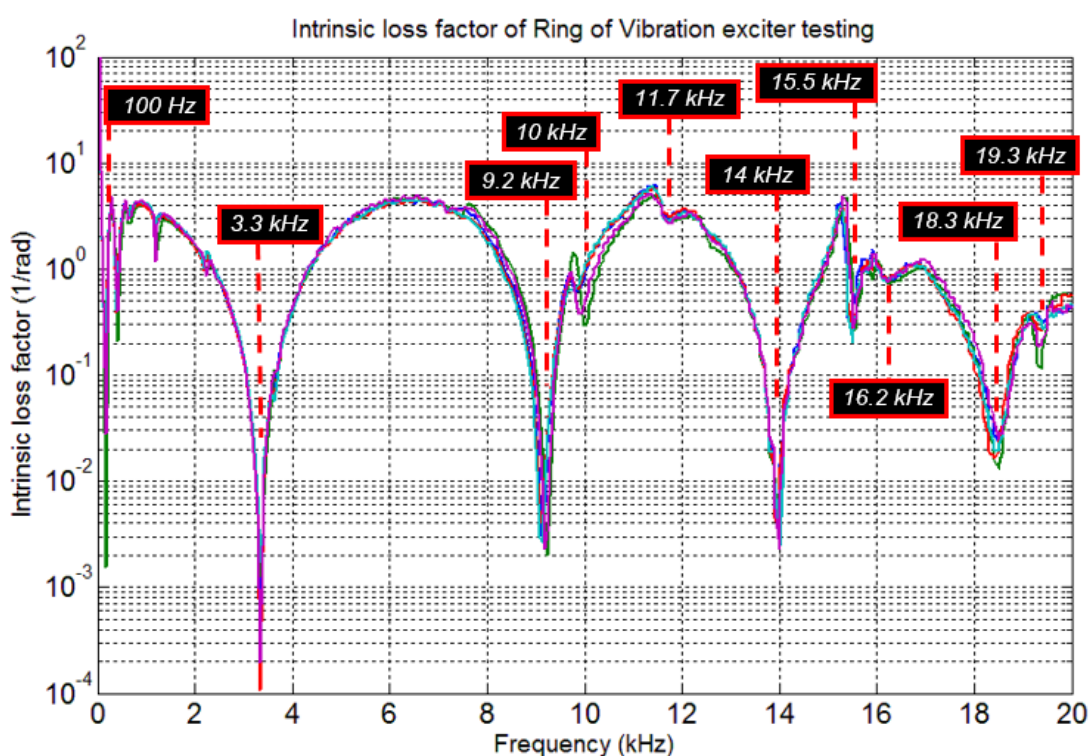
Measured	Point	Frequency (Hz)										
Base	7	75.6	376	626	1180	1930	2280	3680	5030	5330	5680	
		6580	8460	10200	12500	12800	15500	16000	18200	19300	19900	
	8	126	376	626	1230	1930	3680	5030	5330	5680	6530	
		8480	10100	12500	15500	15700	16000	18200	19600			
	9	75.6	376	676	1230	1930	2260	5030	5330	5730	6530	
		8460	9330	10200	12500	15300	15500	16000	18200	19900		
	10	75.6	1930	3730	5030	5380	5680	6530	8480	9330	10200	
		12500	15500	15800	16100	18200	19200	19900				
	Summary	75.6 Hz, 376 Hz, 626 Hz, 1230 Hz, 1930 Hz, 2280 Hz, 3680 Hz, 5030 Hz, 5380 Hz, 5680 Hz, 6580 Hz, 8460 Hz, 9330 Hz, 10200 Hz, 12500 Hz, 15500 Hz, 15700 Hz, 16100 Hz, 18200 Hz, 19100 Hz, 19700 Hz										

จากตารางที่ 5.9 โหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะได้แก่ ความถี่ที่ 75.6 Hz, 376 Hz, 626 Hz, 1230 Hz, 1930 Hz, 2280 Hz, 3680 Hz, 5030 Hz, 5380 Hz, 5680 Hz, 6580 Hz, 8460 Hz, 9330 Hz, 10200 Hz, 12500 Hz, 15500 Hz, 15700 Hz, 16100 Hz, 18200 Hz, 19100 Hz และ 19700 Hz และเมื่อนำโหมดการสั่นสะเทือนที่วัดได้เทียบกับการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะจุดต่อจุดแล้ว จะสังเกตได้ว่าการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะมีผลของแ่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยในตารางที่ 5.9 จะมีโหมดใหม่เกิดขึ้น คือที่ความถี่ 376 Hz, 626 Hz และ 1230 Hz และมีโหมดของแ่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนร่วมด้วย คือ 1930 Hz, 10200 Hz, 12500 Hz และ 15500 Hz นอกจากนั้นจะทำให้เกิดการเลื่อนของโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ 200 – 300 Hz โดยที่ความถี่ 3680 Hz, 5030 Hz, 6580 Hz และ 8460 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ และที่ความถี่ 9330 Hz, 15700 Hz และ 16100 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนที่ความถี่ 5380 Hz, 5680 Hz, 18200 Hz, 19100 Hz และ 19700 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการประกอบชิ้นส่วนทั้งสองเข้าด้วยกัน

5.7 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของระบบย่อยแต่ละระบบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนตามการแบ่งระบบที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ และมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

5.7.1 แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

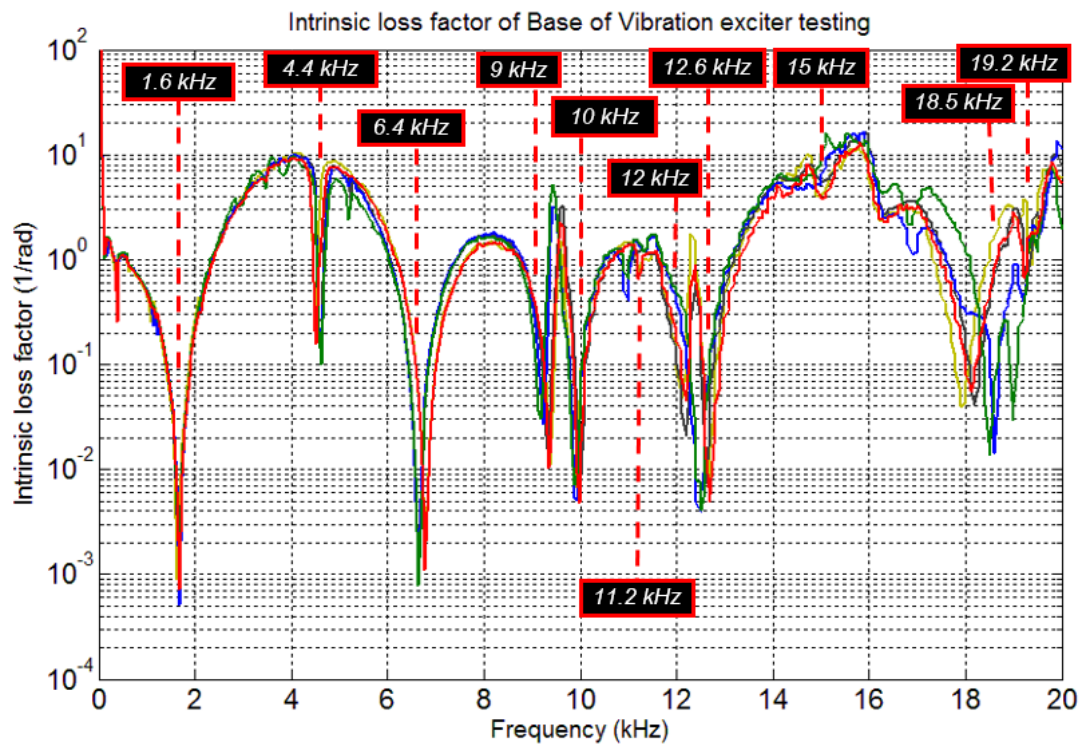


รูปที่ 5.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 5 ชิ้นจากการใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการทดสอบ

จากรูปที่ 5.17 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 5 ชิ้นจากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ความถี่โหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน คือ 3.3 kHz, 18.3 kHz และ 19.3 kHz และที่ความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ คือ 100 Hz, 9.2 kHz, 10 kHz, 11.7 kHz, 14 kHz, 15.5 kHz และ 16 kHz จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงลดต่ำลง ซึ่งเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความ

สูญเสียเนื่องจากความหน่วงและพลังงานการสั่นสะเทือนสะสมภายในซึ่งแปรผกผันกัน และแสดงให้เห็นว่าการใช้แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่คำนวณได้เช่นกัน นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบจะช่วยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทั้ง 5 ชั้นมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมแรงกระตุ้นด้วยเครื่อง DSA ซึ่งเป็นข้อดีของการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบนั่นเอง

5.7.2 แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

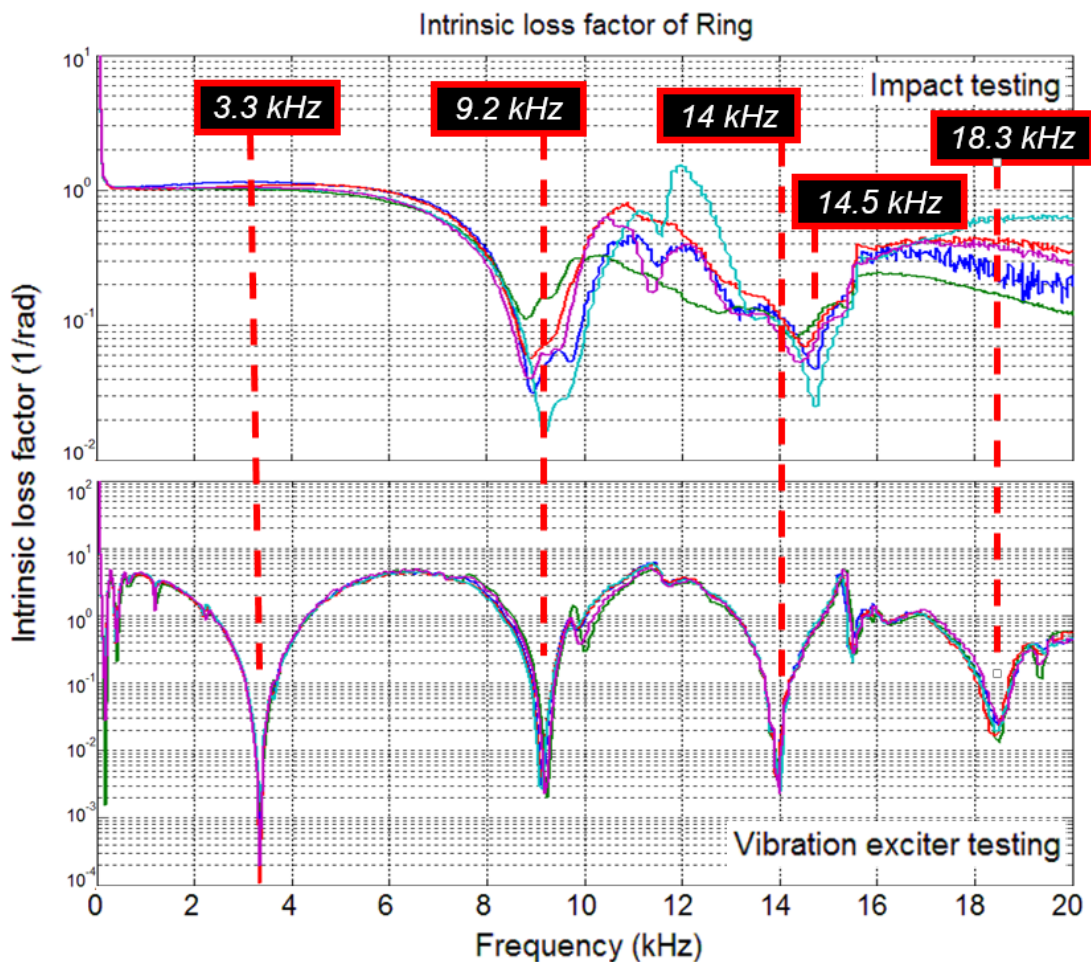


รูปที่ 5.18 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชั้นจากการใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการทดสอบ

จากรูปที่ 5.18 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชั้นจากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ความถี่โหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน คือ 1.6 kHz, 12 kHz, 12.6 kHz, 18.5 kHz และ 19.2 kHz และที่ความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ คือ 100 Hz, 4.4 kHz, 6.4 kHz, 9 kHz, 10 kHz, 11.2 kHz และ 15

kHz จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงลดต่ำลง ซึ่งเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงและพลังงานการสั่นสะเทือนสะสมภายในซึ่งแปรผกผันกัน โดยจะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่ได้จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันระหว่างแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิมาเตอร์ทั้ง 5 ชิ้นซึ่งเป็นข้อดีของการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน แต่ที่ความถี่สูงนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงจะยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร

5.7.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 5.19 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

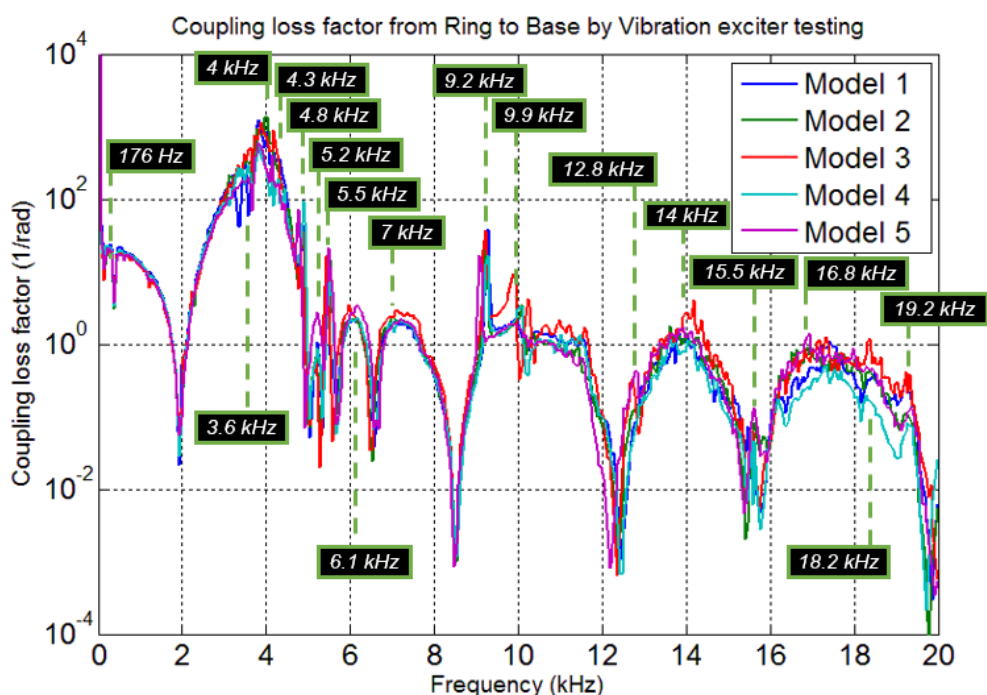
ในส่วนนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่ได้จากการ

ทดสอบทั้งสองวิธีในการเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 5.19 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบจะให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงที่คงที่ระหว่างแบบจำลองแต่จะขึ้นมากกว่าการทดสอบด้วยค้อนเคาะ ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อดีประการหนึ่งของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน คือ สามารถควบคุมการสั่นสะเทือนให้มีค่าคงที่ที่แต่ละความถี่และในแต่ละครั้งที่กระตุ้น ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักที่นำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเข้ามาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ แต่การนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบจะส่งผลเสียบางประการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงจะมีผลของแก่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังจะสังเกตได้จากที่ความถี่ 3.3 kHz และ 18.3 kHz ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงจะมีค่าผิดปกติไป ซึ่งที่ความถี่ดังกล่าวจะตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนของแก่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนนั่นเอง นอกจากนั้นจะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงจะเกิดการเลื่อนของความถี่เกิดขึ้น ดังจะสังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงจากการทดสอบด้วยค้อนเคาะที่ความถี่ 14.5 kHz จะเกิดการเลื่อนไปสู่ 14 kHz เมื่อนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบ

5.8 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ และค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

5.8.1 สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์

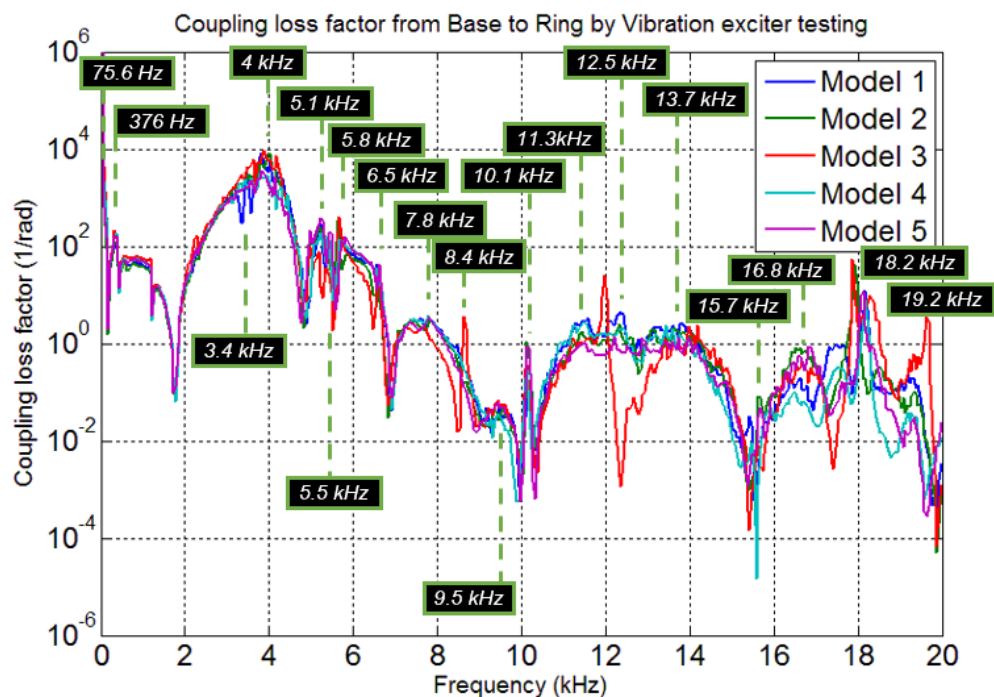


รูปที่ 5.20 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์จากการใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการทดสอบ

จากรูปที่ 5.20 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์จากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน และที่ความถี่ได้แก่ 176 Hz, 3600 Hz, 4000 Hz, 4300 Hz, 4800 Hz, 5200 Hz, 5500 Hz, 6100 Hz, 7000 Hz, 9200 Hz, 9900 Hz, 12800 Hz, 14000 Hz, 15500 Hz, 16800 Hz, 18200 Hz และ 19200 Hz จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยสูงกว่าที่ความถี่อื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความถี่ 3600 Hz, 4000 Hz, 4300 Hz, 4800 Hz, 6100 Hz และ 7000 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ และที่ความถี่ 9200 Hz, 14000 Hz และ 16800 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนที่ความถี่ 5200 Hz, 5500 Hz, 18200 Hz และ 19200 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการประกอบขึ้นส่วนทั้งสองเข้าด้วยกัน และที่ความถี่ 9900 Hz, 12800 Hz และ 15500 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน ส่งผลทำให้พลังงานการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบ

ย่อยมีค่าสูงขึ้น และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่แต่ละความถี่นั้น ๆ มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และนอกจากนั้น จากรูปที่ 5.20 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่คำนวณได้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ซึ่งเป็นข้อดีของการนำมาเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการกระตุ้น แต่จะมีข้อเสียตามมา คือ จะมีผลของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนมาเกี่ยวข้องกับผลที่คำนวณได้ ซึ่งจะต้องพัฒนาต่อไปในอนาคต

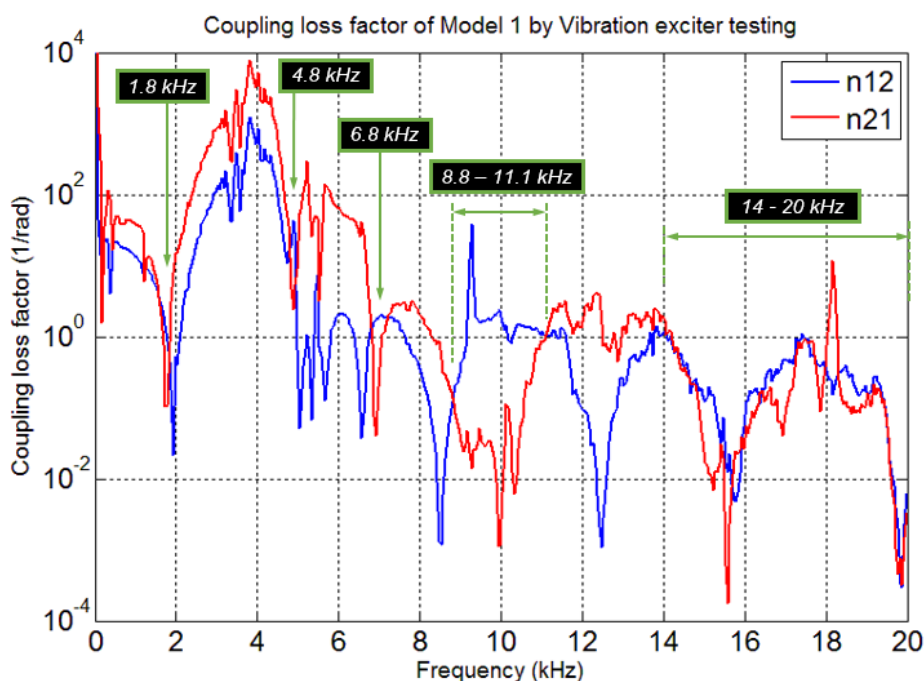
5.8.2 สัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์คู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.21 ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์คู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจากการใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการทดสอบ

จากรูปที่ 5.21 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์คู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน และที่ความถี่ได้แก่ 75.6 Hz, 376 Hz, 3400 Hz, 4000 Hz, 5100 Hz, 5500 Hz, 5800 Hz, 6500 Hz, 7800 Hz, 8400 Hz, 9500 Hz, 10100 Hz, 11300 Hz, 12500 Hz, 13700 Hz, 15700 Hz, 16800 Hz, 18200 Hz และ 19200 Hz จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยสูงกว่าที่ความถี่อื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความถี่ 3400 Hz, 4000 Hz, 6500 Hz, 7800 Hz, 8400 Hz และ 11300 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิล

มอเตอร์ และที่ความถี่ 9500 Hz, 13700 Hz และ 16800 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนที่ความถี่ 5100 Hz, 5500 Hz, 5800 Hz, 18200 Hz และ 19200 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการประกอบขึ้นส่วนทั้งสองเข้าด้วยกัน และที่ความถี่ 10100 Hz, 12500 Hz และ 15700 Hz จะเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน ส่งผลทำให้พลังงานการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยมีค่าสูงขึ้น และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่แต่ละความถี่นั้น ๆ มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และนอกจากนั้น จากรูปที่ 5.21 จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยที่คำนวณได้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ซึ่งเป็นข้อดีของการนำมาเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการกระตุ้น แต่จะมีข้อเสียตามมา คือ จะมีผลของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนมาเกี่ยวข้องกับผลที่คำนวณได้ เช่นเดียวกับการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์



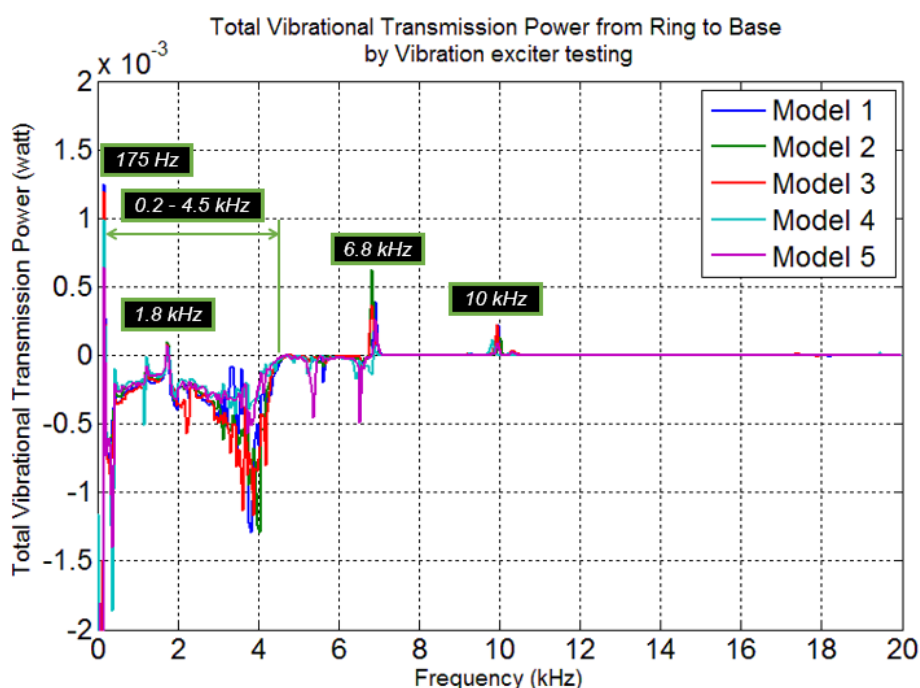
รูปที่ 5.22 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 5.22 จะสังเกตได้ว่าในช่วงความถี่ 1.8 kHz, 4.8 kHz, 6.8 kHz, 8.8 – 11.1 kHz และ 14 – 20 kHz ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสีย

ระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งหมายความว่าในช่วงความถี่ดังกล่าวพลังงานการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้ดีกว่า โดยในช่วงความถี่อื่น ๆ นอกจากที่ได้กล่าวไปข้างต้นจะมีผลที่ตรงข้ามกัน คือ พลังงานการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำได้ดีกว่านั่นเอง

5.9 ผลการทดสอบหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

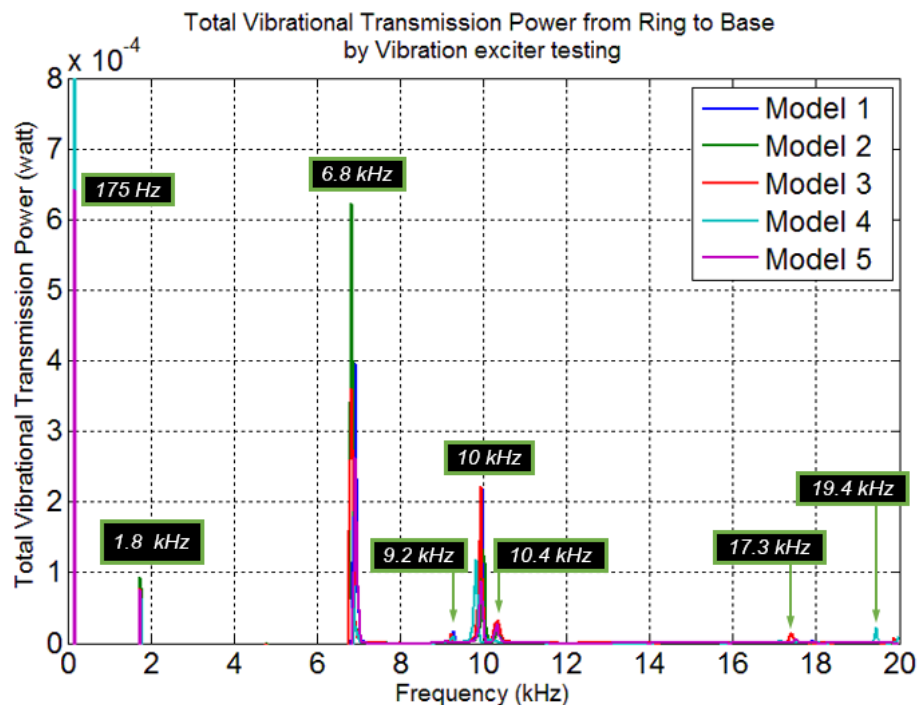
ผลของค่ากำลังการสั่นสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจะอยู่ในรูปของแผนภูมิเทียบกับความถี่ตั้งแต่ 0 – 20 kHz ซึ่งจะเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 5.23 ซึ่งแสดงผลของค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จะมีค่าทั้งบวกและลบ

เช่นเดียวกับในส่วนของ การทดสอบด้วยค้อนเคาะ โดยในช่วงความถี่ 0.2 – 4.5 kHz ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจะมีค่าสูงกว่าที่ความถี่อื่นมาก ซึ่งเป็นผลมาจากสาเหตุหลายประการ ได้แก่ ประการแรก คือ ในช่วงความถี่ดังกล่าวค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์มากดังแสดงในรูปที่ 5.22 ประการที่สอง คือ พลังงานการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ต่ำจะมีค่าสูงกว่าช่วงความถี่สูง และประการสุดท้าย คือ พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์มีค่าสูงกว่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ โดยเป็นผลสืบเนื่องมาจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันจะมีมวลและค่าความหน่วงการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ดังกล่าวที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่ผลิตจากอะลูมิเนียมและมีลักษณะเป็นแผ่นจานบาง จากหลายสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ดังกล่าวมีค่ามากกว่าช่วงความถี่อื่นตามสมการ (4-20) ที่ใช้ในการคำนวณหา ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมนั่นเอง



รูปที่ 5.24 ค่าบวกของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 5.24 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการส่งผ่านที่ถูกลบออกจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่ความถี่ประมาณ 175 Hz, 1.8 kHz, 6.8 kHz, 9.2 kHz, 10 kHz, 10.4 kHz, 17.3 kHz และ 19.4 kHz จะมีค่าบวกสูงอย่างชัดเจน ทั้งนี้จะมาจากสาเหตุหลายประการ ได้แก่ ความถี่ดังกล่าวจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำอยู่หลายเท่าดังแสดงรูปที่ 5.22 และสาเหตุอีกประการหนึ่ง คือ ที่ความถี่ดังกล่าวจะตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เมื่อกระตุ้นที่แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำดังแสดงในตารางที่ 5.8 โดยจากสาเหตุสองประการนี้จึงส่งผลทำให้ที่ความถี่ดังกล่าวค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จากสมการ (4-20) จะมีค่าบวกสูงกว่าที่ความถี่อื่น ๆ นั่นเอง เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยและโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์จะส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง ซึ่งเป็นจริงตามสมการ (4-20) ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยจะสามารถสรุปปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ตลอดช่วงความถี่ 0 – 20 kHz ของแบบจำลองทั้ง 5 ชุดในการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนได้ตามตารางที่ 5.10 ดังนี้

ตารางที่ 5.10 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

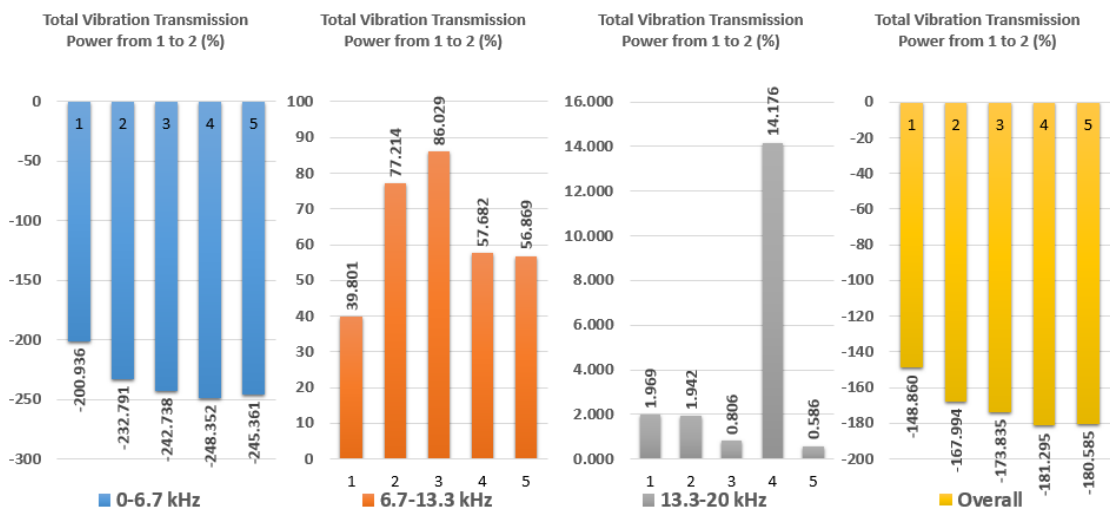
Model		Frequency (kHz)			Overall
		0 – 6.7	6.7 – 13.3	13.3 - 20	
1	P_{1to2} (μ W)	-23608.636	863.339	26.447	-22718.9
	P_1 (μ W)	11749.328	2169.112	1343.454	15261.89
	P_{1to2}/P_1 (%)	-200.936	39.801	1.969	-148.860
2	P_{1to2} (μ W)	-27227.37	1670.956	25.966	-25530.4
	P_1 (μ W)	11696.077	2164.071	1337.08	15197.23
	P_{1to2}/P_1 (%)	-232.791	77.214	1.942	-167.994

ตารางที่ 5.10 กำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั้นสะเทือน

Model		Frequency (kHz)			Overall
		0 – 6.7	6.7 – 13.3	13.3 - 20	
3	P_{1to2} (μ W)	-28643.287	1912.204	10.868	-26720.2
	P_1 (μ W)	11800.073	2222.734	1348.187	15370.99
	P_{1to2}/P_1 (%)	-242.738	86.029	0.806	-173.835
4	P_{1to2} (μ W)	-28949.749	1256.151	189.464	-27504.1
	P_1 (μ W)	11656.742	2177.707	1336.513	15170.96
	P_{1to2}/P_1 (%)	-248.352	57.682	14.176	-181.295
5	P_{1to2} (μ W)	-28819.38	1237.724	7.889	-27573.8
	P_1 (μ W)	11745.693	2176.444	1346.989	15269.13
	P_{1to2}/P_1 (%)	-245.361	56.869	0.586	-180.585

จากตารางที่ 5.10 ซึ่งจะแสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในรูปแบบของอัตราส่วนของกำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองเทียบกับกำลังที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ทั้งนี้เนื่องจากว่าปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมจะมากขึ้นอยู่กับปริมาณของกำลังที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้การเปรียบเทียบมีความผิดพลาดได้ ผลการทดสอบในส่วนนี้จึงได้นำอัตราส่วนของปริมาณทั้งสองมาใช้ในการเปรียบเทียบแทน โดยจากตารางที่ 5.10 จะสังเกตได้ว่าตลอดช่วงความถี่ 0 – 20 kHz แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ซึ่งมีค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่สูงที่สุด จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมสูงที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 2, 3, 5 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมลดต่ำลงตามลำดับ โดยเมื่อลองแบ่งช่วงความถี่ในการวิเคราะห์ผลของกำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมออกเป็นสามช่วง คือ 0 – 6.7 kHz, 6.7 – 13.3 kHz และ 13.3 – 20 kHz จะสังเกตได้ว่าในช่วงความถี่ 0 – 6.7 kHz แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ซึ่งมีค่า Interference fit สูงที่สุด จะยังคงมีกำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมสูงที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 2, 3, 5 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั้นสะเทือนรวมลดต่ำลงตามลำดับ และเมื่อลองพิจารณาในช่วงความถี่ 6.7 – 13.3 kHz จะสังเกตได้ว่าแบบจำลองชุดที่ 1 จะมีกำลังการ

ส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมต่ำที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4, 5, 2 และ 3 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมเพิ่มขึ้น และเมื่อลองพิจารณาในช่วงความถี่ 13.3 – 20 kHz แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมสูงที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 1, 2, 3 และ 5 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมลดต่ำลง โดยจากตารางที่ 5.10 จะสามารถแสดงผลในรูปแบบของแผนภูมิแบบแท่งเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผลได้ตามรูปที่ 5.25 ดังนี้



รูปที่ 5.25 แผนภูมิแบบแท่งของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 5.25 จะสามารถสรุปได้ว่าค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์จะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยในช่วงความถี่ต่ำและความถี่รวม จะสังเกตได้ว่าเมื่อค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าลดต่ำลง กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองจะมีค่าลดลงตาม โดยเมื่อค่า Interference fit มีค่าลดลงเกินค่าหนึ่งไปแล้วจะส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นแทน ดังจะสังเกตได้จากแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมต่ำกว่าแบบจำลองชุดที่ 5 ซึ่งมีค่า Interference fit ต่ำที่สุด และในช่วงความถี่กลางจะสังเกตได้ว่าเมื่อค่า Interference fit มีค่าลดต่ำลง ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อค่า Interference fit ลดต่ำลงเกินค่าหนึ่งไปแล้วจะส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวม

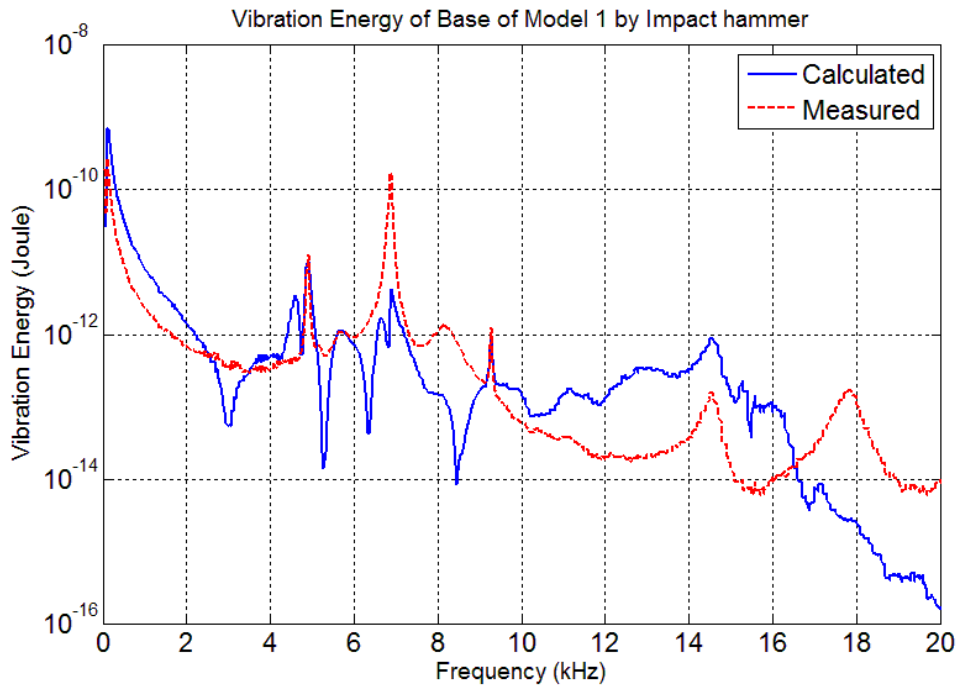
จะมีค่าลดต่ำลงแทน ดังจะสังเกตได้จากแบบจำลองชุดที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งมีค่า Interference fit ลดต่ำลง จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ แต่แบบจำลองชุดที่ 4 และ 5 ที่มีค่า Interference fit ลดต่ำลงจากแบบจำลองชุดที่ 1, 2 และ 3 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนลดต่ำลงจากแบบจำลองชุดที่ 3 ซึ่งมีค่า Interference fit มากกว่าแทน ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจากการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ และในช่วงความถี่สูง จะสังเกตได้ว่าผลของค่า Interference fit ต่อค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองจะยังไม่ชัดเจน เนื่องจากไม่สามารถหาแนวโน้มของค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมเมื่อค่า Interference fit มีค่าเปลี่ยนแปลงได้เลย

5.10 ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis

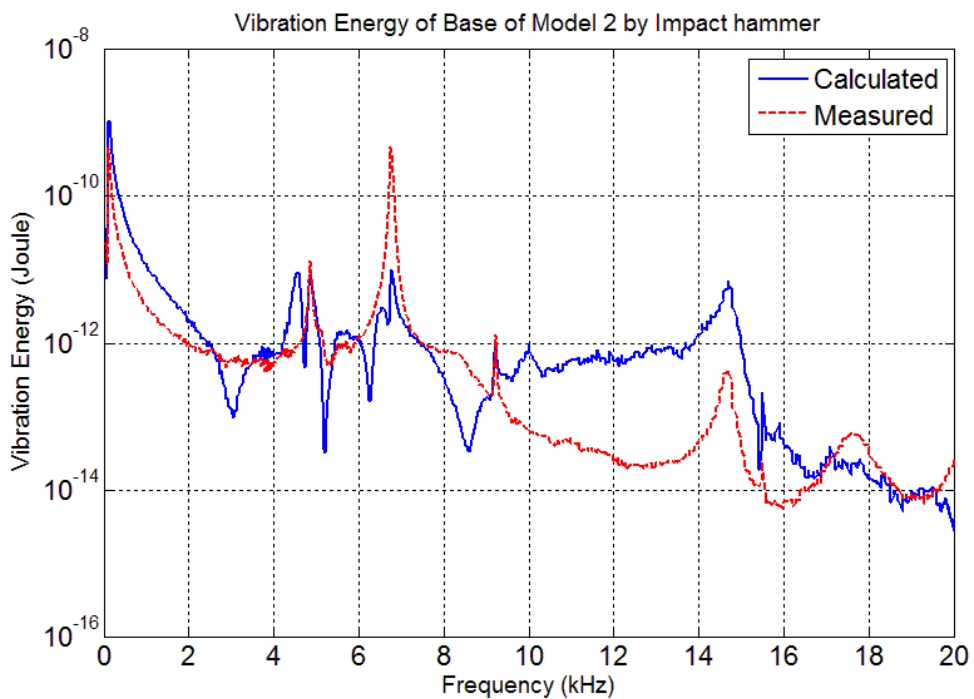
ผลการทดสอบในส่วนนี้จะสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนตามอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ ค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน โดยมีผลการทดสอบดังนี้

5.10.1 การกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ

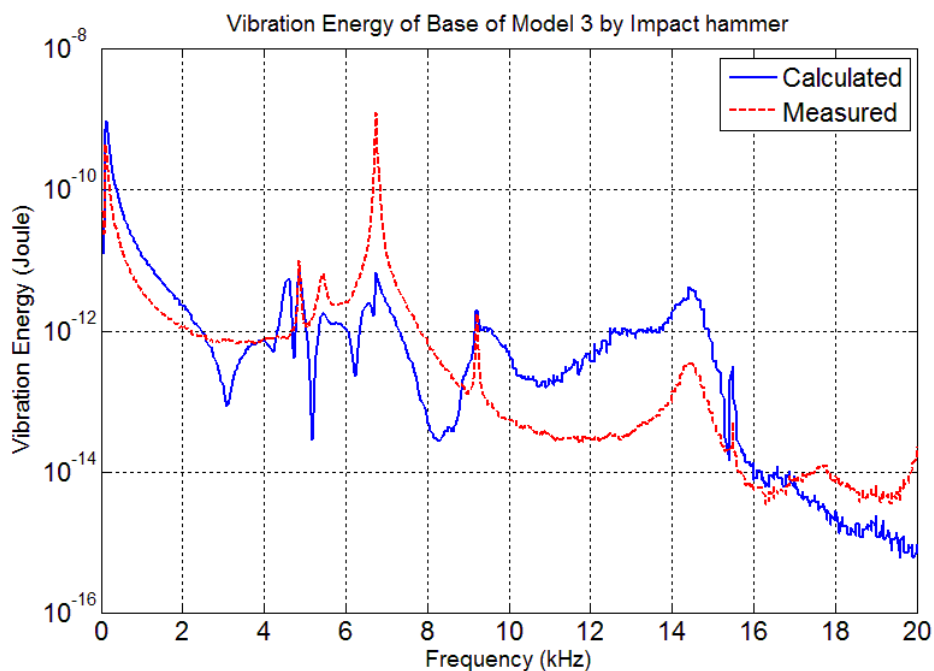
ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis โดยใช้ค้อนเคาะในการทดสอบกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1, 2 และ 3 จะสามารถแสดงอยู่ในรูปของแผนภูมิการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่ประมาณค่าได้จากสมการ (4-24) เทียบกับพลังงานการสั่นสะเทือนของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่วัดได้จริงจากการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.26, 5.27 และ 5.28 ตามลำดับ และจะสามารถสรุปการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จากหลักการ Statistical energy analysis กับค่าที่วัดได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะในรูปตารางได้ ดังตารางที่ 5.11



รูปที่ 5.26 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงเมื่อใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น



รูปที่ 5.27 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงเมื่อใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น



รูปที่ 5.28 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงเมื่อใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น

ตารางที่ 5.11 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จากหลักการ Statistical energy analysis กับค่าที่วัดได้จริงจากการทดสอบด้วยค้อนเคาะ

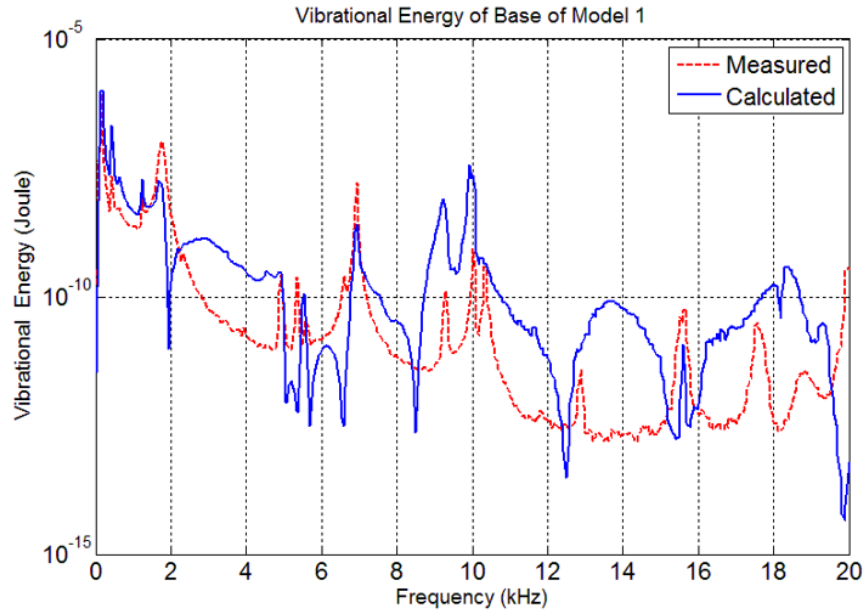
Model		Frequency (kHz)			Overall
		0 – 6.7	6.7 – 13.3	13.3 - 20	
1	W_{cal} (nJ)	3.712	0.0679	0.0267	3.807
	$W_{measured}$ (nJ)	1.312	0.658	0.00792	1.978
	Error (%)	182.877	89.679	236.905	92.436
2	W_{cal} (nJ)	5.108	0.156	0.118	5.381
	$W_{measured}$ (nJ)	1.741	1.349	0.00843	3.099
	Error (%)	193.277	88.469	1302.87	73.667
3	W_{cal} (nJ)	4.930	0.143	0.102	5.176
	$W_{measured}$ (nJ)	2.159	2.748	0.00952	4.917
	Error (%)	128.323	94.782	976.078	5.276

จากรูปที่ 5.26, 5.27, 5.28 และตารางที่ 5.11 จะแสดงให้เห็นว่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ที่ประมาณค่าได้จากหลักการ Statistical energy analysis จะมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงที่วัดได้อยู่มากพอสมควร แต่ค่าทั้งสองกลับมีโหมดหลายจุดตรงกัน ได้แก่ที่ความถี่ 176 Hz, 4800 Hz, 6700 Hz, 9200 Hz, 14400 Hz และ 15500 Hz และยังมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจจะมาจากสาเหตุหลายประการ หนึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากในหลักการ Statistical energy analysis จะนำค่าเฉลี่ยมาใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งค่าเฉลี่ยดังกล่าวไม่ได้สะท้อนถึงข้อมูลที่มีอยู่ทั้งหมด ผลดังกล่าวจึงอยู่ในรูปของค่าความคลาดเคลื่อนนั่นเอง นอกจากนี้เมื่อลองสังเกตสมการ (4-24) ที่นำมาใช้ในการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ จะสังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงและค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจะส่งผลต่อค่าพลังงานการสั่นสะเทือนที่คำนวณได้โดยตรง เพราะฉะนั้นค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจจะมีสาเหตุหนึ่งมาจากค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงและค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยก็เป็นได้

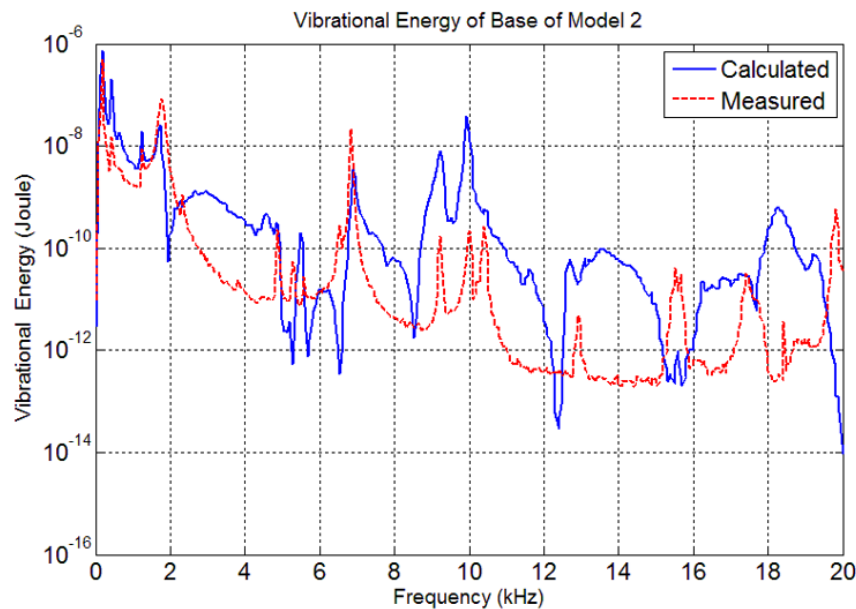
5.10.2 การกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการทดสอบกับแบบจำลองของสปริงเดลิโมเตอร์ชุดที่ 1, 2 และ 3 จะสามารถแสดงอยู่ในรูปของแผนภูมิการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ที่ประมาณค่าได้จากสมการ (4-24) เทียบกับพลังงานการสั่นสะเทือนของฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ที่วัดได้จริงจากการทดสอบ โดยเนื่องจากสามารถควบคุมการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนได้ จึงสามารถแบ่งผลการทดสอบของแบบจำลองแต่ละชุดออกได้เป็นสองส่วนตามขนาดของการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ 0.5 เท่าและ 1.5 เท่าของความเร่งการสั่นสะเทือนจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้ในการกระตุ้นตามปกติ โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

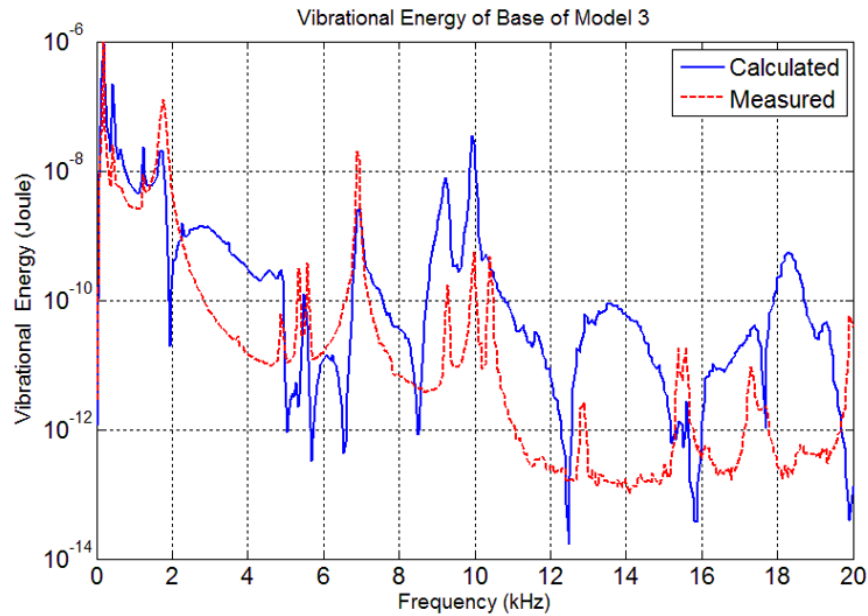
5.10.2.1 กระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 1.5 เท่าของความเร่งปกติ



รูปที่ 5.29 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 1.5 เท่าของความเร่งปกติ

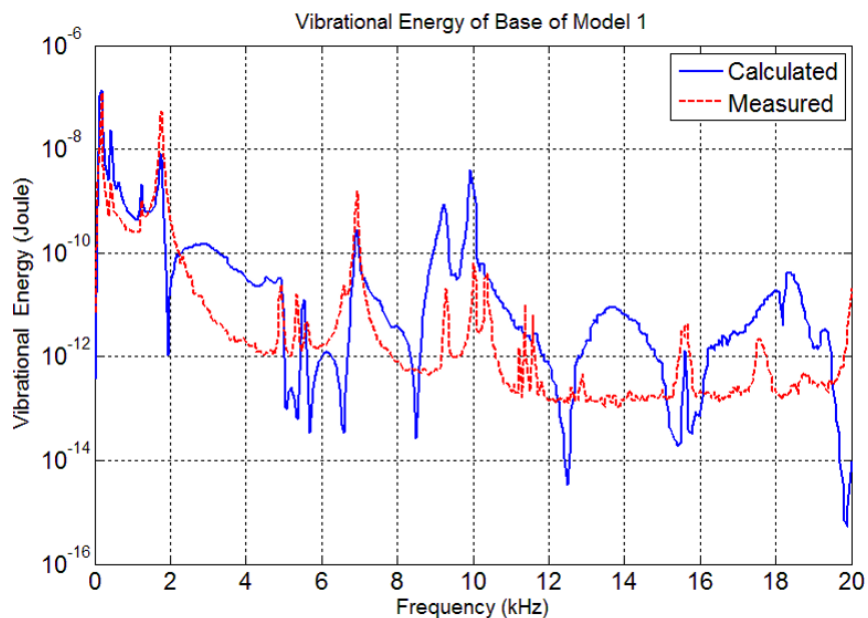


รูปที่ 5.30 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 1.5 เท่าของความเร่งปกติ

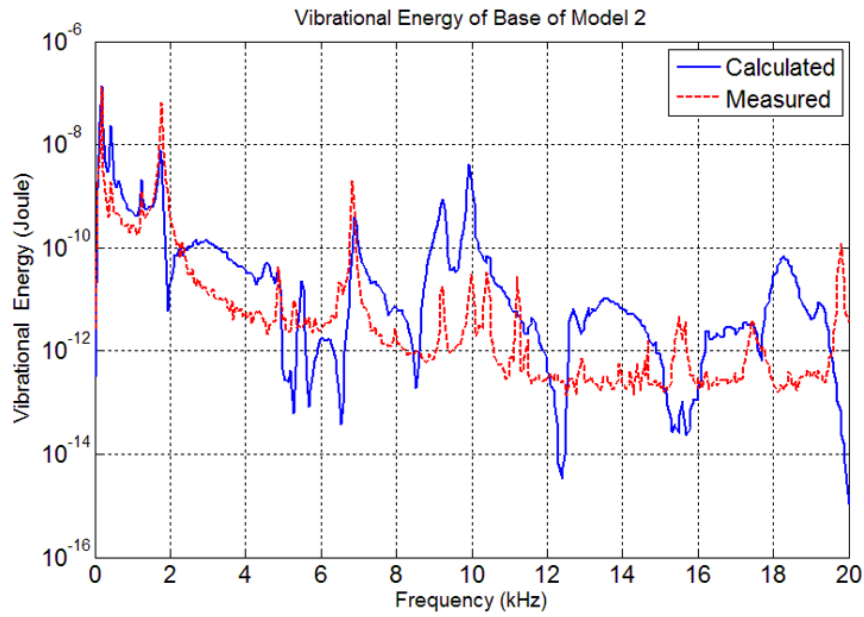


รูปที่ 5.31 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 1.5 เท่าของความเร่งปกติ

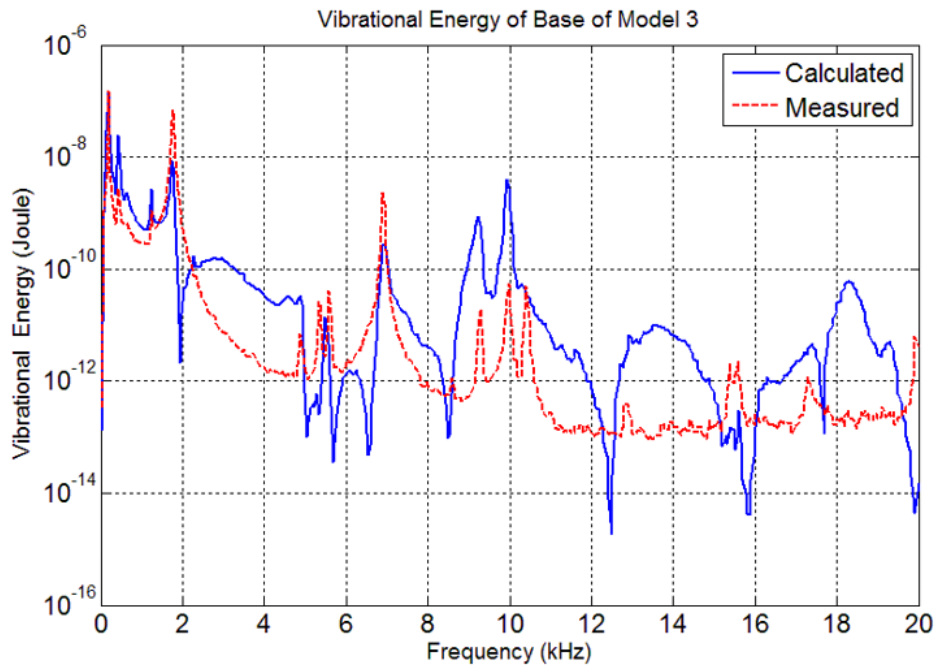
5.10.2.2 กระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 0.5 เท่าของความเร่งปกติ



รูปที่ 5.32 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 0.5 เท่าของความเร่งปกติ



รูปที่ 5.33 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 2 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 0.5 เท่าของความเร่งปกติ



รูปที่ 5.34 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 3 ที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริง เมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้นด้วยความเร่งการสั่นสะเทือน 0.5 เท่าของความเร่งปกติ

จากผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1, 2 และ 3 ที่ประมาณค่าได้จากหลักการ Statistical energy analysis เทียบกับค่าที่วัดได้จริงเมื่อใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33 และ 5.34 จะสังเกตได้ว่าในช่วงความถี่ 0 – 2000 Hz พลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงและมีโหมดการสั่นสะเทือนตรงกับค่าพลังงานการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากการทดสอบ ซึ่งเมื่อความถี่การสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นค่าพลังงานการสั่นสะเทือนที่คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่วัดได้เพิ่มสูงขึ้น แต่จะยังมีโหมดการสั่นสะเทือนบางโหมดที่ยังคงตรงกัน ได้แก่ ที่ความถี่ประมาณ 4800 Hz, 5300 Hz, 5600 Hz, 6800 Hz, 9200 Hz, 9900 Hz, 10200 Hz, 12800 Hz, 15300 Hz, 15500 Hz และ 17200 Hz โดยจะสามารถสรุปปริมาณพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในแต่ละช่วงความถี่ให้อยู่ในรูปของตารางได้ ตามตารางที่ 5.12 ดังนี้

ตารางที่ 5.12 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จากหลักการ Statistical energy analysis กับค่าที่วัดได้จริงจากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

Model			Frequency (kHz)			Overall
			0 – 6.7	6.7 – 13.3	13.3 - 20	
1.5a _{normal}	1	W _{cal} (μJ)	2.821	0.154	0.00708	2.981
		W _{measured} (μJ)	1.591	0.0309	0.00130	1.623
		Error (%)	77.341	396.223	445.681	83.716
	2	W _{cal} (μJ)	1.809	0.152	0.00962	1.971
		W _{measured} (μJ)	0.997	0.0334	0.00185	1.032
		Error (%)	81.530	354.094	420.253	90.972
	3	W _{cal} (μJ)	2.147	0.142	0.00866	2.298
		W _{measured} (μJ)	1.679	0.0444	0.000285	1.723
		Error (%)	27.898	220.322	2942.231	33.340
0.5a _{normal}	1	W _{cal} (μJ)	0.351	0.0158	0.000784	0.368
		W _{measured} (μJ)	0.285	0.00322	0.0000846	0.289
		Error (%)	23.168	390.635	826.342	27.502

ตารางที่ 5.12 ผลการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จากหลักการ Statistical energy analysis กับค่าที่วัดได้จริงจากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

Model		Frequency (kHz)			Overall	
		0 – 6.7	6.7 – 13.3	13.3 - 20		
0.5a _{normal}	2	W_{cal} (μ J)	0.265	0.0168	0.00105	0.283
		$W_{measured}$ (μ J)	0.261	0.00332	0.000351	0.265
		Error (%)	1.517	405.5	200.047	6.851
	3	W_{cal} (μ J)	0.284	0.0158	0.000951	0.301
		$W_{measured}$ (μ J)	0.320	0.00471	0.0000506	0.325
		Error (%)	11.309	234.757	1780.917	7.459

เมื่อสังเกตผลการเปรียบเทียบปริมาณของพลังงานการสั่นสะเทือนในความถี่แต่ละช่วงตามตารางที่ 5.12 จะแสดงให้เห็นว่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่ประมาณค่าได้จากหลักการ Statistical energy analysis จะมีค่าคลาดเคลื่อนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความถี่ในการกระตุ้นมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะยังคงมีค่าสูงมาก โดยน่าจะเป็นผลมาจากสาเหตุหลายประการ ดังนี้

1. จะเป็นผลเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลอง โดยในงานวิจัยฉบับนี้ การทดสอบจะนำ Accelerometer มาติดที่บริเวณส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเพื่อวัดค่าและควบคุมความถี่การสั่นสะเทือนของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน และนำค่าที่วัดได้นี้มาใช้ในการคำนวณหา กำลังการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการกระตุ้น ทั้งที่ควรจะใช้ทรานซ์ดิวเซอร์แบบวัดแรงตึงระหว่างปลายของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนกับแบบจำลองเพื่อวัดค่าแรงการสั่นสะเทือน แล้วนำค่าที่วัดได้มาคำนวณเพื่อหาค่ากำลังการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการกระตุ้นจะมีความเหมาะสมมากกว่า

2. จะมีผลจากการนำแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนมาใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนสู่แบบจำลอง ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบไม่มากนักน้อย และเมื่อสังเกตสมการ (4-24) ที่นำมาใช้ในการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ จะสังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงและค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยจะส่งผลต่อค่าพลังงานการสั่นสะเทือนที่คำนวณได้โดยตรง เพราะฉะนั้นค่าความ

คลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจจะมีสาเหตุหนึ่งมาจากค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงและค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยก็เป็นได้

จากการทดสอบเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการนำหลักการ Statistical energy analysis มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือน จะสังเกตได้ว่าในช่วงการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำ หรือความถี่ประมาณ 0 – 2000 Hz การนำหลักการ Statistical energy analysis มาใช้ในการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนจะให้ผลที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงที่วัดได้ แต่ในช่วงความถี่การสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นการนำหลักการ Statistical energy analysis มาใช้ในการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนอาจจะให้ผลที่ไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนด้วยหลักการ Statistical energy analysis จะยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าพลังงานการสั่นสะเทือนจริงที่วัดได้อยู่ ซึ่งจะสังเกตได้จากโหมดการสั่นสะเทือนที่ตรงกันหลายจุดระหว่างพลังงานการสั่นสะเทือนที่คำนวณได้จากหลักการ Statistical energy analysis กับค่าจริงที่วัดได้นอกจากนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบ เช่น การนำทรานซ์ดิวเซอร์แบบวัดแรงมาใช้ในการวัดแรงการสั่นสะเทือนอย่างเหมาะสม และการเพิ่มจำนวนจุดวัดและจำนวนครั้งในการวัดค่าการสั่นสะเทือนในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากความหน่วงและค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย อาจจะส่งผลทำให้การประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนด้วยหลักการ Statistical energy analysis มีค่าใกล้เคียงค่าจริงที่วัดได้มากขึ้น ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตต่อไป

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 ผลสรุปงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ต่อการส่งผ่านพลังงานการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง แต่เนื่องจากการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านระหว่างส่วนประกอบทั้งสองให้ใกล้เคียงความเป็นจริงนั้นเป็นไปได้ยาก และการนำสปินเดิลมอเตอร์จริงซึ่งมีขนาดเล็กและมีกลไกที่ซับซ้อนมาใช้ในการทดสอบนั้นมีความลำบาก งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอการนำแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์เข้ามาใช้ในการทดสอบ ซึ่งแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ดังกล่าวจะประกอบจากส่วนประกอบสำคัญสองส่วน คือแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่ถูกออกแบบให้มีรูปร่างคล้ายเดิมแต่มีขนาดใหญ่กว่าสปินเดิลมอเตอร์จริงประมาณ 1.5 เท่า และแบบจำลองแต่ละชุดจะมีค่า Interference fit ต่าง ๆ กัน นอกจากนี้จะนำหลักการ Statistical energy analysis ซึ่งเป็นหลักการที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีทางด้านพลังงานเข้ามาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบและประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ผลดังกล่าวจะทำให้เข้าใจถึงผลของค่า Interference fit ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองได้ โดยจะสามารถสรุปผลในงานวิจัยได้ ดังต่อไปนี้

งานวิจัยฉบับนี้จะเริ่มจากการศึกษากลไกการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการประยุกต์ความสัมพันธ์ระหว่างกลไกแรงเสียดทานผิวสัมผัสกับการสูญเสียพลังงานการสั่นสะเทือนเนื่องจากความหน่วงของแรงเสียดทานของ Metherell และ Diller [6] ซึ่งได้จำลองปรากฏการณ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในลักษณะของแผ่นชิ้นงานสองแผ่นประกบติดกันและเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันอย่างช้า ๆ โดยในการประยุกต์จะเปลี่ยนจากความสัมพันธ์ระหว่างแผ่นชิ้นงานสองแผ่นไปเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเพลลาและทรงกระบอกกลวงประกอบเข้าด้วยกันแบบแน่น (Interference fit) และเกิดการหมุนสัมพัทธ์กันอย่างช้า ๆ โดยผลจากการประยุกต์ดังกล่าวจะทำให้เข้าใจผลของค่า Interference fit ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้ คือ เมื่อส่วนประกอบทั้งสองเกิดการเคลื่อนที่เชิงมุมสัมพัทธ์กันในลักษณะของการเลื่อนไถลแบบ

จุลภาค (Micro-slip) พลังงานการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านระหว่างผิวสัมผัสของส่วนประกอบทั้งสองจะเกิดการสูญเสียหายไปเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสนั้น โดยเมื่อค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น จะเป็นการเพิ่มแรงดันและแรงเสียดทานผิวสัมผัส ส่งผลทำให้พลังงานที่สูญเสียหายไปเนื่องจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าลดต่ำลง ซึ่งหมายความว่าพลังงานการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้มากขึ้นเมื่อค่า Interference fit มีค่าเพิ่มขึ้น และในทางกลับกัน เมื่อค่า Interference fit มีค่าลดต่ำลง จะส่งผลทำให้พลังงานการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้น้อยลงนั่นเอง แต่จากข้อจำกัดของทฤษฎีของ Metherell และ Diller [6] ที่สมมติให้วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์หมุนสัมผัสกันอย่างช้า ๆ แรงที่เกิดขึ้นภายในขึ้นทดสอบจึงอยู่ในลักษณะของ Quasi-static load ทำให้การคำนวณค่าต่าง ๆ สามารถละทิ้งผลจากความเฉื่อยได้ เพราะฉะนั้นพลังงานสูญเสียที่เกิดจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่คำนวณได้จากการประยุกต์ทฤษฎีของ Metherell และ Diller [6] จึงเป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น ไม่ใช่ค่าที่เกิดขึ้นจริงในการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ตามปกติ จากผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่อไป คือ การประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการศึกษาผลของค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองโดยใช้แบบจำลองในการทดสอบ

ในการทดสอบเพื่อศึกษาผลของค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์โดยการประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis มาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้นจะนำปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์เข้ามาใช้เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชุดที่มีค่า Interference fit ต่าง ๆ กัน โดยสามารถแบ่งผลการทดสอบออกได้เป็นสองส่วนตามอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการกระตุ้นแบบจำลองในการทดสอบ คือ ค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน โดยในส่วนของ การทดสอบด้วยค้อนเคาะ ผลที่ได้จะพบว่าในช่วงความถี่ 0 – 20 kHz แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ซึ่งมีค่า Interference fit สูงที่สุด จะมีกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์สูงสุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 3, 5, 2 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมลดต่ำลงตามลำดับ โดยเมื่อลองแยกช่วงความถี่ในการวิเคราะห์ปริมาณของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมออกเป็นสามช่วง ได้แก่ 0

- 6.7 kHz, 6.7 - 13.3 kHz และ 13.3 - 20 kHz จะสังเกตได้ว่า ในช่วงความถี่ต่ำหรือช่วง 0 - 6.7 kHz แบบจำลองชุดที่ 1 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมสูงที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 3, 5, 2 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนลดต่ำลงตามลำดับ และในช่วงความถี่กลางหรือช่วง 6.7 - 13.3 kHz แบบจำลองชุดที่ 1 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมต่ำที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 2, 5, 3 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ และในช่วงความถี่สูงหรือช่วง 13.3 - 20 kHz แบบจำลองชุดที่ 2 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมต่ำที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 1, 5, 3 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยจากผลการทดสอบทั้งหมดด้วยค้อนเคาะจะสามารถสรุปได้ว่า ในช่วงความถี่กลาง หรือ 6.7 - 13.3 kHz ค่าของ Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปริงเดลิโมเตอร์จะส่งผลโดยตรงต่อกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองอย่างชัดเจน โดยเมื่อค่า Interference fit ระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าลดต่ำลง จะส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปริงเดลิโมเตอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อค่า Interference fit มีค่าลดลงจนเกินค่าหนึ่ง ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจะมีแนวโน้มลดต่ำลงแทน ดังจะสังเกตได้จากในช่วงความถี่กลาง แบบจำลองชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ แต่แบบจำลองชุดที่ 5 ซึ่งมีค่า Interference fit ต่ำที่สุด กลับมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมลดลงจากแบบจำลองชุดที่ 4 ซึ่งมีค่า Interference fit สูงกว่า นอกจากนั้นผลของค่า Interference fit ต่อกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองในช่วงความถี่ต่ำ, ความถี่สูง และความถี่รวมจะยังไม่สามารถหาแนวโน้มได้อย่างชัดเจน จึงทำให้ยังไม่สามารถสรุปได้ขั้นตอนนี้ ซึ่งอาจจะเกิดจากผลของการใช้ค้อนเคาะในการทดสอบก็เป็นได้ เนื่องจากการควบคุมแรงกระตุ้นจากค้อนเคาะในแต่ละรอบให้คงที่นั้นเป็นไปได้ยาก และการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นแบบจำลองที่แต่ละความถี่ด้วยแรงที่เท่า ๆ กันนั้นไม่สามารถทำได้ ในขั้นตอนต่อไปจึงได้นำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเข้ามาใช้ในทดสอบแทนค้อนเคาะ

เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจะมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นคือ สามารถควบคุมแรงที่ใช้ในการกระตุ้นในแต่ละครั้งให้คงที่และสามารถควบคุมให้แรงที่กระตุ้นที่ทุกความถี่มีค่าเท่า ๆ กันได้ โดยในการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเข้ามาใช้ในการทดสอบจะมีประเด็นที่สำคัญประการหนึ่ง คือ แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนสู่ชิ้นทดสอบ จะมีผลโดยตรงต่อผลการ

ทดสอบที่ได้ในส่วนนี้ ยกตัวอย่างเช่น ทำให้โหมดการสั่นสะเทือนเกิดการเลื่อน หรือ ผลการทดสอบที่ได้จะมีโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนเข้าไปเกี่ยวข้อง เป็นต้น จากผลกระทบดังกล่าวจึงทำให้ต้องทำการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อผลการทดสอบน้อยที่สุดในงานวิจัยฉบับนี้ คือ แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่ผลิตจากอะลูมิเนียมขนาด 9 นิ้ว

ในส่วนของการทดสอบการสั่นสะเทือนกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและประยุกต์หลักการ Statistical energy analysis ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้น จะพบว่าในช่วงความถี่รวม คือ 0 – 20 kHz แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 ซึ่งมีค่า Interference fit สูงที่สุด จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่สูงสุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 2, 3, 5 และ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมลดต่ำลงตามลำดับ โดยเมื่อลองแบ่งช่วงความถี่ในการวิเคราะห์ห้ออกเป็นสามช่วง คือ 0 – 6.7 kHz, 6.7 – 13.3 kHz และ 13.3 – 20 kHz จะสังเกตได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำหรือ 0 – 6.7 kHz แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 จะยังคงมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมสูงที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 2, 3, 5 และ 4 เช่นเดียวกับช่วงความถี่รวม ส่วนในช่วงความถี่กลางหรือ 6.7 – 13.3 kHz แบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมต่ำที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 5, 4, 2 และ 3 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ และในช่วงความถี่สูงหรือ 13.3 – 20 kHz แบบจำลองชุดที่ 4 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมสูงที่สุด รองลงมา คือ แบบจำลองชุดที่ 1, 2, 3 และ 5 จะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนลดต่ำลงตามลำดับ โดยจากผลของกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมที่ได้จากการทดสอบในช่วงความถี่รวมและในช่วงความถี่ต่ำ จะให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์มีค่า Interference fit ลดต่ำลง จะส่งผลทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์มีค่าลดต่ำลง โดยเมื่อค่า Interference fit ลดต่ำลงมากกว่าค่าหนึ่ง ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแทน นอกจากนี้ในช่วงความถี่กลาง จะสังเกตได้ว่าเมื่อค่า Interference fit มีค่าลดต่ำลง ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อค่า Interference fit ลดต่ำลงมากกว่าค่าหนึ่ง ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจะมีแนวโน้มลดต่ำลงแทน ซึ่งผลที่ได้นี้จะไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบด้วยค้อนเคาะในช่วงความถี่กลาง ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสังเกตได้ว่า ผลที่ได้จะไม่สามารถหาแนวโน้มที่ชัดเจน

ได้ จึงยังไม่สามารถสรุปผลของค่า Interference fit ต่อกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองในช่วงความถี่ดังกล่าวได้ โดยทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากการนำแก่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนมาใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนสู่ชั้นทดสอบ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบก็เป็นได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์จะอยู่อย่างหนาแน่นในช่วงความถี่ต่ำและความถี่กลาง และในช่วงความถี่ต่ำจะมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมสูงกว่าในช่วงความถี่กลางและความถี่สูง จึงสามารถนำแนวโน้มของผลของค่า Interference fit ต่อกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมระหว่างส่วนประกอบทั้งสองในช่วงความถี่รวมซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับแนวโน้มในช่วงความถี่ต่ำมาเป็นผลสรุปของงานวิจัยฉบับนี้ได้ต่อไป

การทดสอบในขั้นตอนสุดท้าย คือ การทดสอบความน่าเชื่อถือของหลักการ Statistical energy analysis โดยผลที่ได้จะทำให้เห็นว่า การนำหลักการ Statistical energy analysis เข้ามาใช้ในการประมาณค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองขึ้นใด ๆ จะยังคงมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงมากอยู่ อย่างไรก็ตามก็จะสังเกตเห็นได้ว่า พลังงานการสั่นสะเทือนที่ประมาณค่าได้จากหลักการ Statistical energy analysis จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีโหมดการสั่นสะเทือนที่ตรงกันกับค่าพลังงานการสั่นสะเทือนจริงที่วัดค่าได้ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนดังกล่าว อาจะเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ อาจเป็นผลจากการนำค่าเฉลี่ยเข้าใช้ในการคำนวณตามหลักการของ Statistical energy analysis ซึ่งค่าดังกล่าวไม่ได้สะท้อนถึงผลทั้งหมดแต่อย่างใด และอาจจะเป็นผลมาจากการความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ากำลังที่ใช้ในการกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียต่าง ๆ ตามหลักการ Statistical energy analysis เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนภายในงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งค่าต่าง ๆ เหล่านี้จะส่งผลต่อค่าพลังงานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองที่ประมาณค่าได้โดยตรงนั่นเอง

6.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

สิ่งที่ได้รับจากงานวิจัยฉบับนี้จะมีหลายประการ ซึ่งจะสามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การลดค่า Interference fit ระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ จะส่งผลทำให้ค่ากำลังการสั่นสะเทือนรวมที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในช่วงความถี่รวม หรือ 0 –

20 kHz มีค่าลดลง โดยเมื่อลดค่า Interference fit จนเกินค่าหนึ่งไปแล้วจะส่งผลทำให้แนวโน้มของค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมเปลี่ยนไป คือ ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนรวมจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแทน โดยผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยฉบับนี้ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการลดการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านจากภายในสปินเดิลมอเตอร์จริงสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กลายเป็นเสียงรบกวนได้ต่อไป

2. หลักการ Statistical energy analysis ซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนภายในงานวิจัยฉบับนี้ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือนในขั้นทดสอบรูปแบบอื่นนอกเหนือไปจากแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ได้ โดยหลักการดังกล่าวจะมีหลักการที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย นอกจากนั้นยังใช้เวลาและมีความต้องการอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ที่ต่ำ ดังจะเห็นได้จากขั้นตอนในการทดสอบซึ่งไม่ซับซ้อน และสามารถใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่สามารถหาได้ทั่วไปในการคำนวณได้ จึงเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการศึกษาและการวิจัยอย่างมาก

3. ทำให้ทราบถึงวิธีการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเข้ามาประยุกต์ใช้ในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนนอกเหนือไปจากการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น นอกจากนั้นยังทำให้เห็นถึงข้อดีและข้อด้อยของการนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งสามารถนำไปปรับปรุงและแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทดสอบได้ในอนาคต

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาต่อในอนาคต

จากการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือนโดยการกระตุ้นทางกลด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ภายในงานวิจัยฉบับนี้ ได้แก่ ค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะสามารถสรุปข้อดี, ข้อเสียของการใช้เครื่องมือแต่ละอย่าง และคำแนะนำเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาต่อในอนาคตได้ ดังนี้

1. เมื่อนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการกระตุ้น ผลตอบสนองที่บันทึกได้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ในแต่ละครั้งที่กระตุ้น นอกจากนั้นแรงสั่นสะเทือนที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลองยังสามารถควบคุมให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่สนใจได้โดยการปรับค่าผ่านเครื่อง DSA ซึ่งแตกต่างจากการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น ซึ่งแรงที่ได้จากการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะจะมีขนาดลดลงเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้โหมดการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูงปรากฏไม่เด่นชัด

2. โหมดการสั่นสะเทือนที่สังเกตได้จากผลตอบสนองเชิงความถี่ที่บันทึกได้จากแบบจำลองแต่ละจุดจะค่อนข้างตรงกันเมื่อนำเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนมาใช้ในการกระตุ้น ซึ่งแตกต่างจากการใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้นซึ่งผลตอบสนองเชิงความถี่มีค่าค่อนข้างกว้างในแต่ละจุดที่บันทึกค่าได้

3. จากการกระตุ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน จะสังเกตได้ว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ที่บันทึกได้จะมีโหมดการสั่นสะเทือนของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้องและทำให้เกิดการเคลื่อนของโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้ เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมที่สุดก่อนนำไปใช้ทุกครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่จะนำมาใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนของโหมดการสั่นสะเทือนที่น้อยที่สุด และทำให้โหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบเด่นชัด

4. เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือในการทำการทดสอบ จึงทำให้ต้องผลิตแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนขึ้นเอง และต้องนำ Accelerometer และเครื่อง LDV มาใช้วัดสัญญาณอินพุตแทนที่ทรานส์ดีวเซอร์แบบวัดแรงที่มีราคาค่อนข้างสูง เพราะฉะนั้นผู้ที่สนใจในการทำการทดสอบจึงสามารถนำแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่มีความเหมาะสมและทรานส์ดีวเซอร์แบบวัดแรงที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทดสอบครั้งต่อ ๆ ไปได้

5. เมื่อต้องการผลิตแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบ ควรจะมีน้ำหนักเบา, มีค่าแข็งเกร็งต่อการงอ (Bending Stiffness) ที่ต่ำ และมีค่าแข็งเกร็งตามแนวแกน (Axial Stiffness) ที่สูงเพื่อให้โหมดการสั่นสะเทือนมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ส่วนความยาวของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนนั้นจะไม่มีค่าความยาวที่เหมาะสมและแน่นอน เนื่องจากถ้าความยาวของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนนั้นสั้นเกินไป จะทำให้มีผลจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ถ้าความยาวของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนนั้นยาวเกินไป จะทำให้ค่า Axial Stiffness มีค่าต่ำลง เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการทดสอบเพื่อหาความยาวที่เหมาะสมของแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] Beranek, LL., and Ver, IL. Noise and vibration control engineering: principles and applications, New York: Wiley, 1992.
- [2] Ajavakom, N.; Sripakagorn, P.; Singhatanadgid, P.; and Jintanawan, T. Toward a vibro-acoustic analysis of FBD spindle motors. ASME/JSME joint conference on micromechatronics for information and precision equipment, Santa Clara, California, 2006.
- [3] Jintanawan, T.; Sillapapinij, A.; and Ajavakom, N. Effect of tolerance design on suppression of electromagnetic-induced acoustic noises and vibration transmission in hard disk drive spindle motors. IEEE Transactions on Magnetics 45 (November 2009): 5129-34.
- [4] Bi, Ci.; Jiang, Q.; Lin, S.; Low, TS.; and Mamun, AA. Reduction of acoustic noise in FBD spindle motors by using drive technology. IEEE Transactions on Magnetics 39 (2003): 800-5
- [5] Jintanawan, T.; Chungphaisan, K.; Liwcharoenchai, K.; Junkaew, P.; and Singhatanadgid, P. Role of stator-base interference fit on vibration transmission and acoustic noise in FBD spindle motors for HDD. ASME information storage and processing systems conference, Santa Clara, California (June 2007): 261-3
- [6] Metherell, A. F., and Diller, S. V. Instantaneous energy dissipation rate in a lap joint: Uniform clamping pressure. Journal of Applied Mechanics (March 1968): 123-8
- [7] Sarradj, E. Energy-based vibroacoustics: SEA and beyond. CFA/DAGA, Strasbourg, 2004.
- [8] Lyon, R.H., and Dejong, R.H. Theory and Application of Statistical Energy Analysis, 2nd ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 1995.
- [9] Cimerman, B., Bharj, T., and Borello, G., Overview of the Experimental Approach to Statistical Energy Analysis, SAE Technical Paper 971968, 1997
- [10] Gieras, J.F., Wang, C., and Cho Lai, J. Noise of Polyphase Electric Motors, pp. 257-299. CRC Press, 2006.

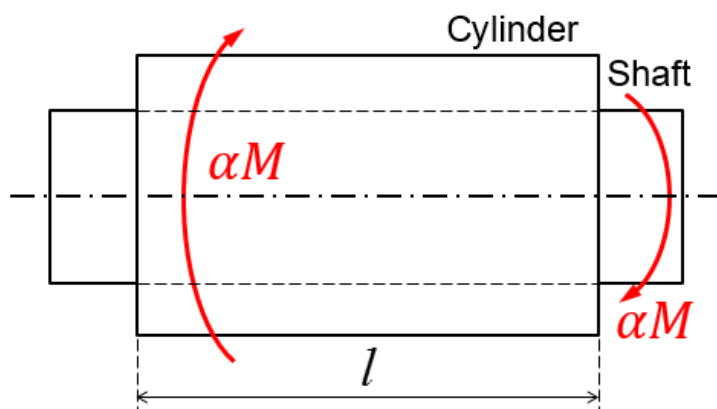
- [11] Delaere, K., Iadevaia, M., Heylen, W., Sas, P., Hameyer, K. and Belmans, R. Statistical Energy Analysis of Acoustic Noise and Vibration for Electric Motors: Transmission from Air gap Field to Motor Frame. Industry Application Conference 3 (October 1999): 1897-1902
- [12] Koizumi, T., Tsujiuchi, N., Tanaka, H., Okubo, M., and Shinomiya, M. Prediction of the vibration in buildings using statistical energy analysis. Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference (IMAC), Los Angeles, California, 2002.
- [13] Kim, M.J., Kim, H.S., and Sohn, J.Y. Prediction and evaluation of impact sound transmission in apartment building structures by statistical energy analysis. Applied Acoustics 62 (June 2001): 601-16
- [14] กรานต์ จีงไพศาล, ก้องกิติ ลีวเจริญชัย, และ พุฒิพร จันทร์แก้ว, การศึกษาลักษณะโครงสร้างและการประกอบสปินเดิลมอเตอร์สำหรับ Hard Disk Drives ที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนและเสียง, โครงการปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การประยุกต์ทฤษฎีของ Metherell และ Diller ในการศึกษาความสัมพันธ์
ระหว่างกลไกแรงเสียดทานผิวสัมผัสของวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐาน
ของสปินเดิลมอเตอร์กับการสูญเสียพลังงานการสั่นสะเทือนเนื่องจาก
ความหน่วงจากแรงเสียดทาน

ก.1 แรงเสียดทานบิดต่อหน่วยความยาว (Torsional friction per unit length)



รูปที่ ก-1 แบบจำลองการสวมอัดระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในสองมิติ

จากรูปที่ ก-1 จะเป็นแบบจำลองการสวมอัดระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในสองมิติ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเพลลาและทรงกระบอกกลวงสวมเข้าด้วยกัน โดยเมื่อทรงกระบอกกลวงมีแรงบิด αM มากกระทำ จะเกิดแรงเสียดทานขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ แรงเสียดทานดังกล่าวจะส่งผลทำให้เกิดการกระจัดเชิงมุม (Angular displacement) ที่บริเวณด้านนอกผิวสัมผัสของทั้งสองด้าน แรงเสียดทานผิวสัมผัสนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ (ก-1) ดังนี้

$$m = 2\pi\mu pR^2 \quad (\text{ก-1})$$

โดย m คือ แรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาว (Frictional torque per unit length) (Nm/m)

μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction)

p คือ ความดันที่เกิดจากการสวมอัดระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพลลา (Pa)

R คือ รัศมีของ shaft (m)

ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดภายในและระยะขจัดเชิงมุม

การวิเคราะห์หาพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส จะพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดภายในและระยะขจัดเชิงมุมที่

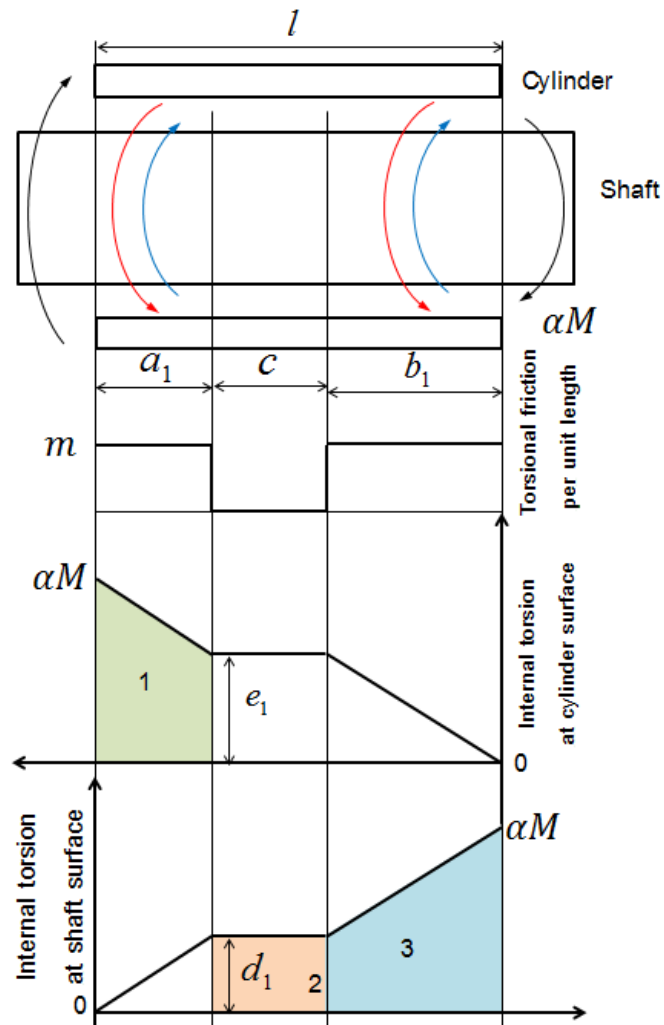
เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแรงบิดกระทำจากภายนอก โดยจากการสมมติให้เพลลาและทรงกระบอก กลวงเกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันอย่างช้า ๆ ตามการศึกษาของ Metherell และ Dilller [6] แรงที่เกิดขึ้นภายในขึ้นทดสอบจึงอยู่ในลักษณะของ Quasi-static load ทำให้สามารถละทิ้งผลจากความเฉื่อยได้ และสามารถแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. Loading phase

จากรูปที่ ก-2 จะแสดงแผนภาพของแรงเสียดทานแบบแรงบิดระหว่างผิวสัมผัส และความสัมพันธ์ของแรงบิดภายในเทียบกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสในขั้นตอน Loading phase แรงเสียดทานแบบแรงบิด (m) จะเกิดขึ้นด้านนอกของผิวสัมผัสระหว่าง ทรงกระบอกกลวงและเพลลาและทำให้เกิดระยะขจัดเชิงมุมขึ้น โดยมีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่ง ขึ้นอยู่กับความดันที่เกิดจากการสวมอัดระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง จากรูปที่ ก-2 เส้นสีแดงจะ แทนทิศของแรงเสียดทานบิดที่กระทำกับทรงกระบอกกลวง เส้นสีน้ำเงินจะแทนทิศของแรงเสียดทานแบบบิดที่กระทำกับเพลลา และจะสามารถแบ่งส่วนการเกิดระยะขจัดเชิงมุมระหว่างผิวสัมผัส ได้เป็นสามส่วน ส่วนแรก คือ ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นด้านซ้ายมือของแบบจำลอง จะเป็นผลมาจากแรงบิดภายในที่ส่งผ่านมาจากแรงบิดภายนอกที่กระทำกับทรงกระบอกกลวง แรงบิดดังกล่าว จะมีค่าลดลงด้วยอัตราคงที่ตลอดช่วง a_1 เนื่องจากถูกต้านด้วยแรงเสียดทานแบบแรงบิดระหว่าง ผิวสัมผัส ส่วนที่สอง คือ ช่วงผิวสัมผัสตรงกลางระหว่างซ้ายมือและขวามือ ซึ่งจะไม่เกิดระยะขจัดเชิงมุมเกิดขึ้น เนื่องจากแรงเสียดทานแบบแรงบิดระหว่างผิวสัมผัสในช่วงนี้มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ไม่เกิดการเลื่อนไถลระหว่างผิวสัมผัส (No - slip condition) ส่วนสุดท้าย คือ ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นด้านขวามือของแบบจำลอง จะเป็นผลมาจากแรงบิดภายในที่ส่งผ่านมาจากแรงบิดที่กระทำกับเพลลา ซึ่งแรงบิดนี้จะถูกต้านด้วยแรงเสียดทานแบบแรงบิดระหว่างผิวสัมผัสและมีค่าลดลงด้วย อัตราคงที่ตลอดช่วง b_1 เช่นเดียวกับด้านซ้ายมือของแบบจำลอง จากรูปที่ ก-2 จะสังเกตเห็นว่า แรงบิดภายในที่เกิดขึ้นบริเวณด้านนอกผิวสัมผัสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองจะมีค่าเพิ่มลดเป็น อัตราส่วนระหว่างกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผลรวมของแรงบิดภายในแต่ละช่วงความยาว ผิวสัมผัสของทรงกระบอกกลวงและเพลลาจะมีค่าเท่ากับแรงบิด αM ที่กระทำจากภายนอก ทรงกระบอกกลวง โดย α จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

ระยะขจัดเชิงมุมในแต่ละช่วงของผิวสัมผัสจะสามารถหาค่าได้จากการอินทิเกรต สมการความสัมพันธ์ของฮุก หรือสามารถหาค่าได้จากพื้นที่ใต้แผนภาพความสัมพันธ์ของแรงบิด

ภายในเทียบกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นในรูปที่ ก-2 ตลอดช่วงผิวสัมผัสนั้น ๆ ซึ่งผลรวมของระยะจัดเชิงมุมในแต่ละส่วนจะได้ระยะจัดเชิงมุมรวมในขั้นตอน Loading phase ดังนี้



รูปที่ ก-2 แผนภาพความสัมพันธ์ของแรงบิดภายในกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสในขั้นตอน Loading phase

โดย
$$k = \frac{G_s I_s}{G_s I_s + G_c I_c} \tag{ก-2}$$

$$\frac{G_s I_s}{G_c I_c} = \frac{k}{1-k} \tag{ก-3}$$

$$a_1 = k \frac{\alpha M}{m} \tag{ก-4}$$

$$b_1 = (1-k) \frac{\alpha M}{m} \tag{ก-5}$$

$$c = l - a_1 - b_1 \tag{ก-6}$$

$$d_1 = k\alpha M \quad (\text{ก-7})$$

$$e_1 = (1-k)\alpha M \quad (\text{ก-8})$$

จะสามารถหาระยะขจัดเชิงมุมในขั้นตอนนี้ได้จากสมการ ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \text{พื้นที่ใต้แผนภาพส่วนที่ 1} + \text{พื้นที่ใต้แผนภาพส่วนที่ 2} + \text{พื้นที่ใต้แผนภาพส่วนที่ 3} \\ &= \frac{1}{2} \frac{(\alpha M + e_1)}{G_c I_c} a_1 + \frac{d_1}{G_s I_s} c + \frac{1}{2} \frac{(d_1 + \alpha M)}{G_s I_s} b_1 \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha M + (1-k)\alpha M}{G_c I_c} \right) \left(k \frac{\alpha M}{m} \right) + \left(\frac{k\alpha M}{G_s I_s} \right) \left(l - k \frac{\alpha M}{m} - (1-k) \frac{\alpha M}{m} \right) + \\ &\quad \frac{1}{2} \frac{(k\alpha M + \alpha M)}{G_s I_s} (1-k) \left(\frac{\alpha M}{m} \right) \\ &= \frac{k\alpha M l}{G_s I_s} + \frac{1}{2} \left(\frac{(2-k)k}{G_c I_c} + \frac{(1-k^2)}{G_s I_s} - \frac{2k}{G_s I_s} \right) \left(\frac{\alpha^2 M^2}{m} \right) \\ &= \frac{k\alpha M l}{G_s I_s} + \frac{1}{2} \left((2-k)k \left(\frac{G_s I_s}{G_c I_c} \right) + 1 - 2k - k^2 \right) \left(\frac{\alpha^2 M^2}{G_s I_s m} \right) \\ &= \frac{k\alpha M l}{G_s I_s} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{2-k}{1-k} \right) k^2 + 1 - 2k - k^2 \right) \left(\frac{\alpha^2 M^2}{G_s I_s m} \right) \\ \phi_1 &= \frac{k\alpha M l}{G_s I_s} + \frac{1}{2} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{\alpha^2 M^2}{G_s I_s m} \right) \quad \text{โดย } 0 < \alpha < 1 \quad (\text{ก-10}) \end{aligned}$$

โดย ϕ_1 คือ ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในขั้นตอน Loading phase
 M คือ แรงบิดที่กระทำด้านนอกของทรงกระบอกลม (Nm)
 $G_c I_c$ คือ Torsional stiffness ของทรงกระบอกลม (Nm^2)
 $G_s I_s$ คือ Torsional stiffness ของทรงกระบอกลวด (Nm^2)
 k คือ Torsional stiffness ของเพลลาเทียบกับผลรวมของ

Torsional stiffness ทรงกระบอกลมและเพลลา

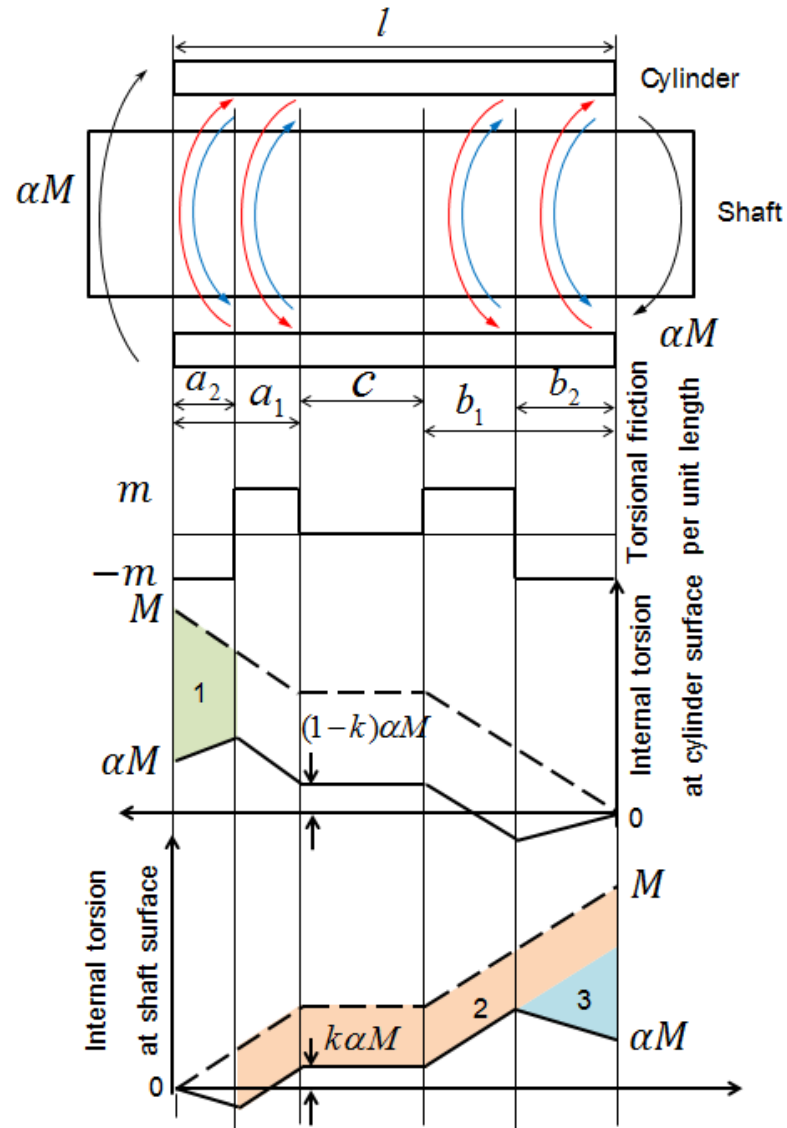
l คือ ความยาวของบริเวณผิวสัมผัสระหว่างทรงกระบอกลมและเพลลา (m)

2. Unloading phase

จากรูปที่ ก-3 แรงบิด αM จากภายนอกที่กระทำกับทรงกระบอกกลวงจะมีค่าลดลงจากในขั้นตอน Loading phase โดยค่า α จะมีค่าลดลงจาก 1 สู่มูลค่า r ซึ่งเป็นค่าคงที่ใด ๆ และจะสังเกตได้ว่าแรงเสียดทานแบบแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสบริเวณปลายขอบทั้งสองด้านของแบบจำลองจะเกิดการกลับทิศเป็นทิศตรงกันข้าม ทำให้ค่า m มีค่าติดลบ ผลจากปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้ผิวสัมผัสบริเวณนั้นเกิด “ การเลื่อนไถลย้อนกลับ ” (Counter slip) และแรงบิดภายในในช่วงผิวสัมผัสช่วงนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานแบบแรงบิดจะไม่ได้ด้านเหมือนในขั้นตอนแรก แต่ช่วยเสริมแรงบิดให้มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นแรงบิดภายในส่วนอื่นนอกเหนือไปจากส่วนที่เกิดการเลื่อนไถลย้อนกลับจะมีลักษณะคล้ายกับขั้นตอนแรก และผลรวมของแรงบิดภายในของทรงกระบอกกลวงและเพลายังมีค่าเท่ากับ αM เช่นเดิมในทุก ๆ ช่วงของระยะผิวสัมผัสของส่วนประกอบทั้งสอง ซึ่งผลรวมของระยะขจัดเชิงมุมในขั้นตอนนี้จะสามารถคำนวณหาได้จากการนำระยะขจัดที่คำนวณได้ในขั้นตอนแรกกลับด้วยพื้นที่ใต้แผนภาพจากขั้นตอนนี้ ดังนี้

$$\text{โดย} \quad a_2 = \frac{1}{2} \frac{(M_1 - \alpha M)}{m} k \quad (\text{ก-11})$$

$$b_2 = \frac{1}{2} \frac{(M_1 - \alpha M)}{m} (1 - k) \quad (\text{ก-12})$$



รูปที่ ก-3 แผนภาพความสัมพันธ์ของแรงบิดภายในกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสใน
ขั้นตอน Unloading phase

จะสามารถหาระยะขจัดเชิงมุมในขั้นตอนนี้ได้จากสมการ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \phi_2 &= \phi_1 - (\text{พื้นที่ใต้แผนภาพส่วนที่ 1} + \text{พื้นที่ใต้แผนภาพส่วนที่ 2} + \text{พื้นที่ใต้แผนภาพส่วนที่ 3}) \\
 &= \phi_1 - \frac{1}{2} \left(\frac{(M_1 - \alpha M) + (M_1 - \alpha M)(1-k)}{G_c I_c} \right) a_2 - \frac{(M_1 - \alpha M)}{G_s I_s} k (l - a_2) \\
 &\quad - \frac{1}{2} \left(\frac{(1-k)(M_1 - \alpha M)}{G_s I_s} \right) b_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \phi_1 - \frac{1}{4} \left(\frac{(2-k)k}{mG_c I_c} \right) (M_1 - \alpha M)^2 - \frac{(M_1 - \alpha M)}{G_s I_s} kl + \frac{1}{2} \frac{(M_1 - \alpha M)^2}{mG_s I_s} k^2 \\
&- \frac{1}{4} \frac{(1-k)^2}{G_s I_s} \frac{(M_1 - \alpha M)^2}{m} \\
&= \phi_1 - \frac{(M_1 - \alpha M)}{G_s I_s} kl - \frac{1}{4} \left(\frac{(2-k)k}{G_c I_c} - \frac{2k^2}{G_s I_s} - \frac{(1-k)^2}{G_s I_s} \right) \frac{(M_1 - \alpha M)^2}{m} \\
&= \phi_1 - \frac{(M_1 - \alpha M)}{G_s I_s} kl - \frac{1}{4} \left(\frac{G_s I_s}{G_c I_c} (2-k)k - 2k^2 - (1-k)^2 \right) \frac{(M_1 - \alpha M)^2}{mG_s I_s} \\
&= \phi_1 - \frac{(M_1 - \alpha M)}{G_s I_s} kl - \frac{1}{4} \left(\frac{(2-k)k^2}{1-k} - 2k^2 - (1-k)^2 \right) \frac{(M_1 - \alpha M)^2}{mG_s I_s} \\
&= \phi_1 - \frac{(M_1 - \alpha M)}{G_s I_s} kl - \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \frac{(M_1 - \alpha M)^2}{mG_s I_s} \\
&= \frac{kM_1 l}{G_s I_s} + \frac{1}{2} \left(\frac{1-k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{M_1^2}{G_s I_s m} \right) - \frac{(M_1 - \alpha M)}{G_s I_s} kl - \\
&\frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \frac{(M_1 - \alpha M)^2}{mG_s I_s} \\
&= \frac{k\alpha M l}{G_s I_s} + \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{2M_1^2 - (M_1 - \alpha M)^2}{G_s I_s m} \right) \quad (ก-13)
\end{aligned}$$

โดย $M_1 = M$ และ $0 < \alpha < 1$ เพราะฉะนั้นสมการที่ (ก-13) จะจัดรูปใหม่ได้
ดังนี้

$$\begin{aligned}
&= \frac{k\alpha M l}{G_s I_s} + \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{2M^2 - (1-\alpha)^2 M^2}{G_s I_s m} \right) \\
\phi_2 &= \frac{k\alpha M l}{G_s I_s} + \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) (1+2\alpha - \alpha^2) \frac{M^2}{G_s I_s m} \quad \text{โดย } r < \alpha < 1 \quad (ก-14)
\end{aligned}$$

โดย ϕ_2 คือ ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในขั้นตอน Unloading

3. Reloading phase

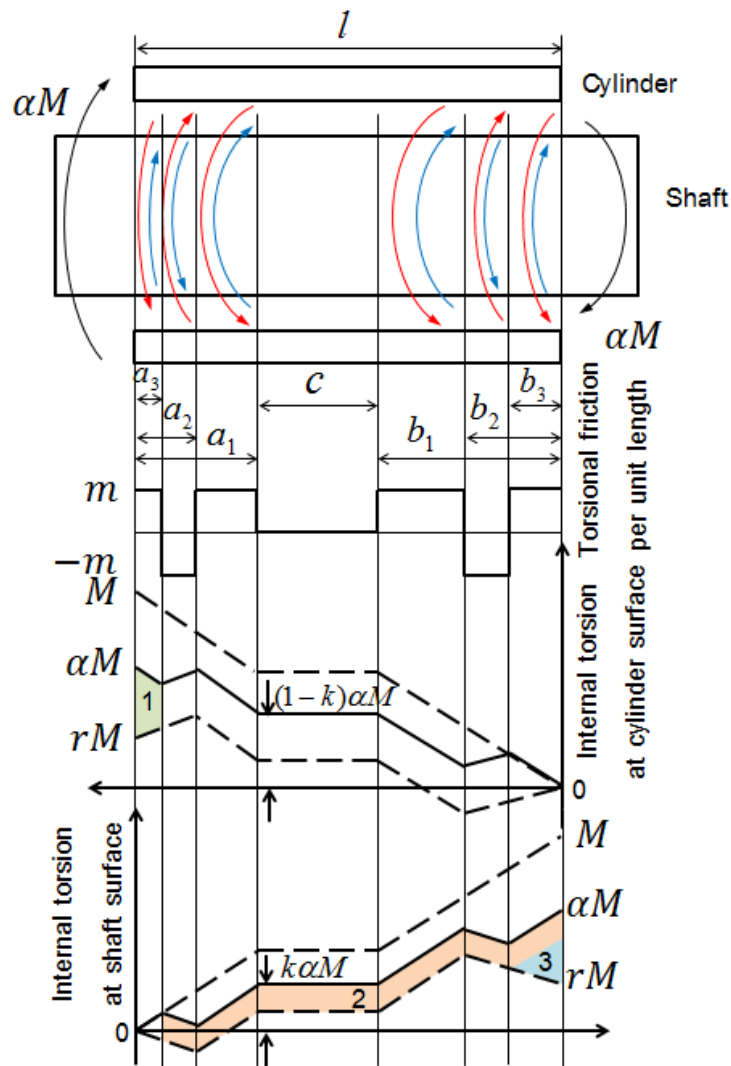
ในขั้นตอนนี้ แรงบิดภายนอก αM ที่กระทำทรงกระบอกกลวงจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากขั้นตอน Unloading phase โดย α จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก r จนกระทั่งถึง 1 จากรูปที่ ก-4 จะสังเกตได้ว่าแรงเสียดทานแบบแรงบิดบริเวณขอบนอกของแบบจำลองทั้งสองด้านจะกลับทิศทาง

อีกครั้งหนึ่ง ทำให้ค่า m มีค่าเป็นบวก ซึ่งทำให้บริเวณนั้นเกิดการเลื่อนไถลสวนทางสวนทางกับทิศทางในขั้นตอน Unloading phase โดยระยะขจัดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะสามารถคำนวณได้จากการนำระยะขจัดที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่สองมาบวกด้วยพื้นที่ระหว่างเส้นกราฟของขั้นตอนที่สองและขั้นตอนที่สาม ดังนี้

$$\text{โดย } a_3 = \frac{1}{2} \frac{(\alpha M - M_2)}{m} k \tag{ก-15}$$

$$b_3 = \frac{1}{2} \frac{(\alpha M - M_2)}{m} (1-k) \tag{ก-16}$$

$$M_2 = rM \tag{ก-17}$$



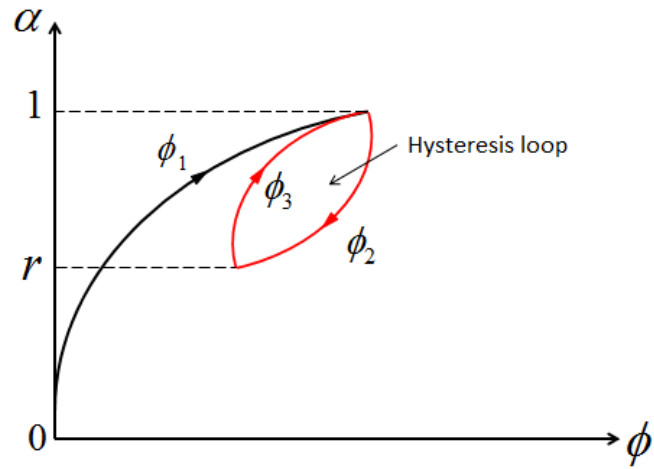
รูปที่ ก-4 แผนภาพความสัมพันธ์ของแรงบิดภายในกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสในขั้นตอน Reloading phase

จะสามารถหาระยะขจัดเชิงมุมในขั้นตอนนี้ได้จากสมการ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \phi_3 &= \phi_2 + (\text{พื้นที่ใต้แผนภาพส่วนที่ 1} + \text{พื้นที่ใต้แผนภาพส่วนที่ 2} + \text{พื้นที่ใต้แผนภาพส่วนที่ 3}) \\
 &= \phi_2 + \frac{1}{2} \frac{(\alpha M - rM)(2-k)}{G_c I_c} a_3 + \frac{(\alpha M - rM)k}{G_s I_s} (l - a_3) + \frac{1}{2} \frac{(\alpha M - rM)(1-k)}{G_s I_s} b_3 \\
 &= \phi_2 + \frac{1}{4} \frac{(\alpha M - rM)^2}{m G_c I_c} (2-k)k + \frac{(\alpha M - rM)}{G_s I_s} kl - \frac{1}{2} \frac{(\alpha M - rM)^2}{m G_s I_s} k^2 + \\
 &\quad \frac{1}{4} \frac{(\alpha M - rM)^2}{m G_s I_s} (1-k)^2 \\
 &= \phi_2 + \frac{(\alpha M - rM)}{G_s I_s} kl + \frac{1}{4} \left(\frac{(2-k)k}{G_c I_c} - \frac{2k^2}{G_s I_s} + \frac{(1-k)^2}{G_s I_s} \right) \left(\frac{(\alpha M - rM)^2}{m} \right) \\
 &= \phi_2 + \frac{(\alpha M - rM)}{G_s I_s} kl + \frac{1}{4} \left(\left(\frac{k}{1-k} \right) (2-k)k - 2k^2 + (1-k)^2 \right) \left(\frac{(\alpha M - rM)^2}{m G_s I_s} \right) \\
 &= \phi_2 + \frac{(\alpha M - rM)}{G_s I_s} kl + \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{(\alpha M - rM)^2}{m G_s I_s} \right) \\
 &= \frac{krMl}{G_s I_s} + \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) (1+2r-r^2) \frac{M^2}{G_s I_s m} + \frac{(\alpha M - rM)}{G_s I_s} kl + \\
 &\quad \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{(\alpha M - rM)^2}{m G_s I_s} \right) \\
 &= \frac{k\alpha Ml}{G_s I_s} + \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) (1+2r-r^2 + (\alpha-r)^2) \frac{M^2}{G_s I_s m} \\
 \phi_3 &= \frac{k\alpha Ml}{G_s I_s} + \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) (1+2r-2\alpha r + \alpha^2) \frac{M^2}{G_s I_s m} \quad \text{โดย } r < \alpha < 1 \quad (\text{ก-18})
 \end{aligned}$$

โดย ϕ_3 คือ ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในขั้นตอน Reloading

เมื่อนำสมการของ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ที่คำนวณได้จากพื้นที่ใต้แผนภาพในแต่ละขั้นตอนมาวาดในแผนภาพเดียวกัน จะได้แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดเชิงมุม (ϕ) กับค่า α ดังนี้



รูปที่ 3-5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดเชิงมุมกับแรงบิดที่กระทำภายนอกทรงกระบอก
กลวง

จากรูปที่ 3-5 จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดเชิงมุมกับแรงบิดที่กระทำภายนอกทรงกระบอกกลวงตั้งแต่นั้นตอน Loading phase จนกระทั่งถึงขั้นตอน Reloading phase มาวาดเป็นแผนภาพ จะเกิดวงแหวนปิดเกิดขึ้น เรียกวงแหวนนี้ว่า “ Hysteresis Loop ” ซึ่งพื้นที่ภายในของวงแหวนปิดนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานสูญเสียที่เกิดจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของส่วนประกอบทั้งสอง สามารถหาพื้นที่ภายในของวงแหวนปิดนี้ได้จากการอินทิเกรตผลต่างของสมการ ϕ_2 และ ϕ_3 ดังนี้

$$E_{loss} = \int_{rM}^M \phi_2 - \phi_3 d(\alpha M) \quad (3-19)$$

=

$$\int_{rM}^M \left(\frac{k\alpha M l}{G_s I_s} + \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) (1+2\alpha - \alpha^2) \frac{M^2}{G_s I_s m} \right) - \left(\frac{k\alpha M l}{G_s I_s} + \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) (1+2r - 2\alpha r + \alpha^2) \frac{M^2}{G_s I_s m} \right) d(\alpha M)$$

=

$$\int_{rM}^M \left(\frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) (1+2\alpha - \alpha^2) \frac{M^2}{G_s I_s m} \right) - \left(\frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) (1+2r - 2\alpha r + \alpha^2) \frac{M^2}{G_s I_s m} \right) d(\alpha M)$$

$$= \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) \int_{rM}^M \left((1+2\alpha - \alpha^2) M^2 \right) - \left((1+2r - 2\alpha r + \alpha^2) M^2 \right) d(\alpha M)$$

$$= \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) \int_{rM}^M (2\alpha - 2r + 2\alpha r - 2\alpha^2) M^2 d(\alpha M)$$

$$= \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) \int_{rM}^M (2\alpha M^2 - 2rM^2 + 2r\alpha M^2 - 2\alpha^2 M^2) d(\alpha M)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) \int_{rM}^M (2M(\alpha M) - 2rM^2 + 2Mr(\alpha M) - 2(\alpha M)^2) d(\alpha M) \\
&= \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) \left(M(\alpha M)^2 - 2rM^2(\alpha M) + Mr(\alpha M)^2 - \frac{2}{3}(\alpha M)^3 \right) \Big|_{rM}^M \\
&= \\
&\frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) \left(M(M^2 - r^2 M^2) - 2rM^2(M - rM) + Mr(M^2 - r^2 M^2) - \frac{2}{3}(M^3 - r^3 M^3) \right) \\
&= \frac{1}{4} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) \left(1-r^2 - 2r + 2r^2 + r - r^3 - \frac{2}{3} + \frac{2}{3}r^3 \right) M^3 \\
&= \frac{2}{3} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) \left(\frac{1}{2}(1-r)M \right)^3
\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$E_{loss} = \frac{2}{3} \left(\frac{1-3k+3k^2}{1-k} \right) \left(\frac{1}{G_s I_s m} \right) (M_a)^3 \quad (\text{ก-20})$$

โดย $M_a = \frac{1}{2}(1-r)M$; $0 < r < 1$

E_{loss} คือ พลังงานสูญเสียที่เกิดจากกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์

M_a คือ แอมพลิจูดของแรงบิดที่กระทำภายนอกวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ในการทำการทดสอบทางด้านกลศาสตร์โดยการกระตุ้นทางกลจะใช้ อุปกรณ์และเครื่องมือในการวัด ดังต่อไปนี้

ข.1 Impact hammer & Signal conditioner

ในการทำการทดสอบทางด้านกลศาสตร์โดยการกระตุ้นทางกล ค้อนเคาะ (Impact hammer) จะเป็นอุปกรณ์หนึ่งในการใส่แรงเข้าสู่ระบบหรือชิ้นทดสอบในลักษณะของแรง ดล (Impulse) เพื่อให้โครงสร้างของชิ้นทดสอบเกิดการสั่นสะเทือน โดยที่ปลายของค้อนเคาะจะมีทรานสดิวเซอร์แบบวัดแรง (Force transducer) เพื่อวัดแรงที่ใช้ในการเคาะชิ้นทดสอบ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้ค้อนเคาะของ Piezotronics รุ่น 086D80 มีค่า sensitivity เท่ากับ 21.9 mV/N และมีช่วงของแรงที่วัดได้อยู่ระหว่าง -220 N ถึง 220 N และช่วงความถี่ของการวัดสูงสุดไม่เกิน 20 kHz ในการทดสอบ ค้อนเคาะจะต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge amplifier) ก่อนจะส่งสัญญาณของแรงในการเคาะเข้าสู่เครื่อง Dynamic signal analyzer ต่อไป โดยเครื่องขยายสัญญาณที่ใช้ในการวิจัยจะเป็นของ Piezotronics รุ่น 482A21 จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการกระตุ้นให้กับค้อนเคาะที่ 25 – 27 V และมีกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 2 – 20 mA อัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 1 ต่อ 1



รูปที่ ข-1 ค้อนเคาะ Piezotronics รุ่น 086D80



รูปที่ ข-2 เครื่องขยายสัญญาณ Piezotronics รุ่น 482A21

ข.2 Vibration exciter & Power amplifier

ในการทำการทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยการกระตุ้นทางกล ยังสามารถใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration exciter) ในการใส่แรงเข้าสู่ระบบหรือขึ้นทดสอบได้เช่นกัน โดยสามารถกำหนดความถี่และขนาดของการสั่นสะเทือนได้จากการป้อนสัญญาณจากเครื่อง Dynamic signal analyzer ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) เข้าสู่เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนได้ โดยในการวิจัยจะใช้เครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือนของ B&K รุ่น 4809 สามารถให้แรงได้สูงสุด 10 lbf หรือประมาณ 45 N, ให้ความเร่งสูงสุดได้ 736 m/s² และความเร็วสูงสุดได้ 1.65 m/s เมื่อไม่มีภาระ, มีช่วงความถี่การใช้งานอยู่ระหว่าง 10 Hz ถึง 20 kHz เมื่อไม่มีภาระ และรับกระแสได้สูงสุด 5 A(rms) โดยในการทำงานจะต่ออยู่กับ Power amplifier ของ B&K รุ่น 2706 เพื่อจ่ายกำลังให้กับเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน ซึ่งสามารถจ่ายได้สูงสุด 75 VA และมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 40 dB



รูปที่ ข-3 เครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือน B&K รุ่น 4809



รูปที่ ข-4 Power amplifier B&K รุ่น 2706

ข.3 Stinger

แท่งส่งแรงสั่นสะเทือน หรือ Stinger จะเป็นอุปกรณ์ที่จะนำมาติดเข้ากับจานสั่นสะเทือน (Vibration table) หรือส่วนเคลื่อนที่ (Moving element) ของเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน ดังแสดงในรูป ข-5 โดยทำหน้าที่ส่งแรงจากเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนไปสู่ชิ้นทดสอบเพื่อกระตุ้นโครงสร้างตรงจุดที่ต้องการให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยแท่งส่งแรงสั่นสะเทือนจะมีลักษณะตามรูป ข-6



รูปที่ ข-5 จานสั่นสะเทือนหรือส่วนเคลื่อนที่ที่จะนำแท่งส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนมาสวม



รูปที่ ข-6 แท่งส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนเมื่อผลิตเสร็จ

ข.4 Accelerometer

เป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบที่นำอุปกรณ์นี้ไปติด โดยค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปของความเร่ง ในการวิจัยจะใช้ทรานสดิวเซอร์แบบวัดความเร่งของ B&K DeltaTron รุ่น 4397A ซึ่งสามารถวัดความเร่งได้ในทิศทางเดียว คือ ทิศตั้งฉากกับผิวชิ้นทดสอบที่นำไปอุปกรณ์ไปติด และมีค่า Sensitivity เท่ากับ 9.63 mV/g โดยมีช่วงความถี่สำหรับการวัดการสั่นสะเทือนจะอยู่ที่ 1 Hz – 25 kHz



รูปที่ ข-7 ทหรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่ง B&K DeltaTron รุ่น 4397A

ข.5 Laser doppler vibrometer

เป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบโดยไม่ต้องนำอุปกรณ์ไปติดกับชิ้นทดสอบที่ต้องการจะวัด เนื่องจากเป็นทรานสดิวเซอร์แบบเลเซอร์ซึ่งอาศัยการยิงเลเซอร์กระทบกับผิวเพื่อวัดค่าการสั่นสะเทือน ค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปของความเร็วหรือระยะขจัดของผิวที่เลเซอร์ตกกระทบ เครื่อง LDV จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์สองส่วน คือ เครื่องยิงเลเซอร์ของ Polytec รุ่น OFV-551 และเครื่องควบคุมสัญญาณของ Polytec รุ่น OFV-5000 มีช่วงการวัดขึ้นอยู่กับค่า Resolution ที่เลือกใช้ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 – 50 mm/s/V และช่วงความถี่ของการวัดตั้งแต่ 0 – 350 kHz ความเร็วที่สามารถวัดได้มีตั้งแต่ 0.01 – 0.5 mm/s



รูปที่ ข-8 เครื่องยิงเลเซอร์ของ Polytec รุ่น OFV-551 และเครื่องควบคุมสัญญาณของ Polytec รุ่น OFV-5000

๗.6 Dynamic signal analyzer

เมื่อสามารถวัดค่าการสั่นสะเทือนได้จาก Laser Doppler vibrometer หรือ Accelerometer แล้ว เครื่องวิเคราะห์สัญญาณทางพลศาสตร์จะทำหน้าที่รับสัญญาณดังกล่าว นำไปประมวลผลด้วยวิธีการ Fast Fourier transform และแสดงผลการทดสอบในรูปแบบต่างๆ เช่น ผลตอบสนองเชิงความถี่ และผลตอบสนองเชิงเวลา เป็นต้น ในการวิจัยจะใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณทางพลศาสตร์ของ Agilent รุ่น 35670A มีช่วงความถี่ของการวิเคราะห์สัญญาณและการแสดงผลอยู่ระหว่าง 0.2 Hz – 51.2 kHz ความละเอียดของผลการวัดจะขึ้นอยู่กับการใช้ค่า Resolution ซึ่งมีให้เลือกตั้งแต่ 100 – 1600 lines มีช่องรับสัญญาณทั้งหมด 4 ช่อง และยังสามารถทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) โดยสามารถเลือกลักษณะของสัญญาณ และขนาดของสัญญาณได้จากหน้าจอแสดงผล



รูปที่ ๗-9 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณทางพลศาสตร์ Agilent รุ่น 35670A

๗.7 Sponge & String

ในการทดสอบการสั่นสะเทือนโดยการกระตุ้นทางกล จำเป็นต้องทำให้ชิ้นทดสอบอยู่ในลักษณะเหมือนลอยอยู่โดยไม่ได้สัมผัสวัตถุอื่น (Free boundary condition) เพื่อให้ได้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้เป็นผลมาจากการสั่นสะเทือนของโครงสร้างของชิ้นทดสอบเท่านั้น และไม่มีสัญญาณการสั่นสะเทือนจากโครงสร้างอื่น เช่น โต๊ะ และพื้น เป็นต้น ซึ่งสามารถทำได้โดยนำแบบจำลองของสปริงเดลมอเตอร์วางบนฟองน้ำที่นุ่มหรือแขวนอยู่กับเชือกที่มีความยืดหยุ่นสูงระหว่างการทดสอบ



รูปที่ ข-10 ฟองน้ำที่นำมาใช้รองชั้นทดสอบ

ภาคผนวก ค

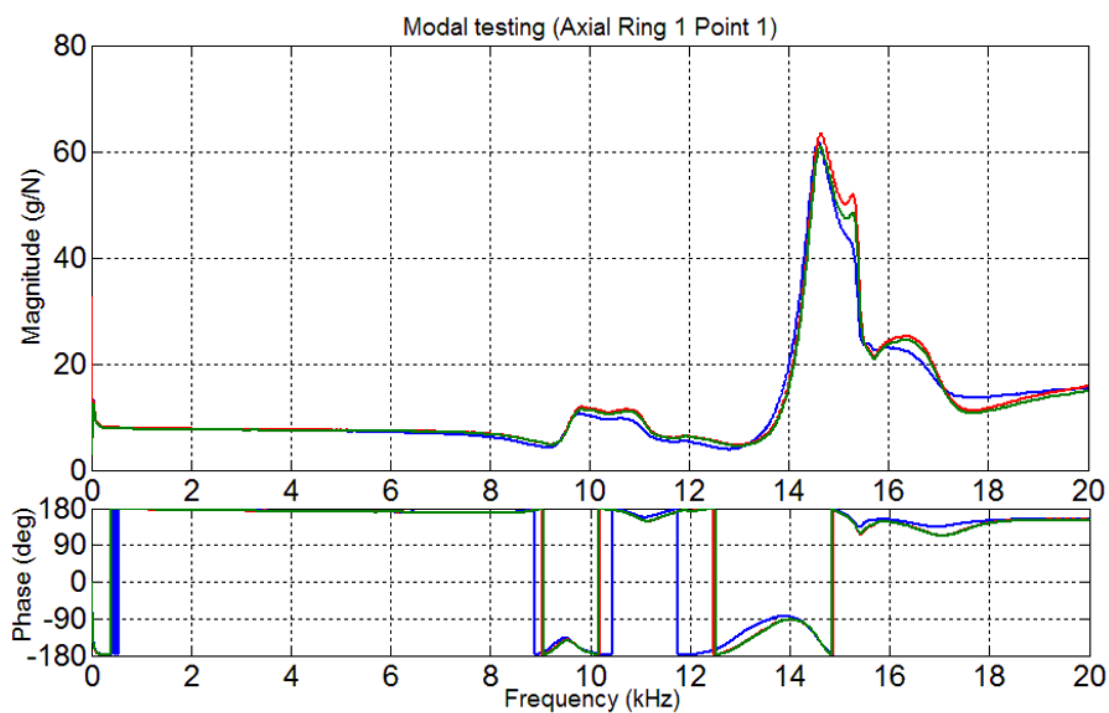
ผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของวงแหวน
ขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ

ผลจากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะจะแสดงอยู่ในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับเฟสของจุดวัดค่าการสั่นสะเทือน ณ จุดต่าง ๆ บนแบบจำลอง โดยผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองส่วนตามชนิดของแบบจำลอง คือ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ดังนี้

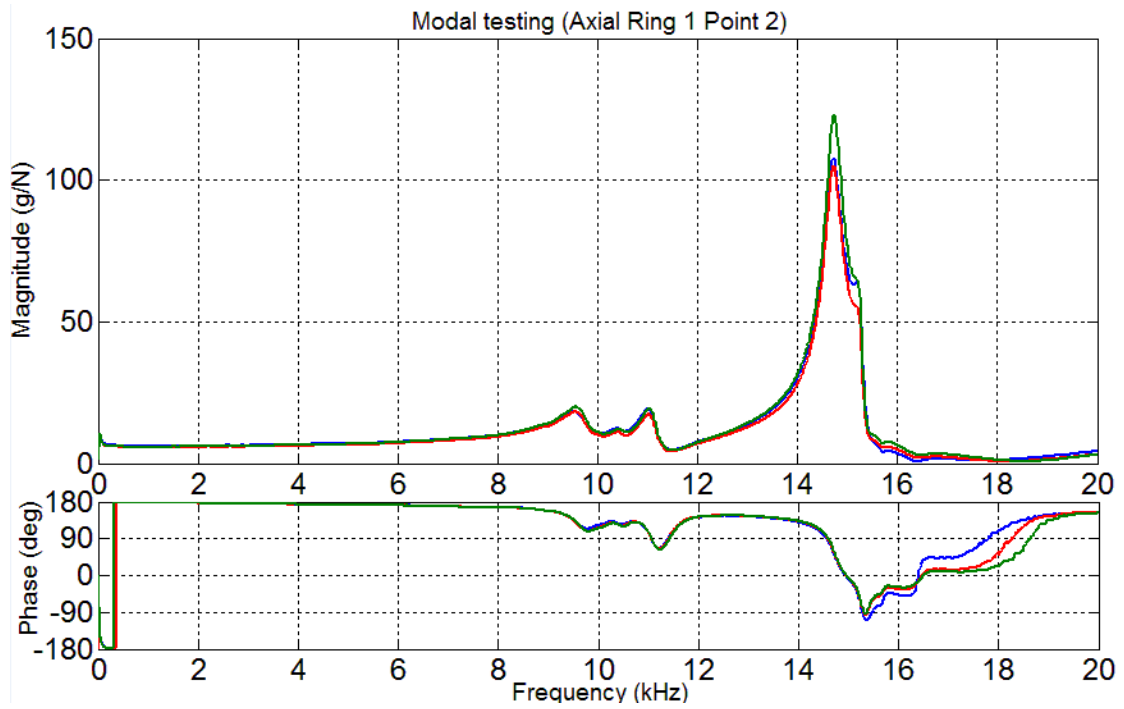
ค.1 ผลตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับเฟสของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

1. แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชิ้นที่ 1

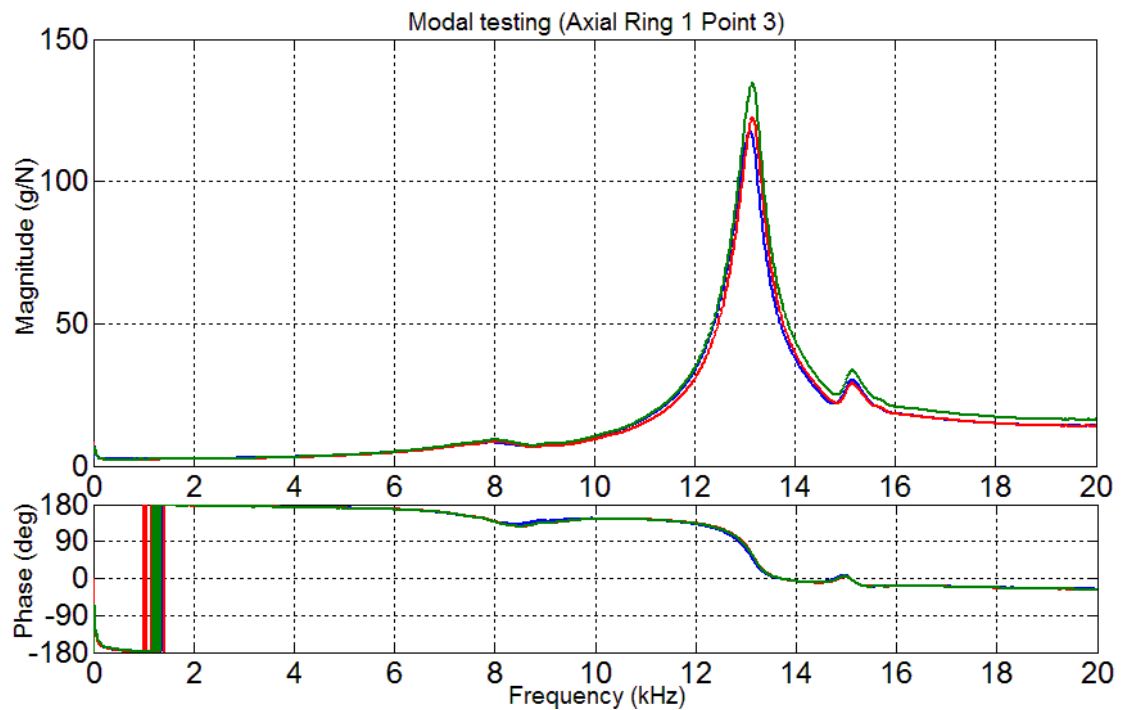
1.1 กระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



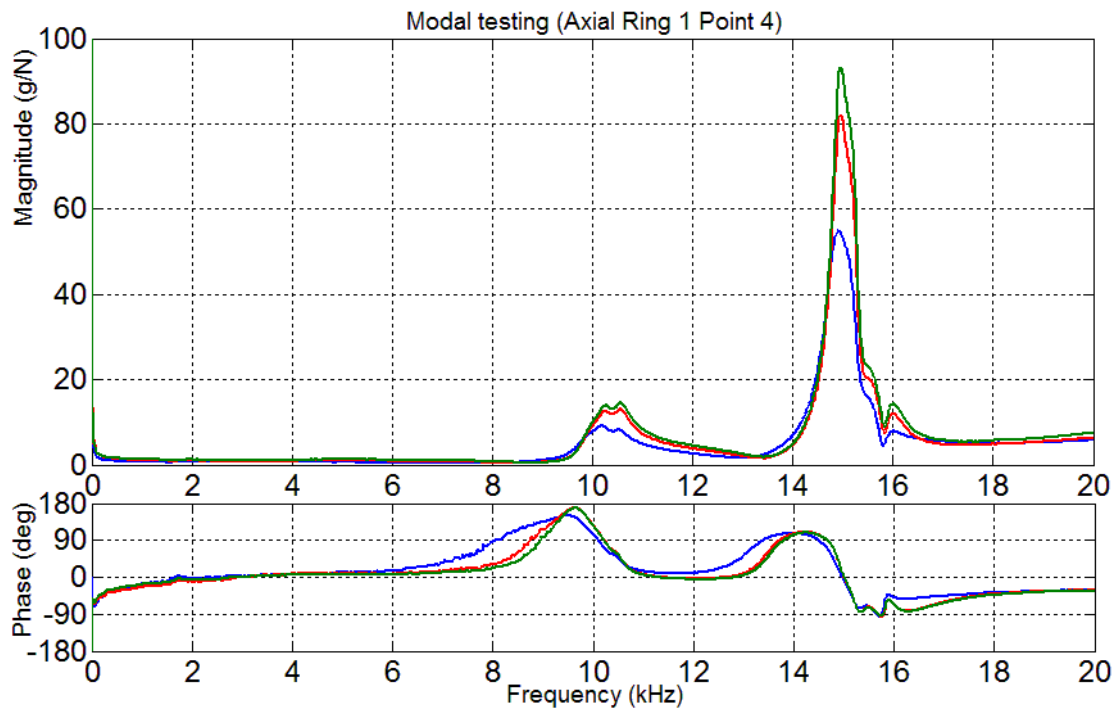
รูปที่ ค-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชิ้นที่ 1 จุดที่ 1
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



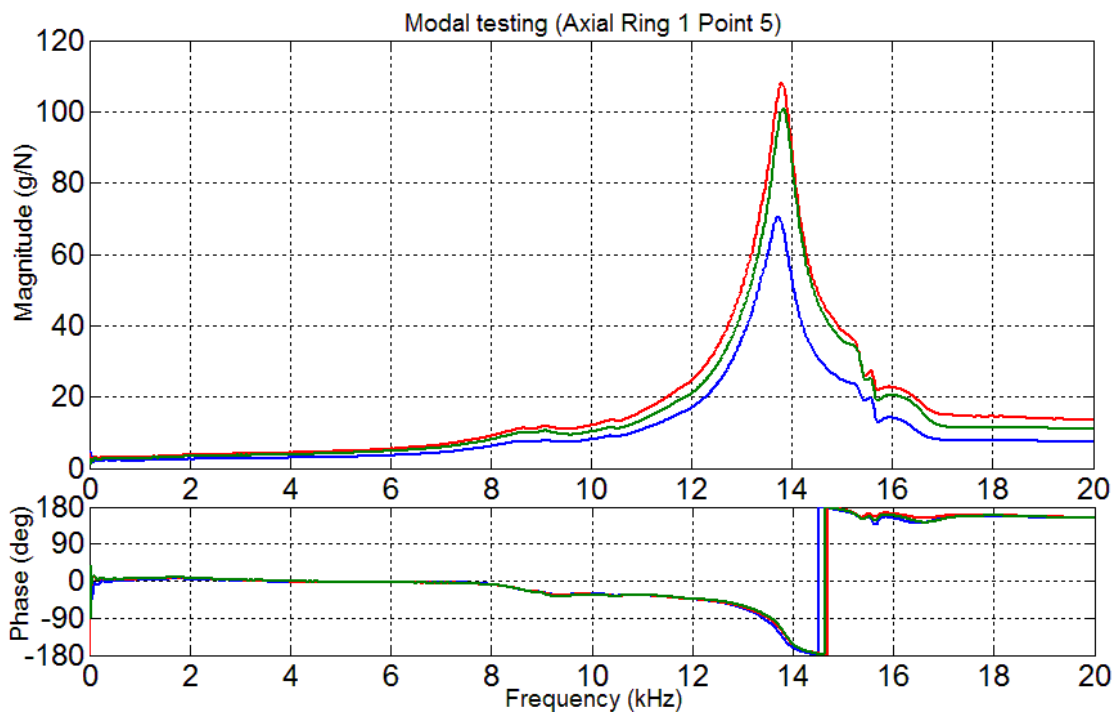
รูปที่ ค-2 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 จุดที่ 2
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



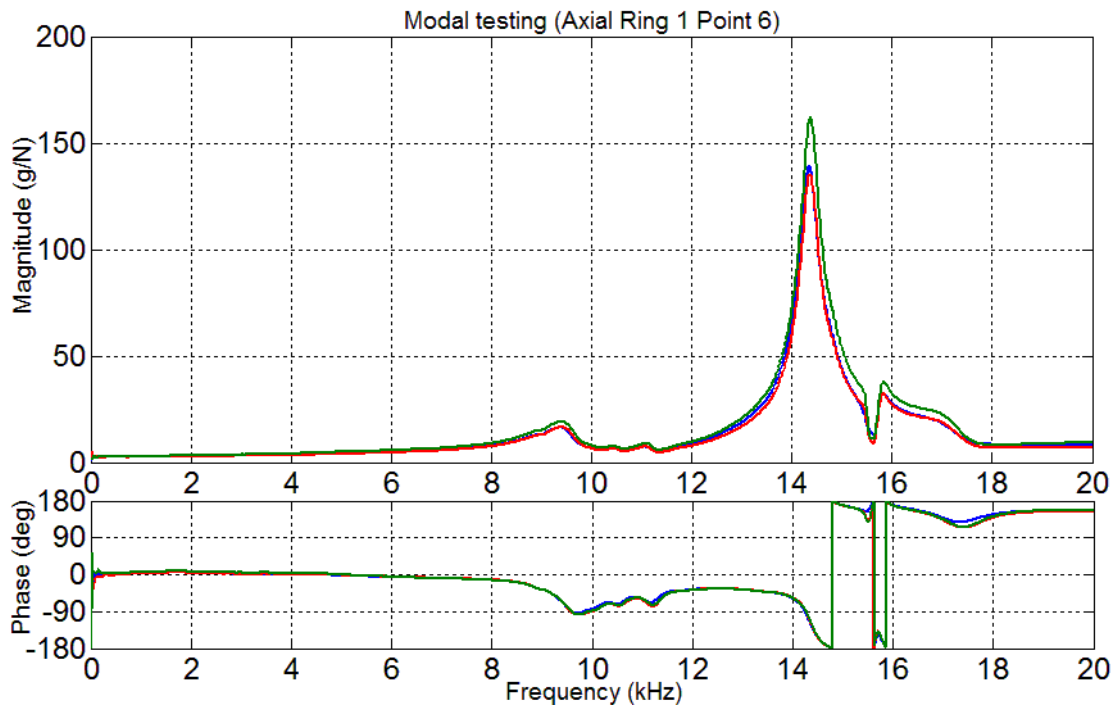
รูปที่ ค-3 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 จุดที่ 3
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



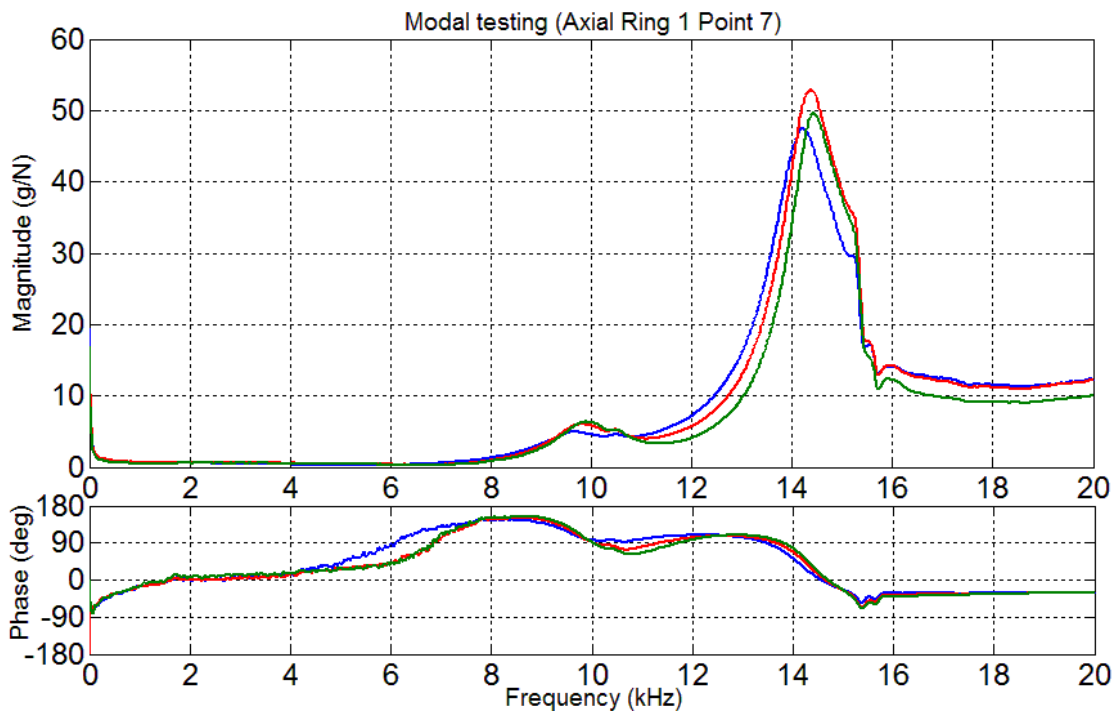
รูปที่ ค-4 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 4
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



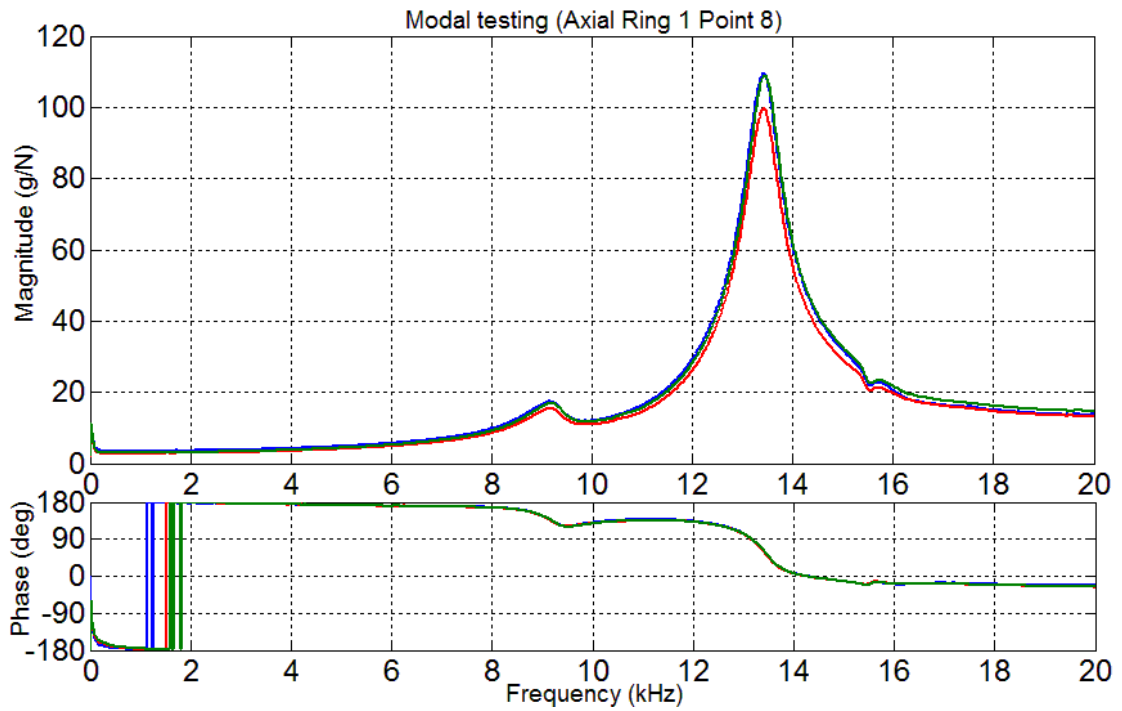
รูปที่ ค-5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 5
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



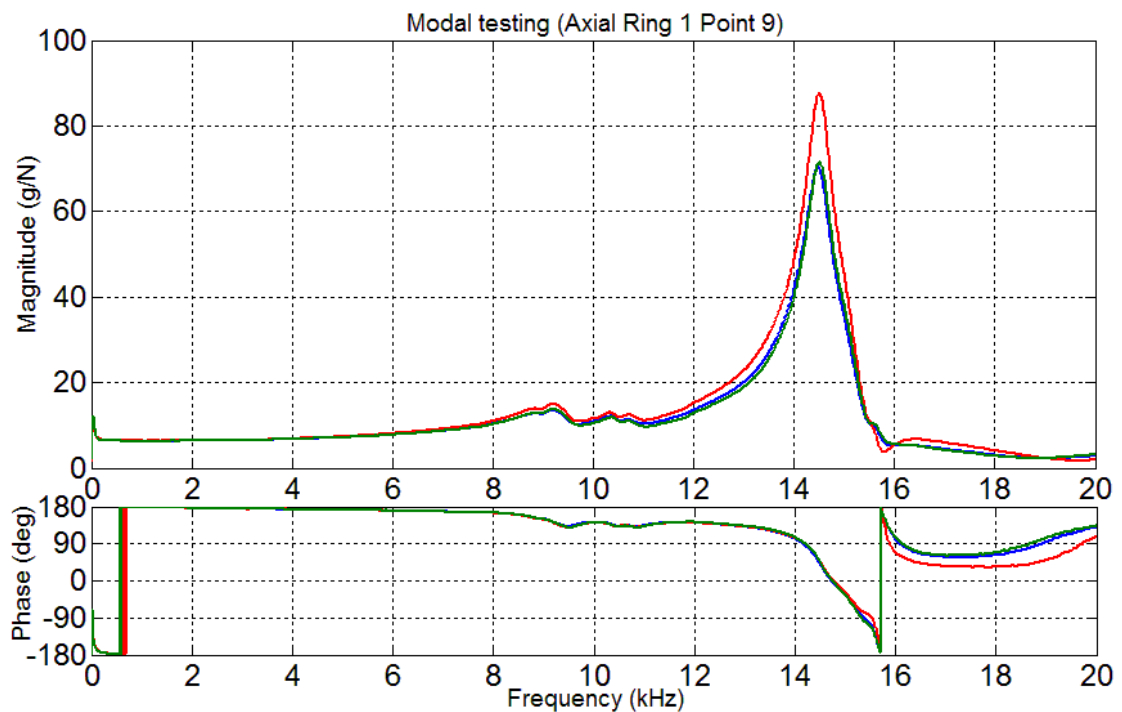
รูปที่ ค-6 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 จุดที่ 6
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



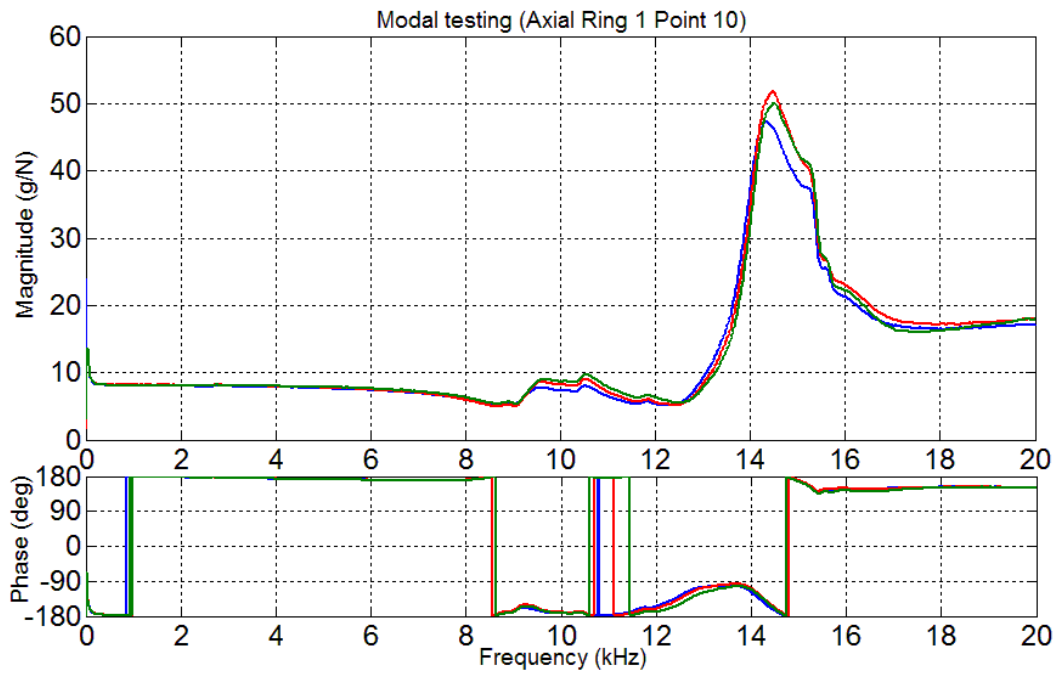
รูปที่ ค-7 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 จุดที่ 7
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ค-8 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 จุดที่ 8
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

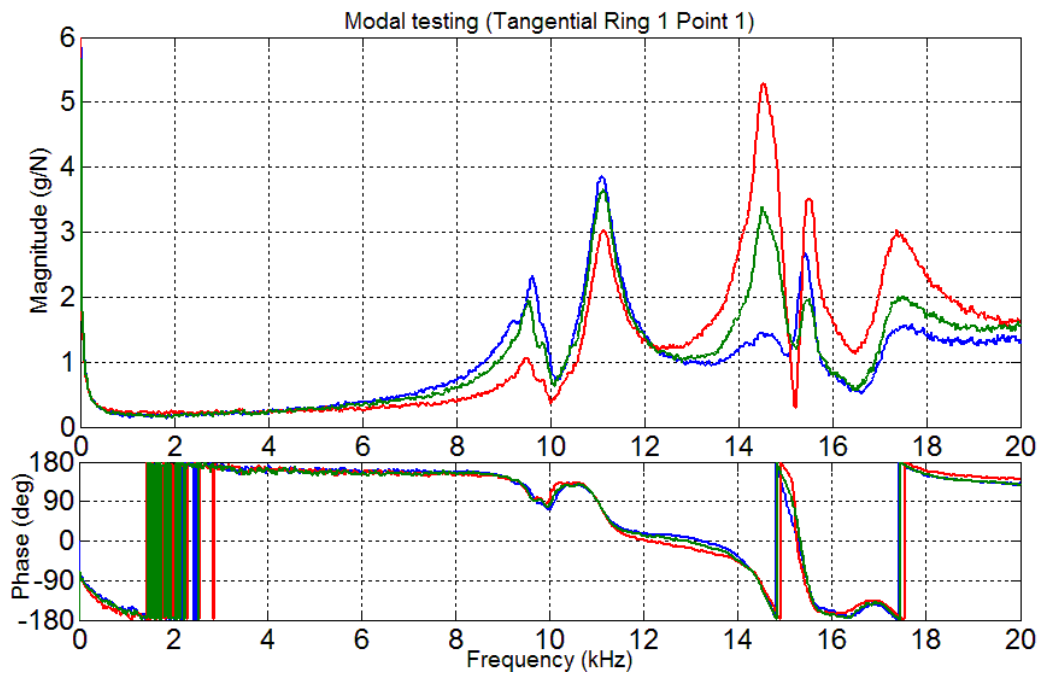


รูปที่ ค-9 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 จุดที่ 9
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

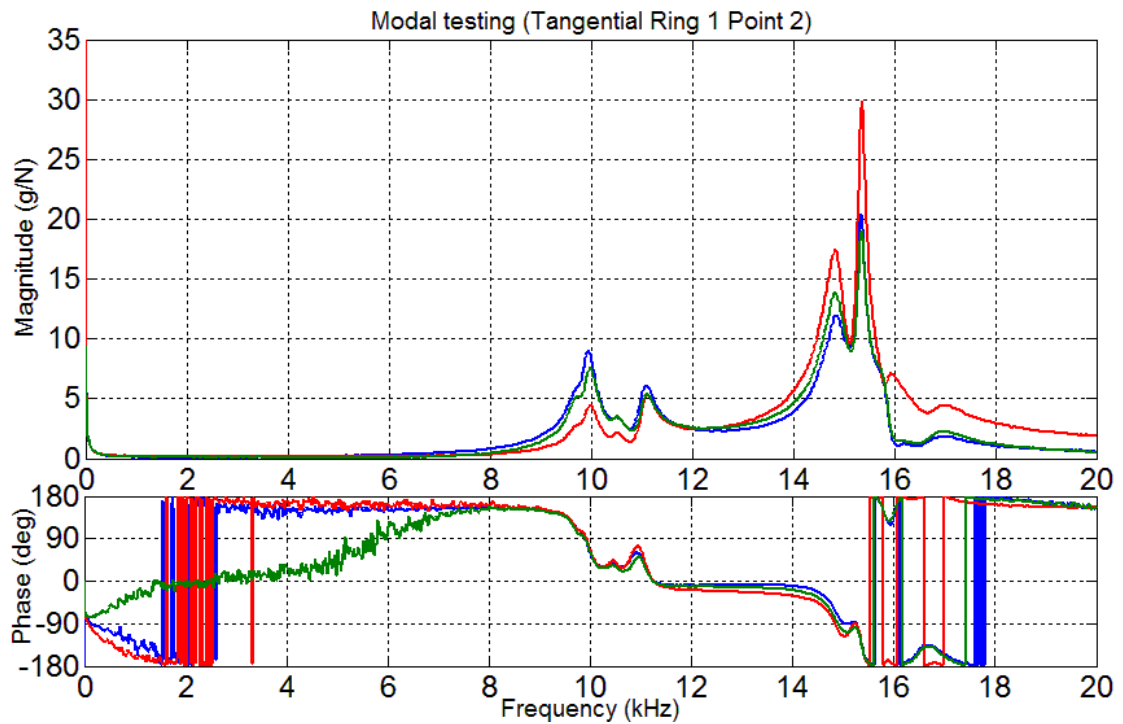


รูปที่ ค-10 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 10
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

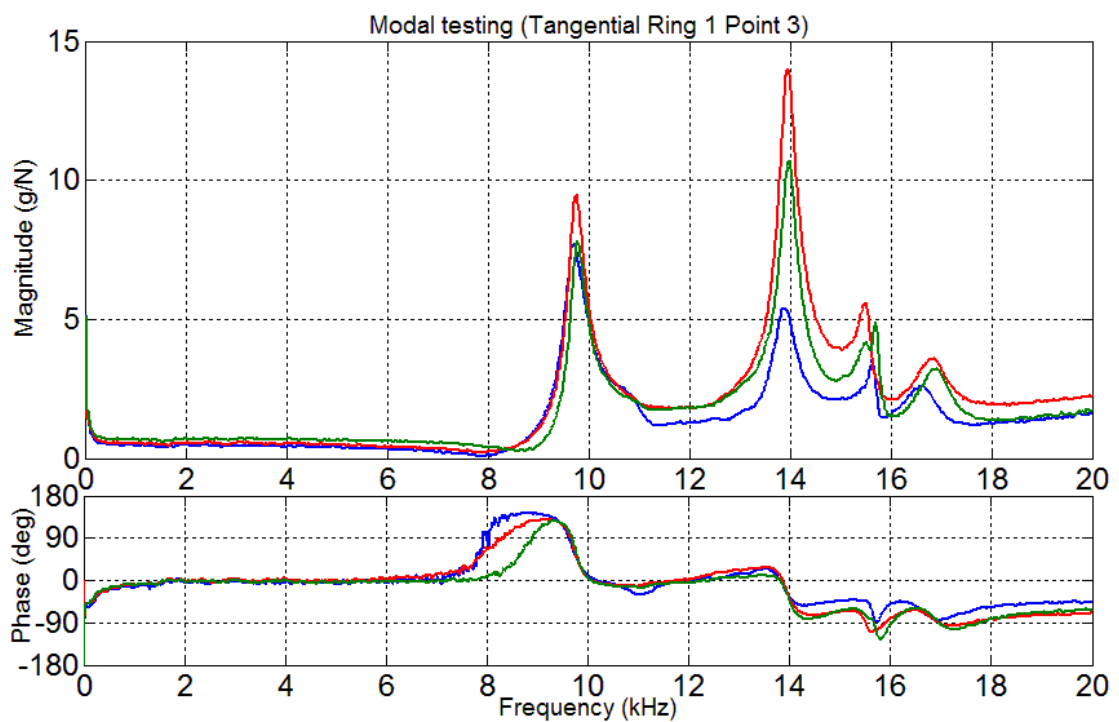
1.2 กระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



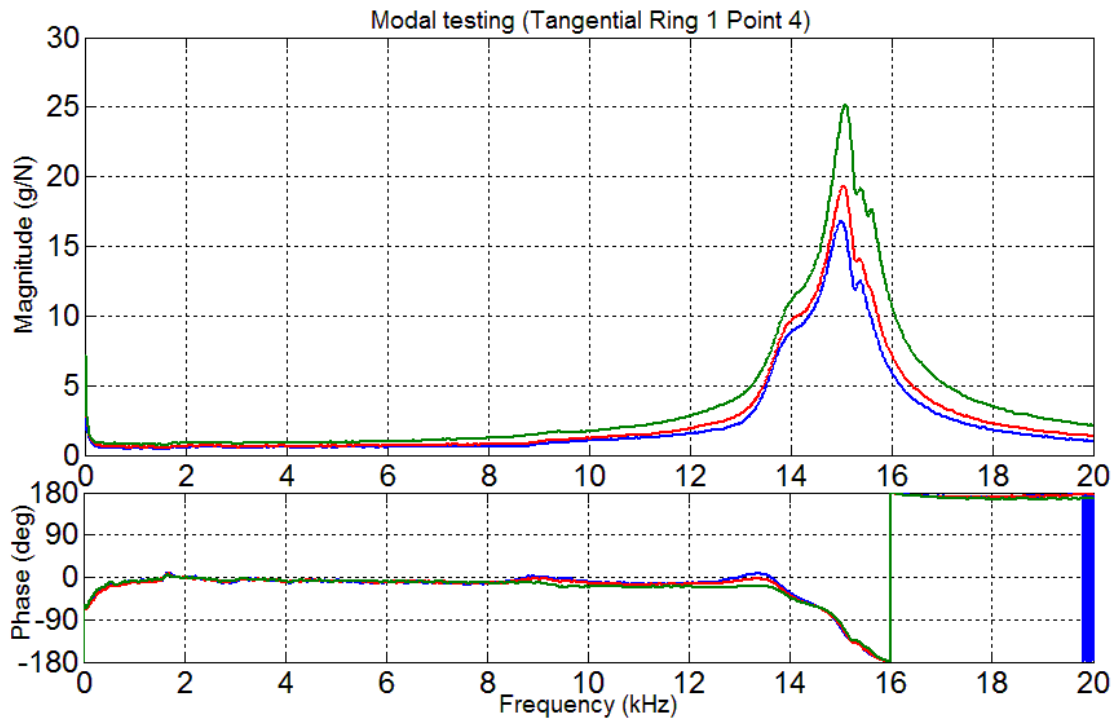
รูปที่ ค-11 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 1
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



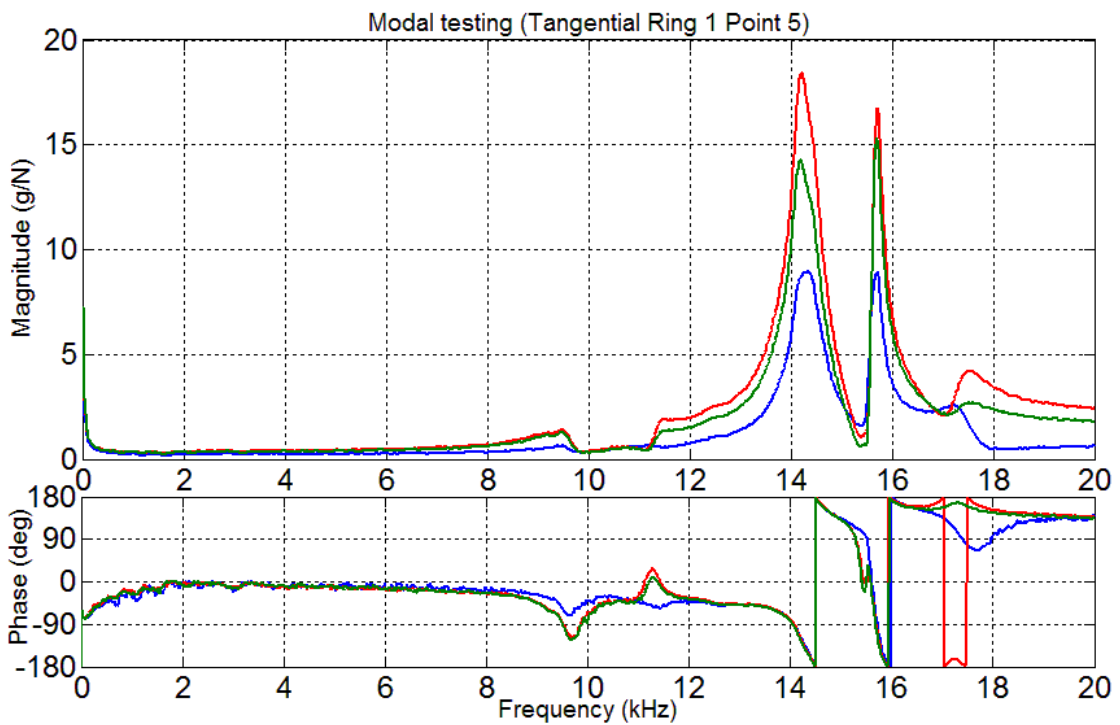
รูปที่ ค-12 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 2
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



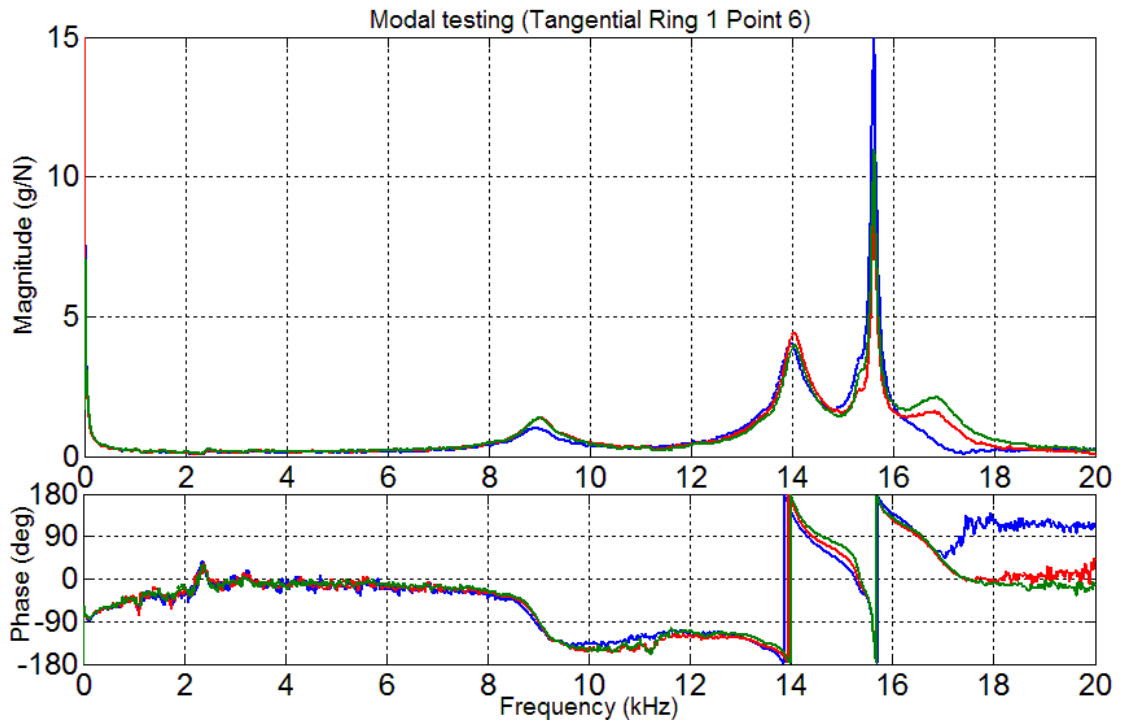
รูปที่ ค-13 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 3
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



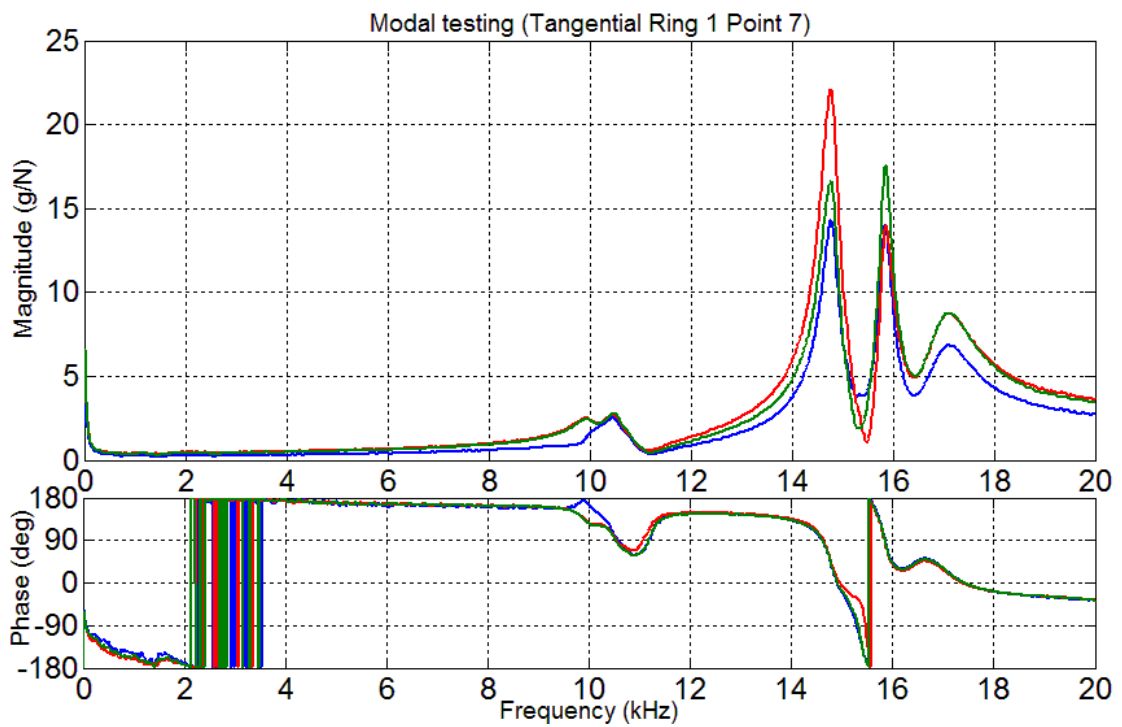
รูปที่ ค-14 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 4
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



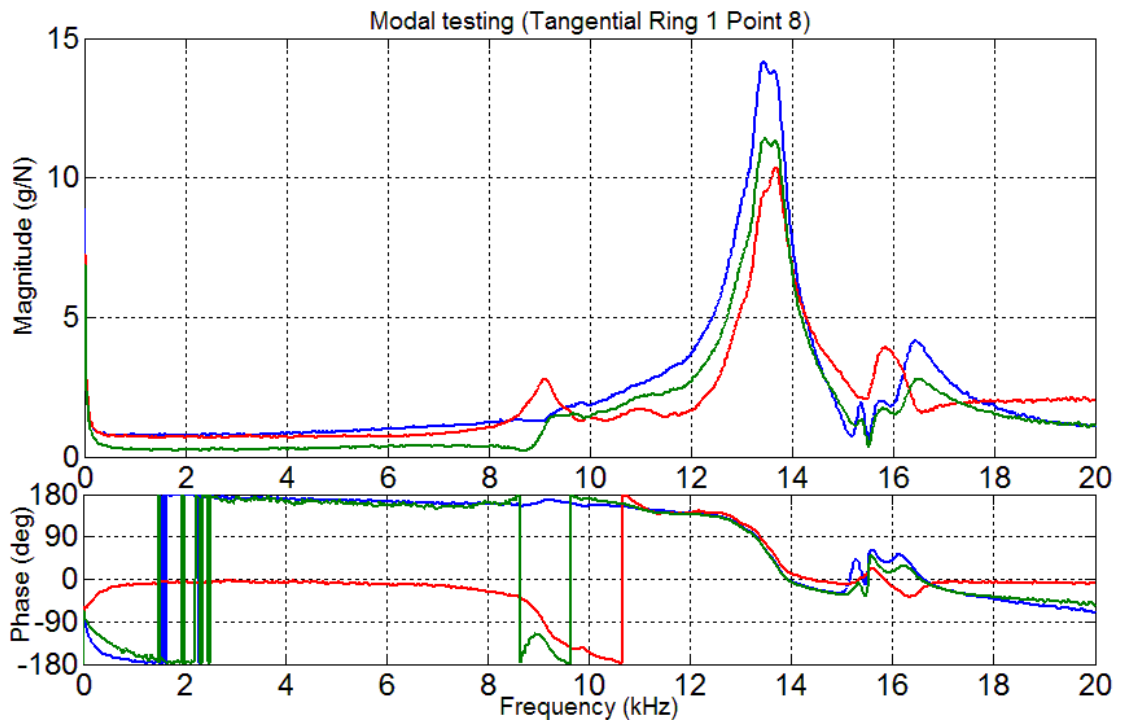
รูปที่ ค-15 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 5
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



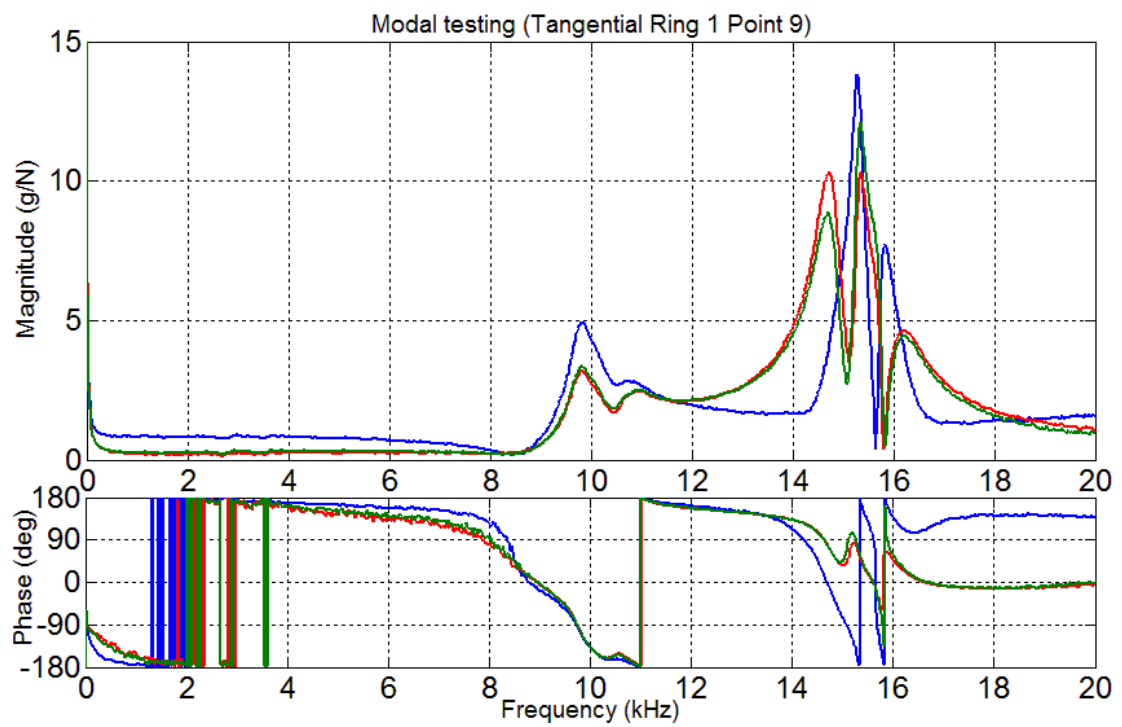
รูปที่ ค-16 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 6
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



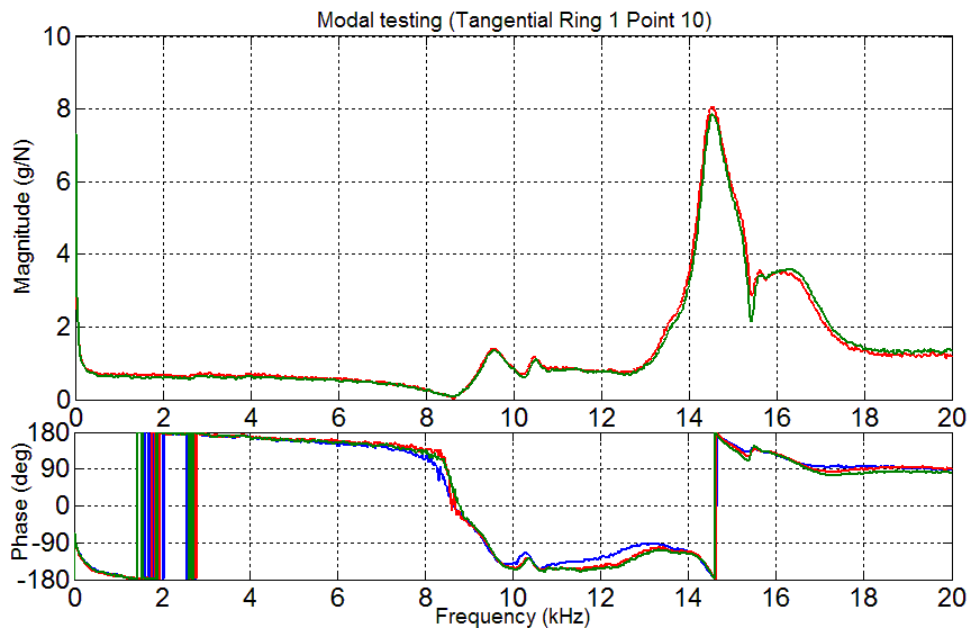
รูปที่ ค-17 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 7
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ค-18 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 8
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



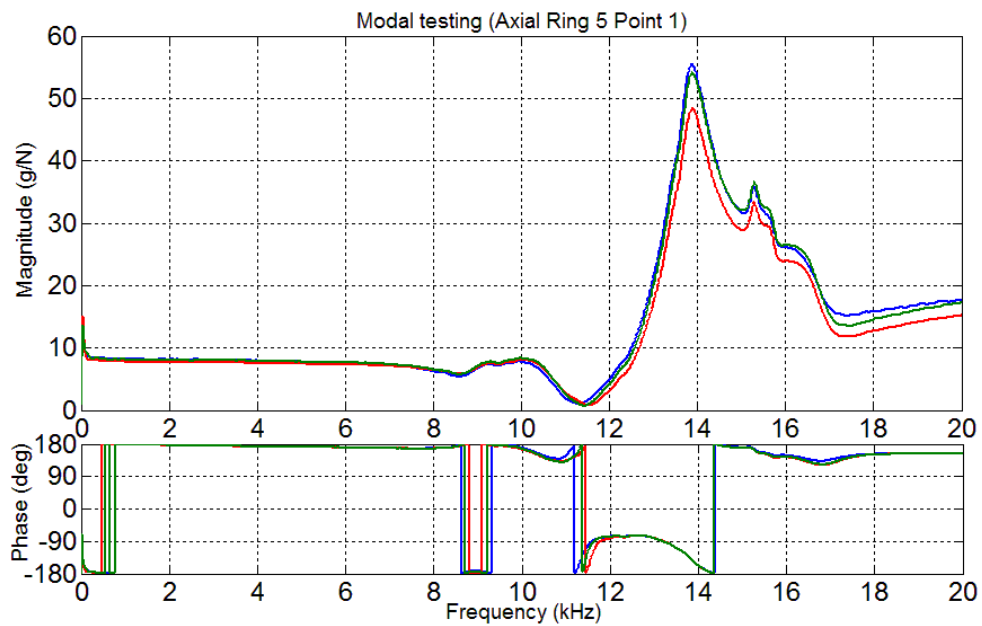
รูปที่ ค-19 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 1 จุดที่ 9
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



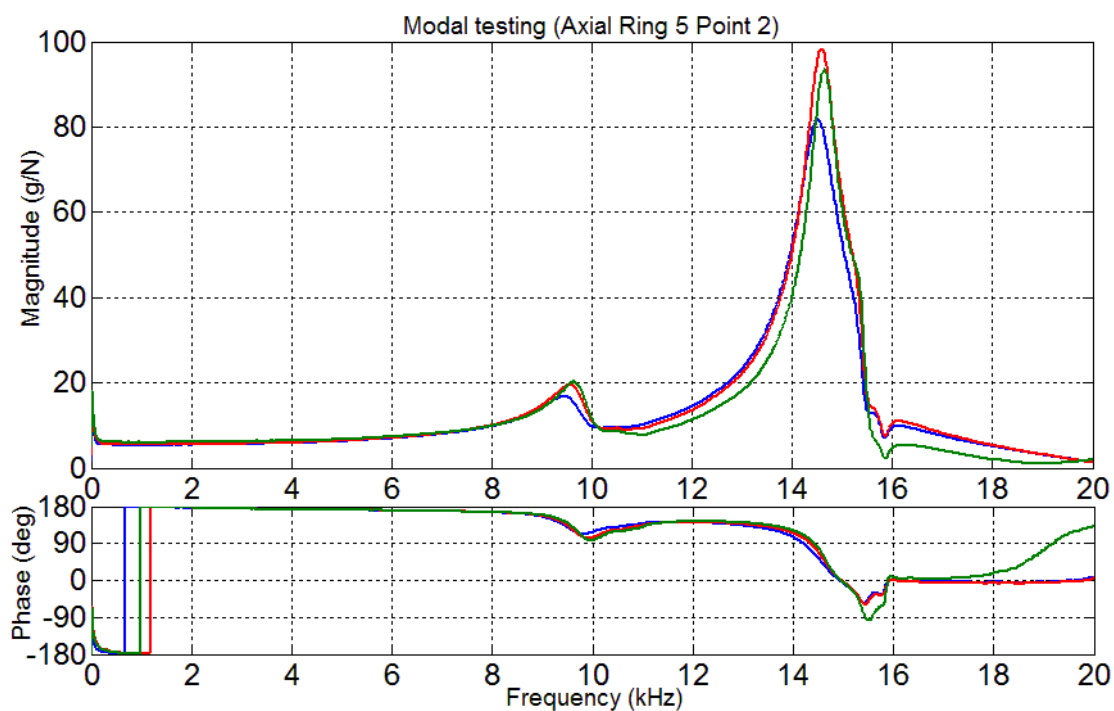
รูปที่ ค-20 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 จุดที่ 10
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ

2. แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 5

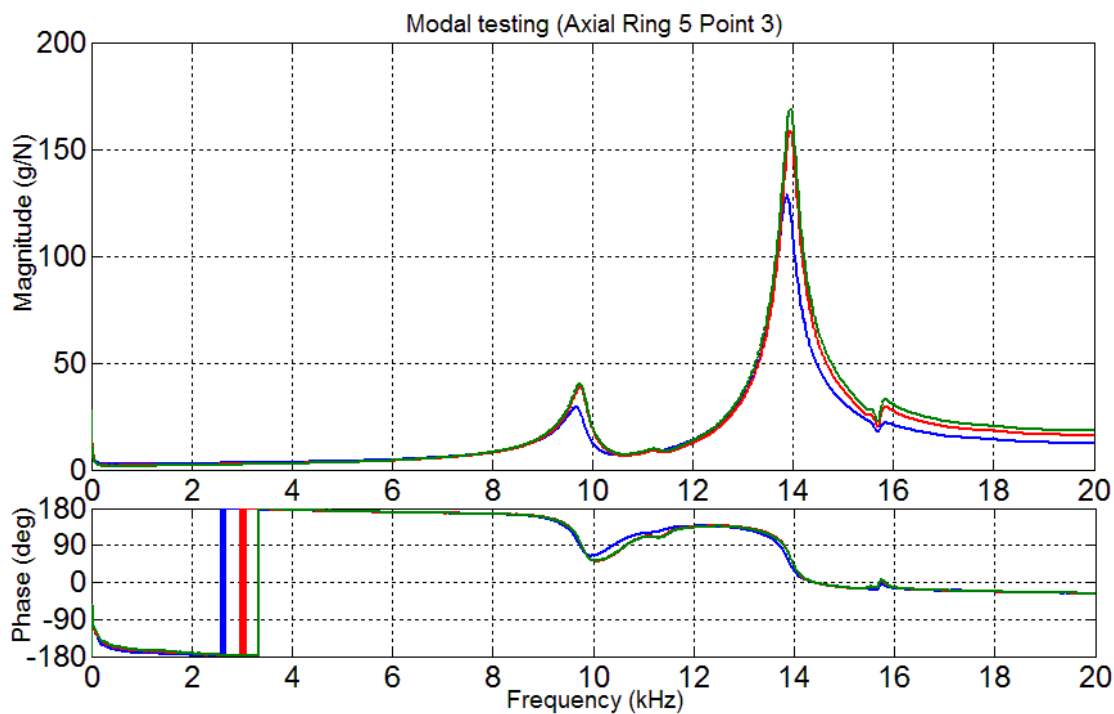
2.1 กระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



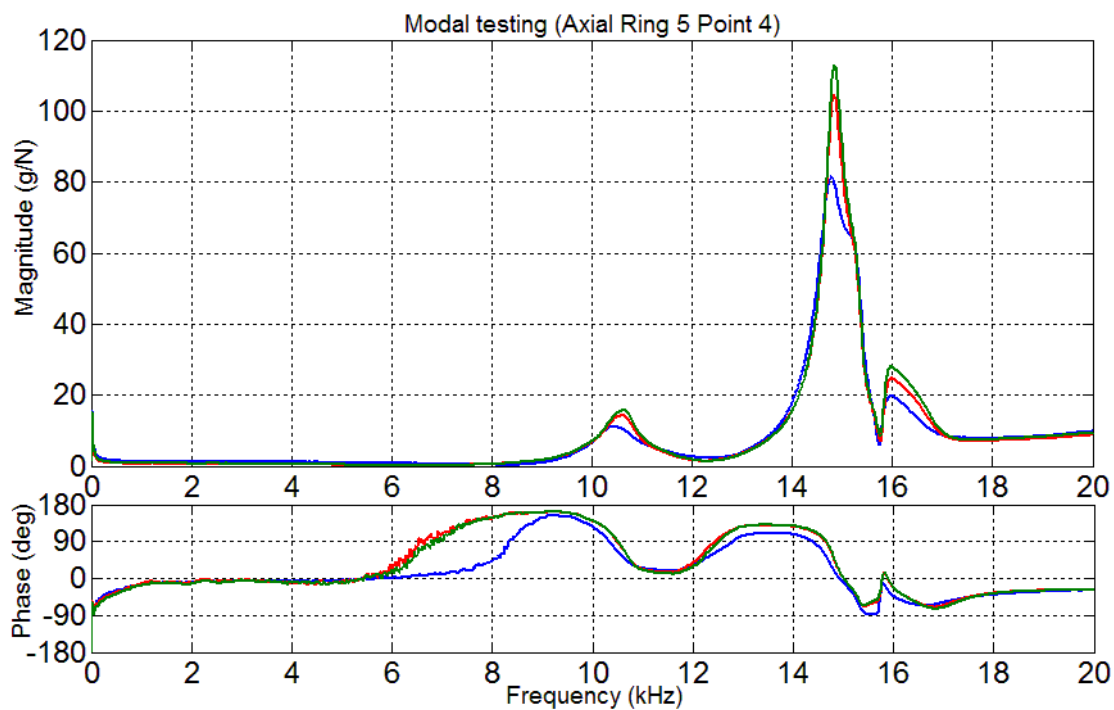
รูปที่ ค-21 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 5 จุดที่ 1
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



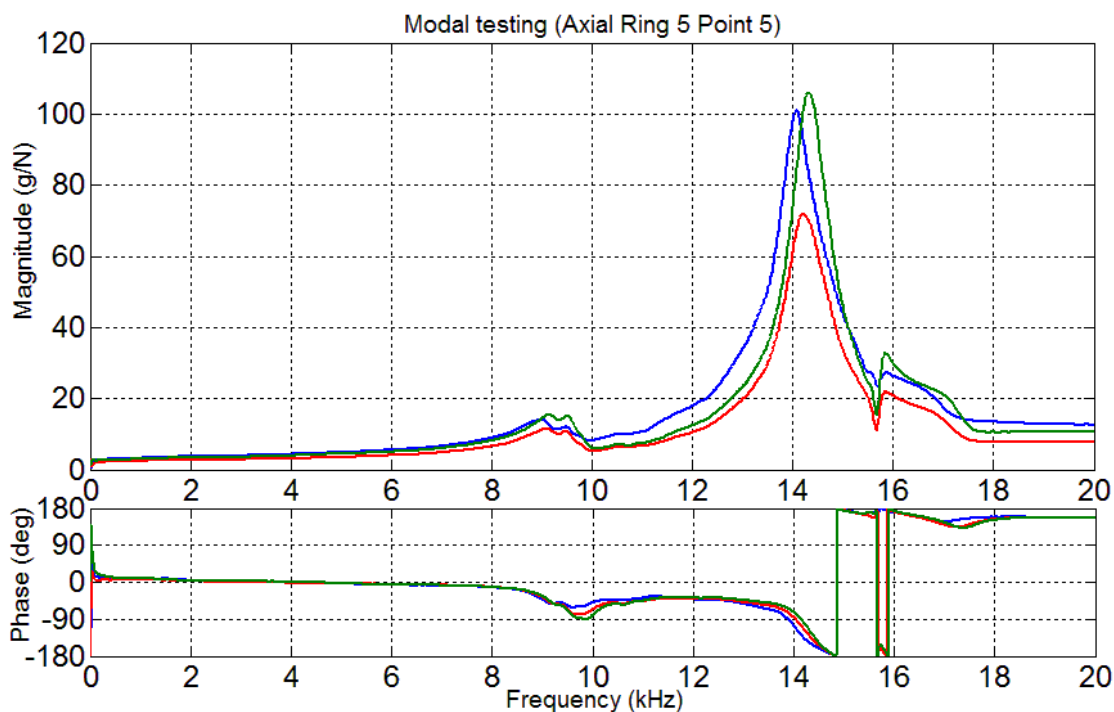
รูปที่ ค-22 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 2
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



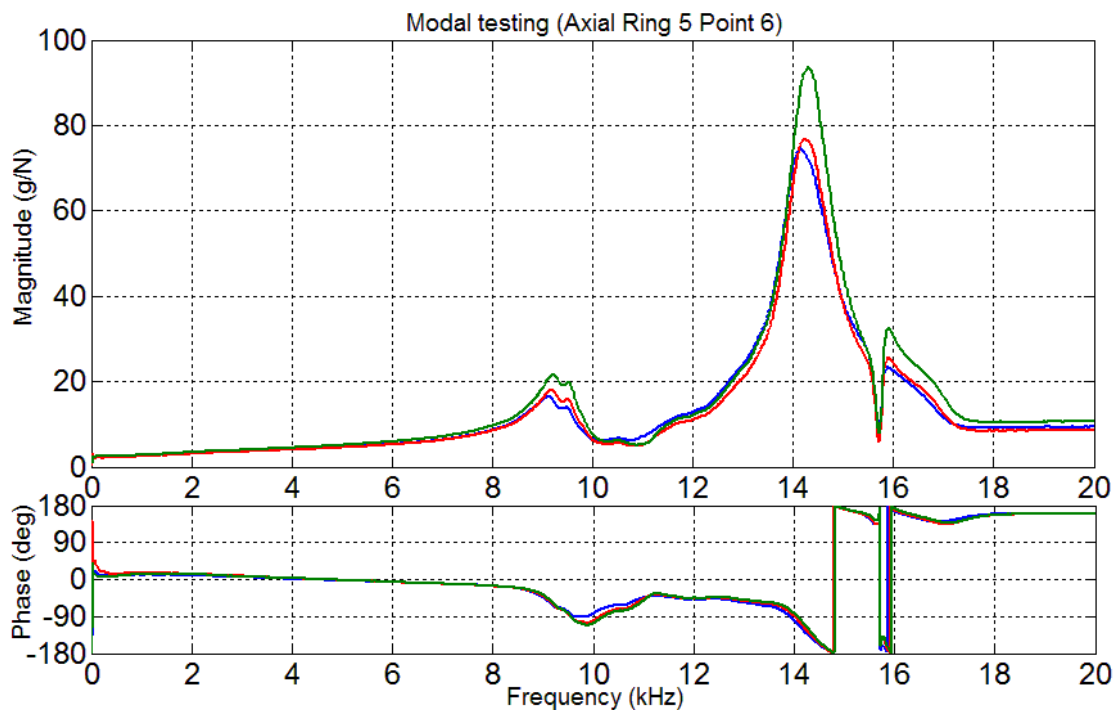
รูปที่ ค-23 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 3
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



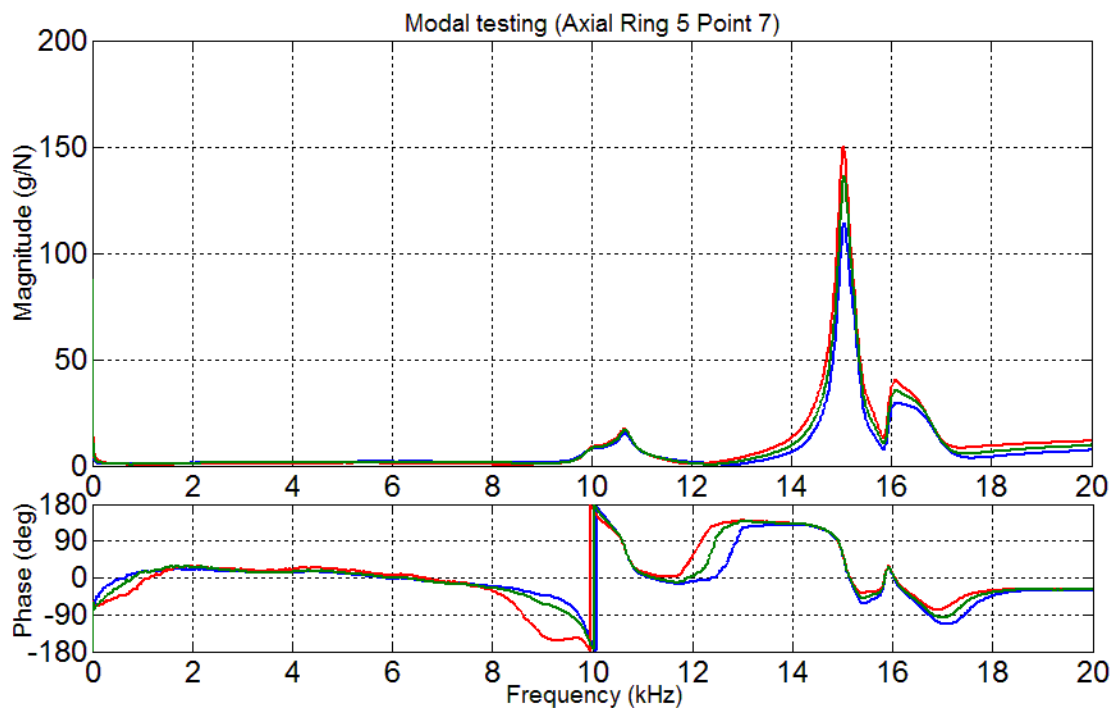
รูปที่ ค-24 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 4
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



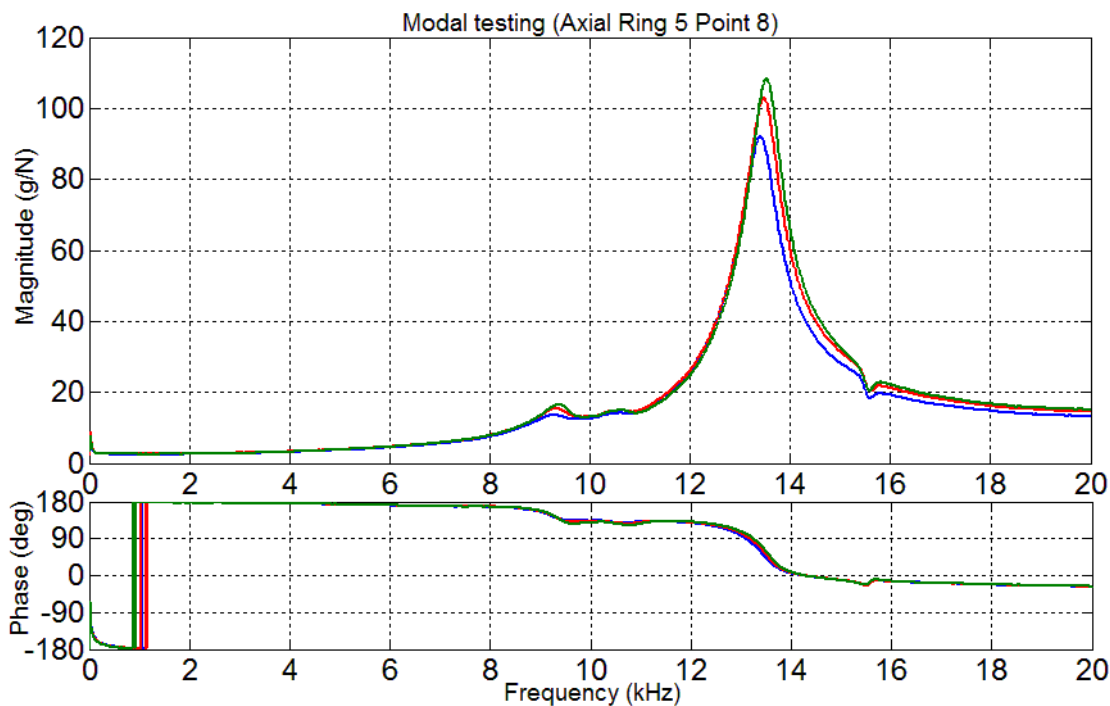
รูปที่ ค-25 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 5
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



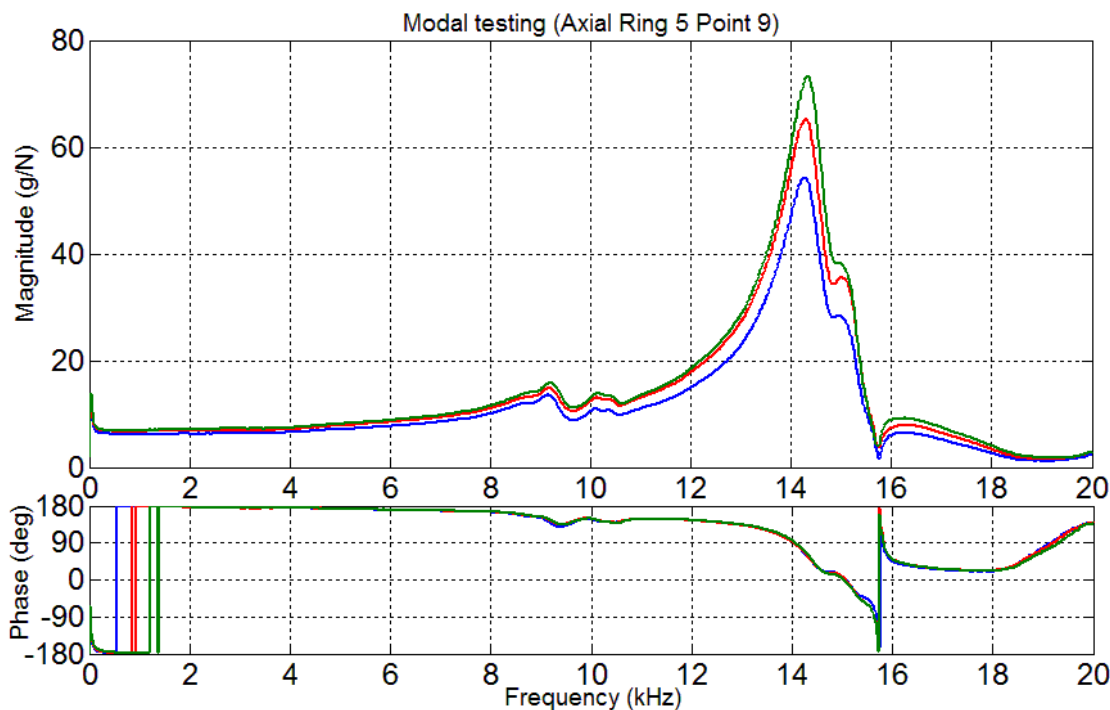
รูปที่ ค-26 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 6
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



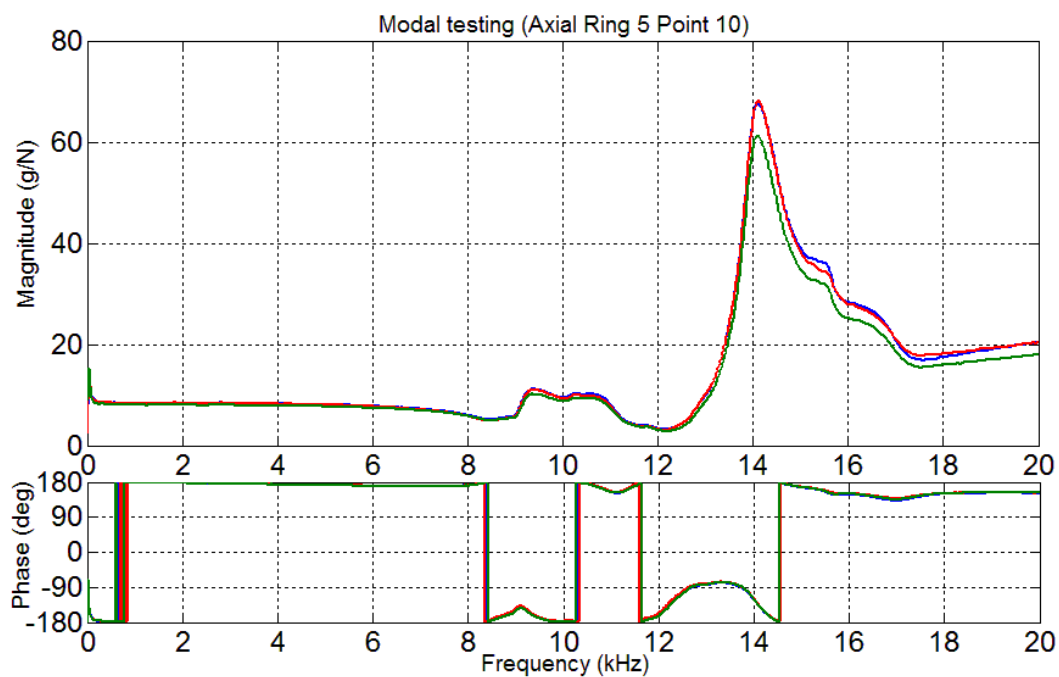
รูปที่ ค-27 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 7
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ค-28 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 8
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

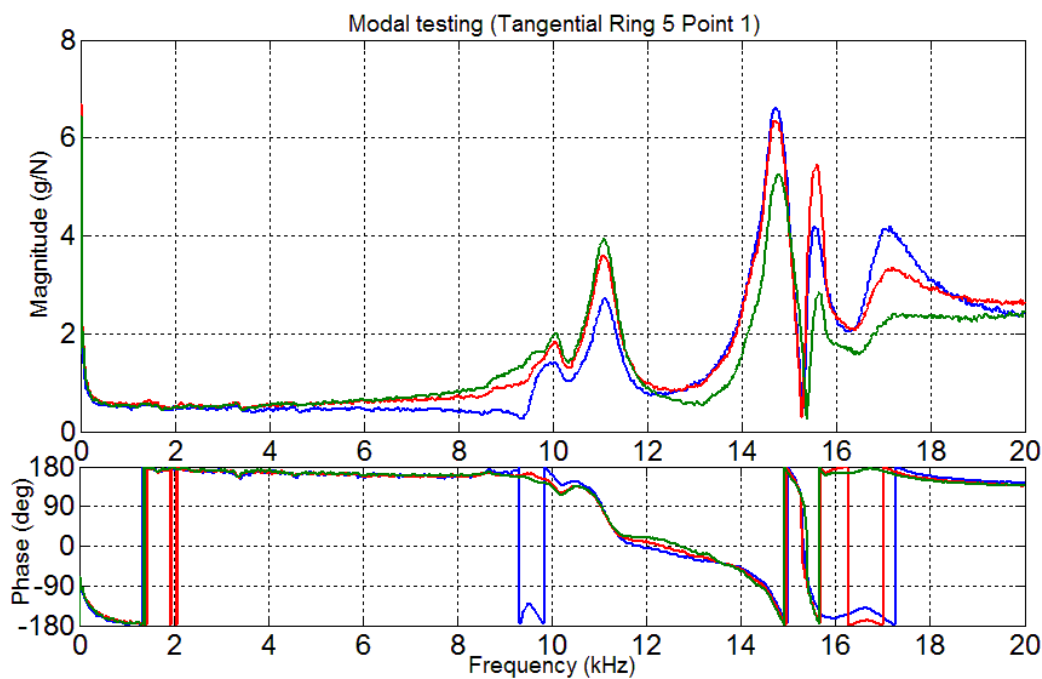


รูปที่ ค-29 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 9
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

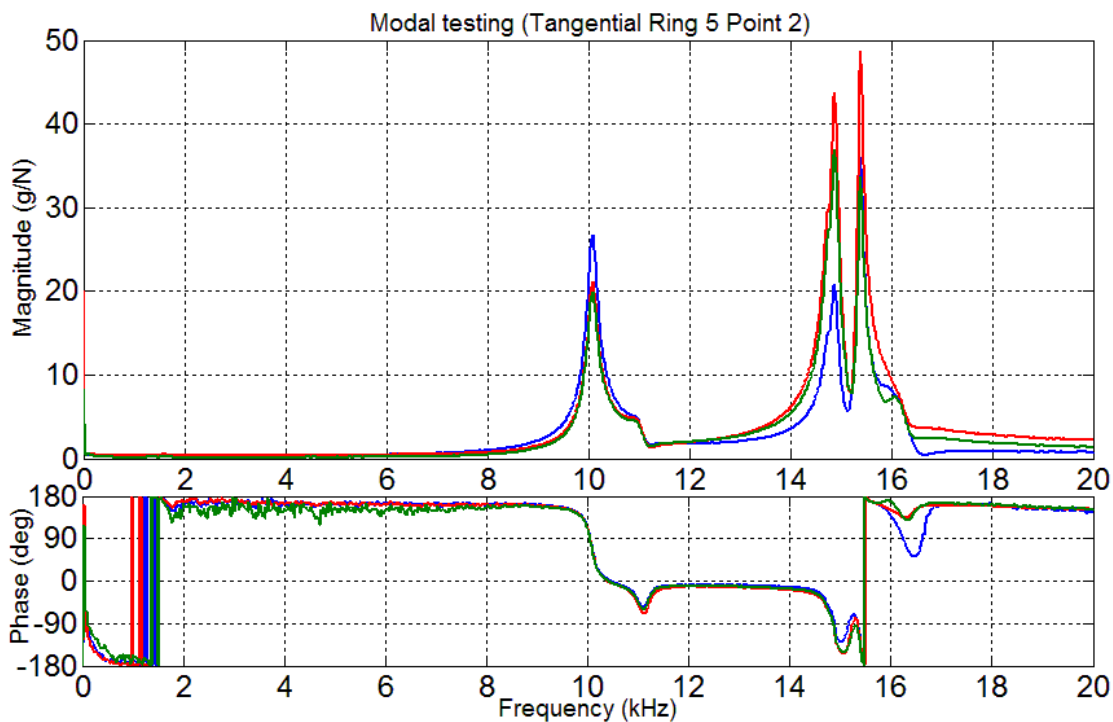


รูปที่ ค-30 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำขึ้นที่ 5 จุดที่ 10
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

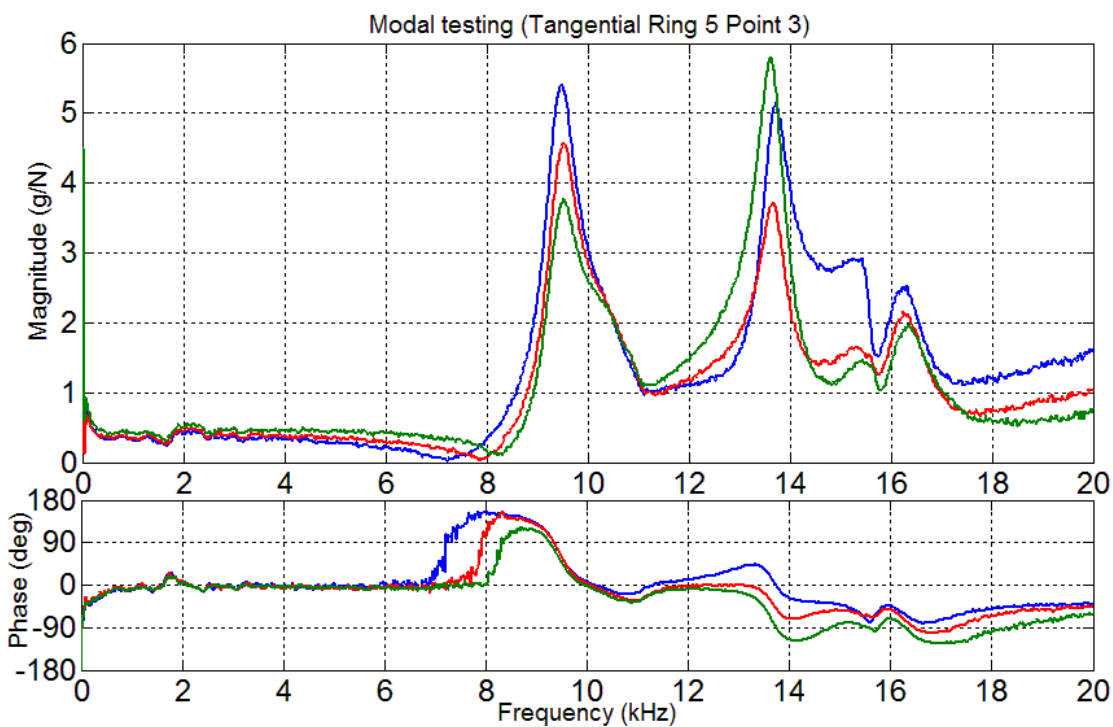
2.2 กระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



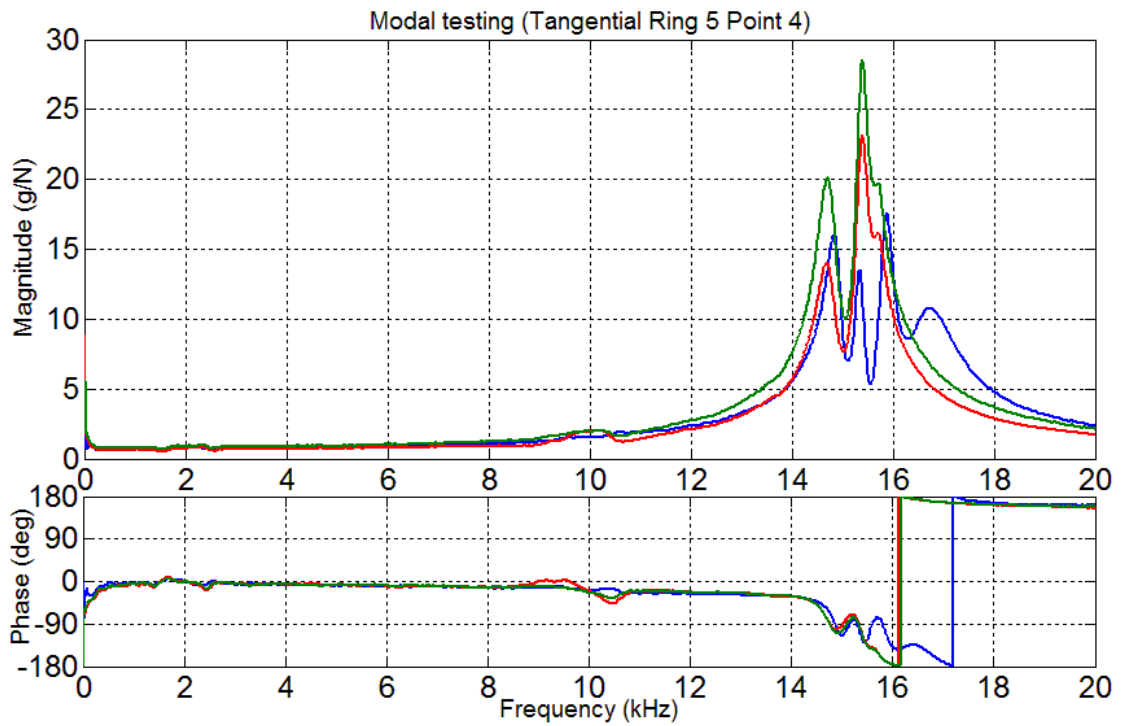
รูปที่ ค-31 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำขึ้นที่ 5 จุดที่ 1
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



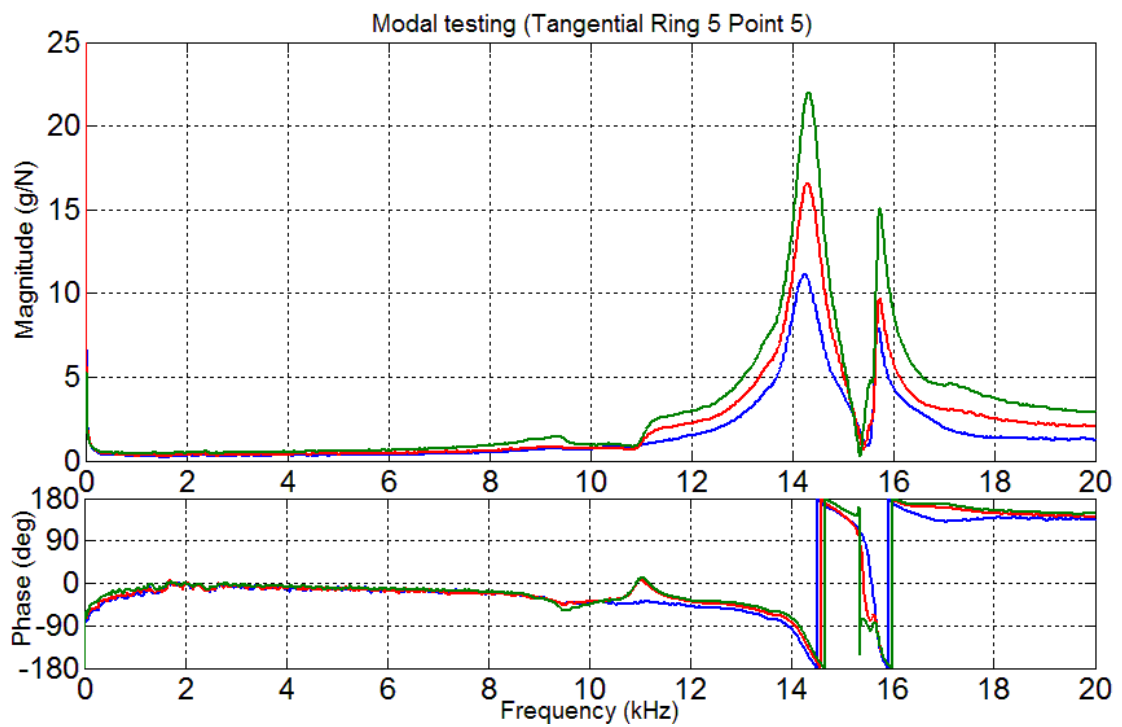
รูปที่ ค-32 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 2
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



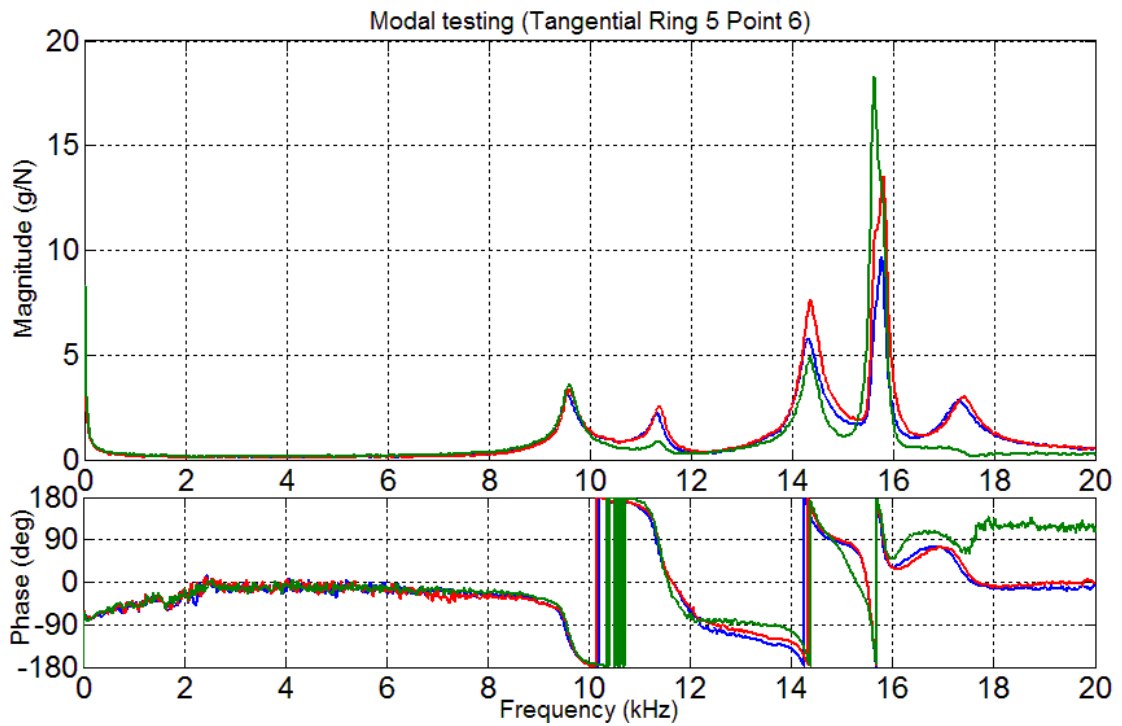
รูปที่ ค-33 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 3
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



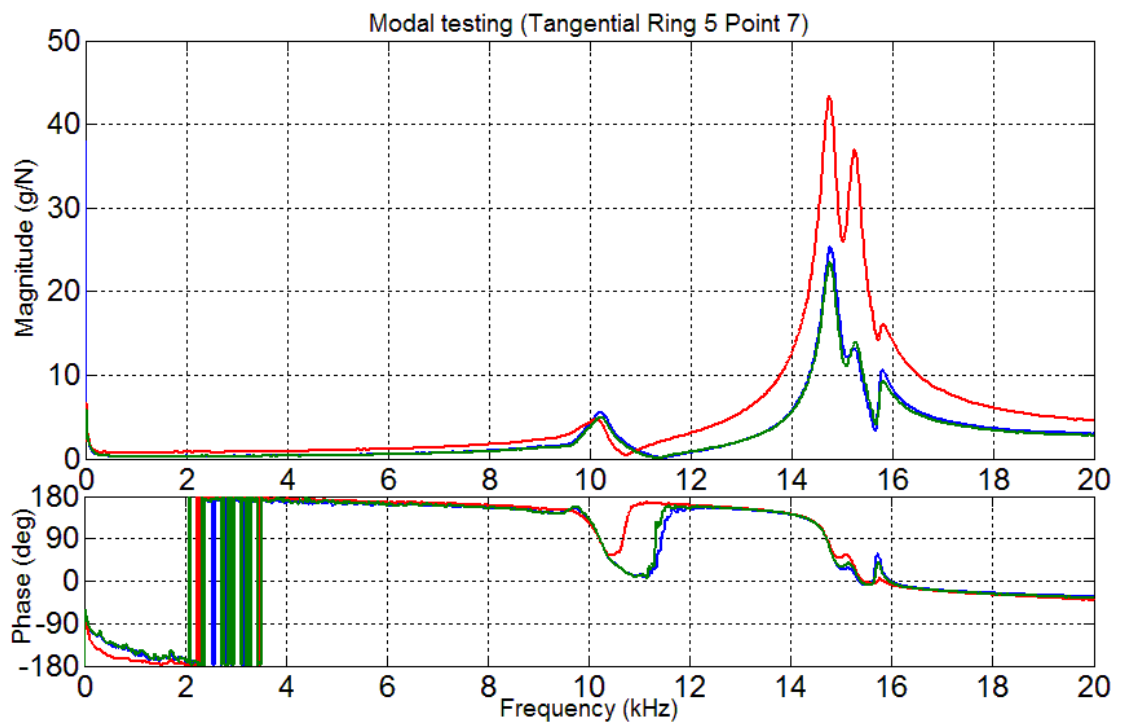
รูปที่ ค-34 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 4
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



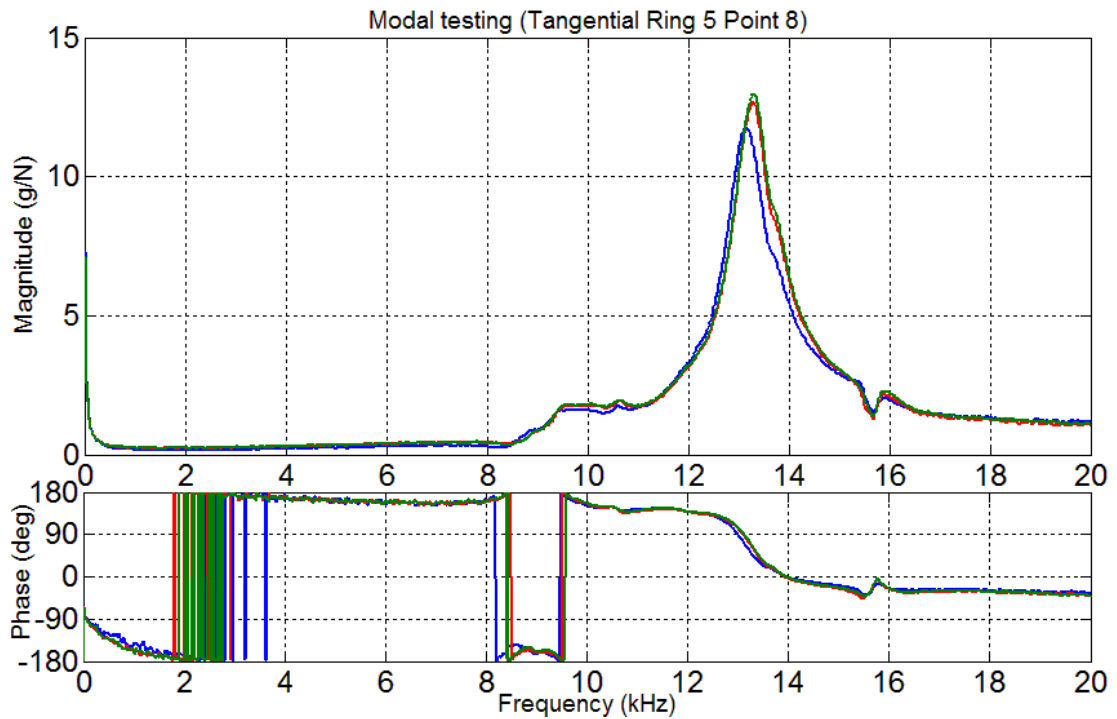
รูปที่ ค-35 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 5
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



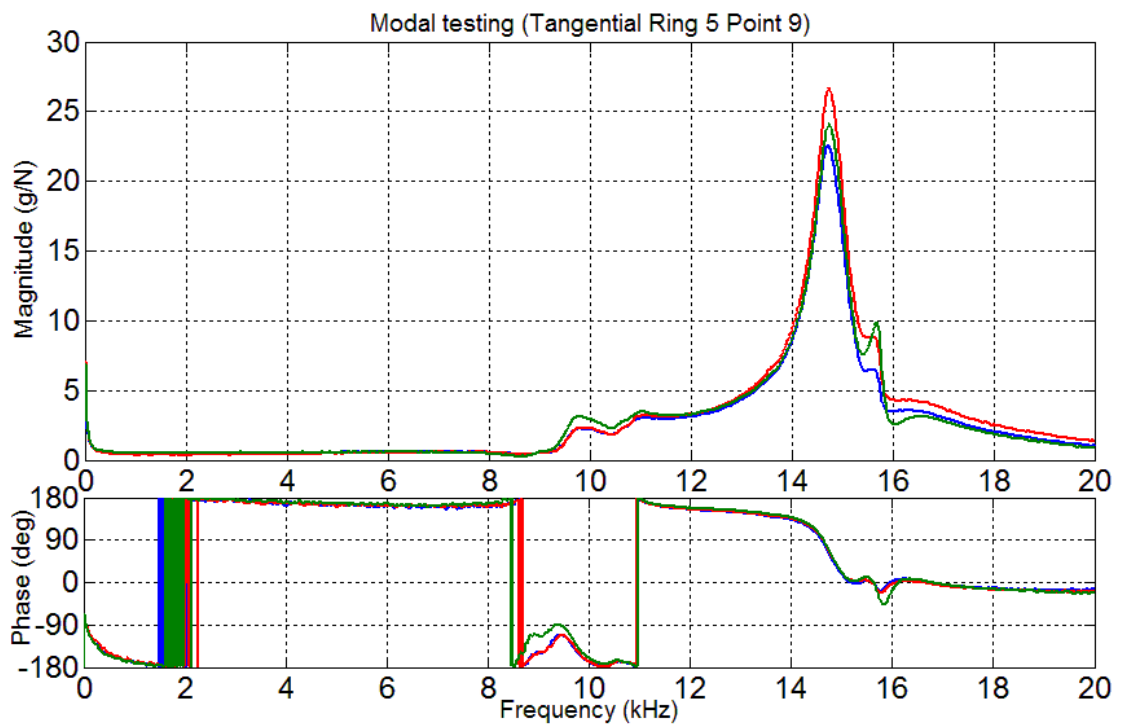
รูปที่ ค-36 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 6
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



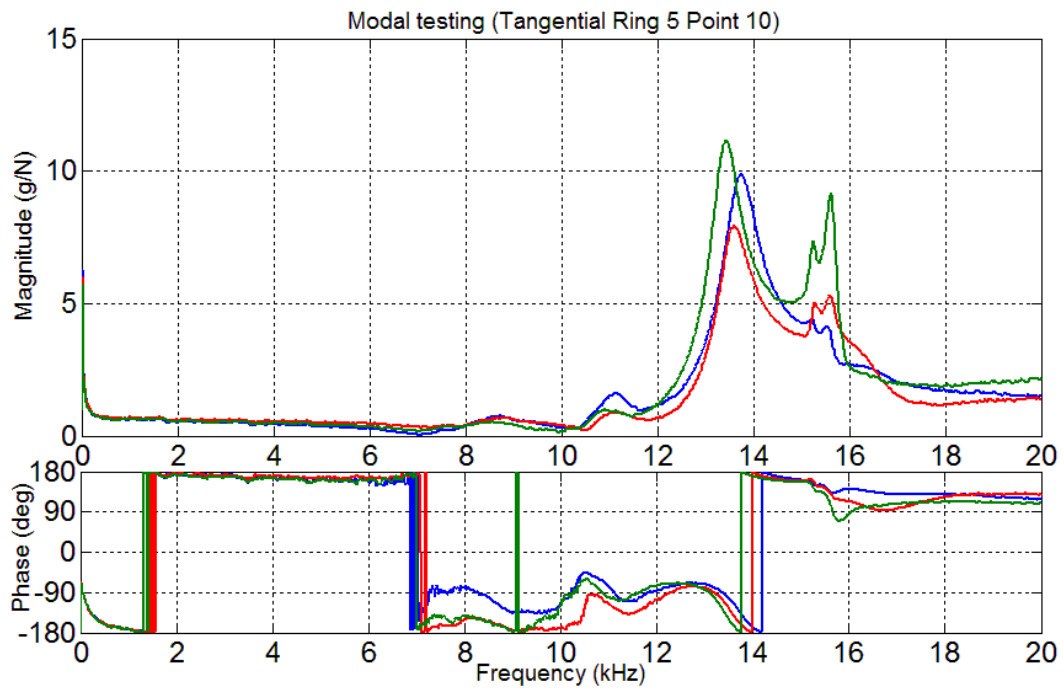
รูปที่ ค-37 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำชั้นที่ 5 จุดที่ 7
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ค-38 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 5 จุดที่ 8
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



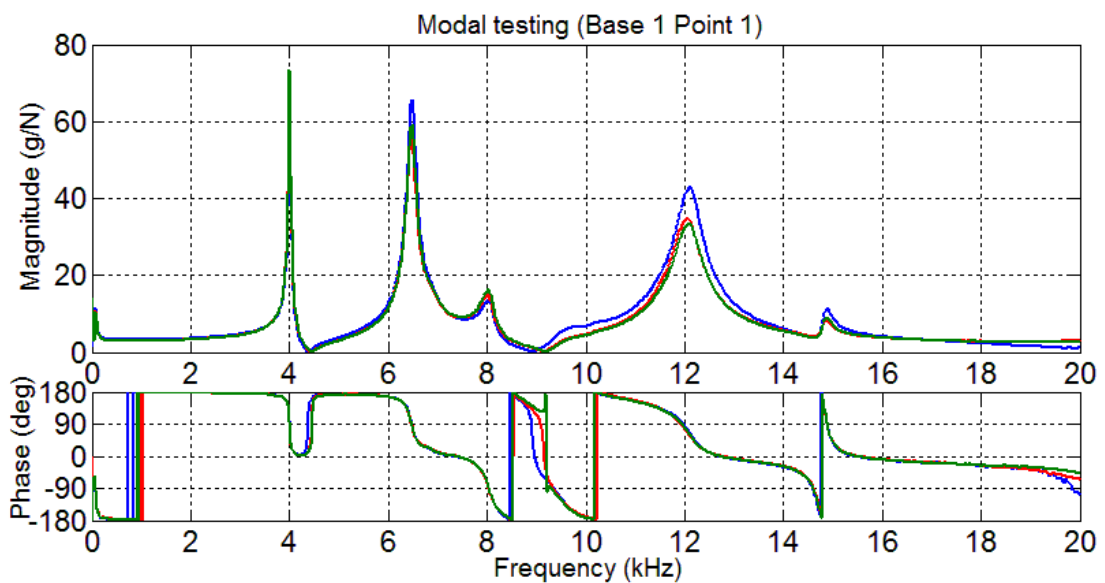
รูปที่ ค-39 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 5 จุดที่ 9
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ



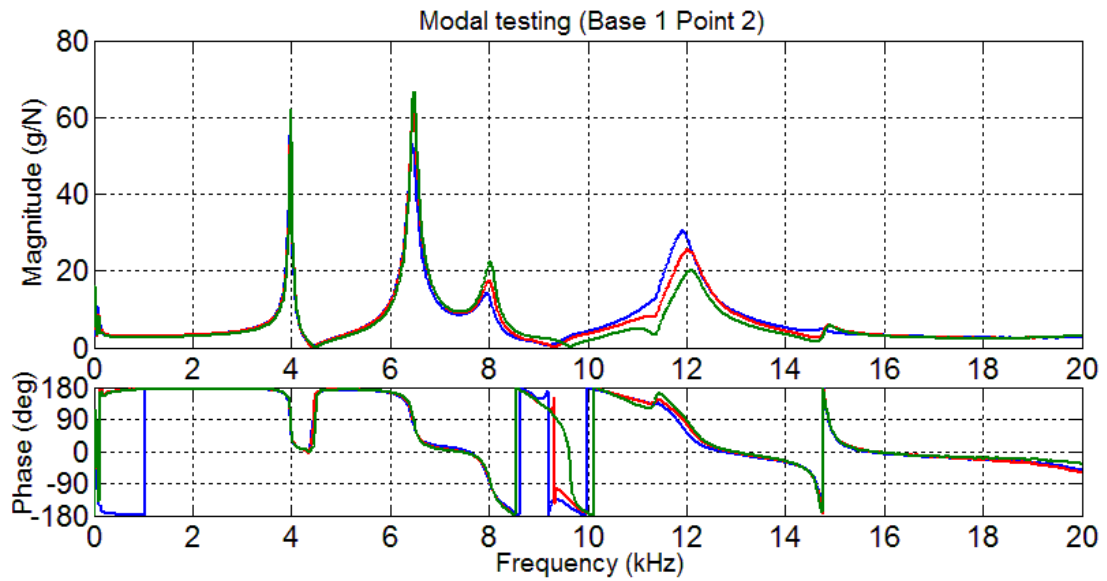
รูปที่ ค-40 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 5 จุดที่ 10
เมื่อกระตุ้นตามแนวสัมผัสด้วยค้อนเคาะ

ค.2 ผลตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับเฟสของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์

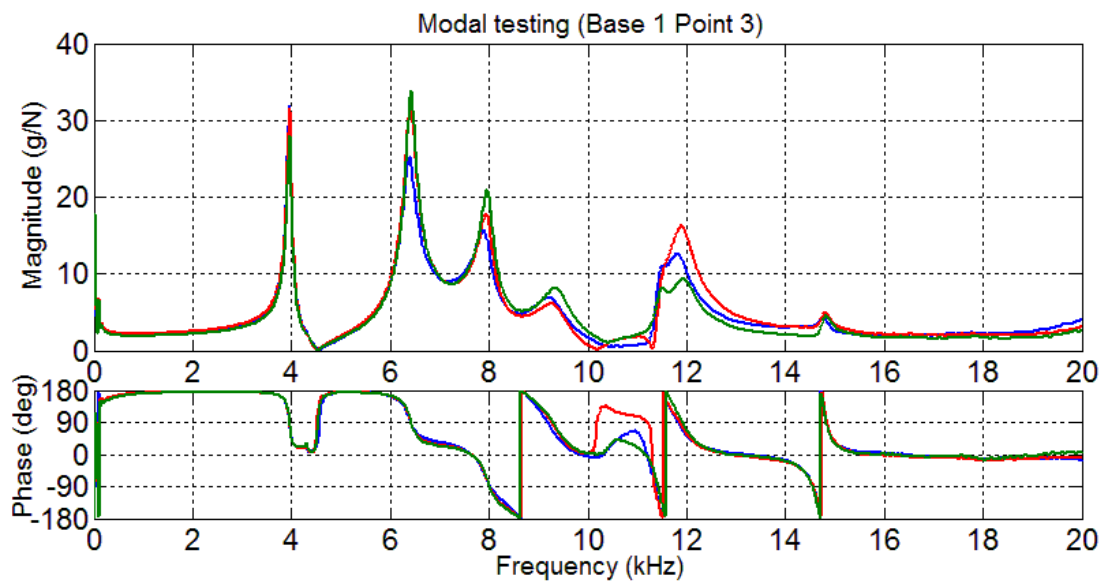
1. แบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ขึ้นที่ 1



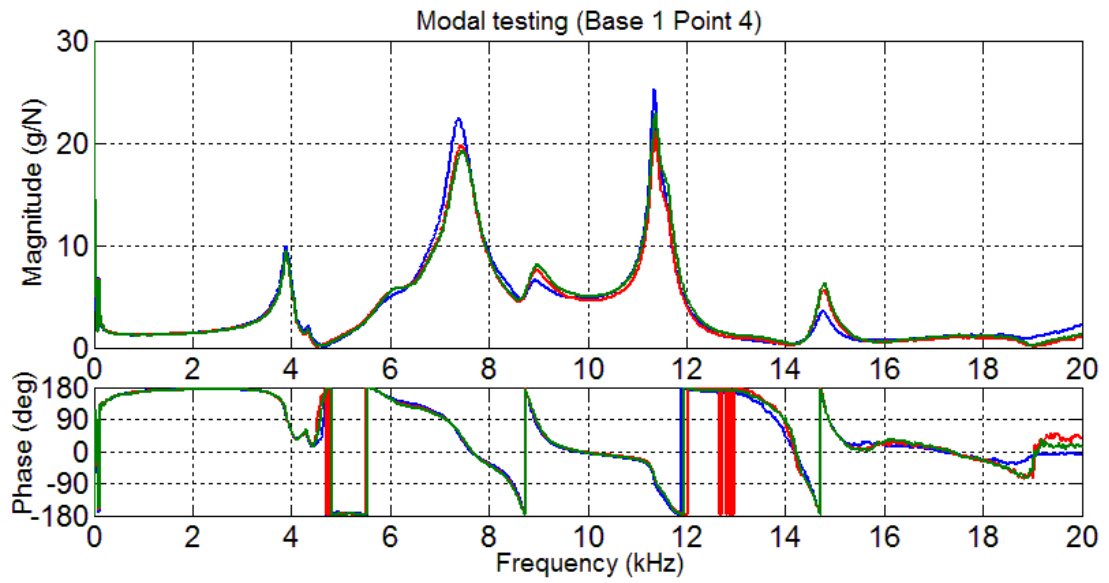
รูปที่ ค-41 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ขึ้นที่ 1 จุดที่ 1
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



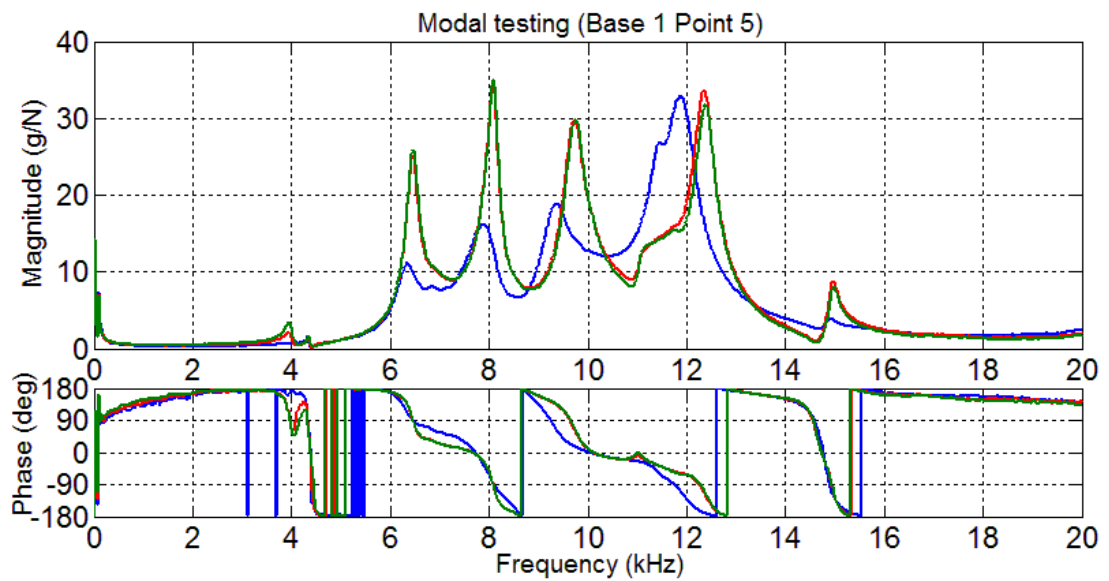
รูปที่ ค-42 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 2
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



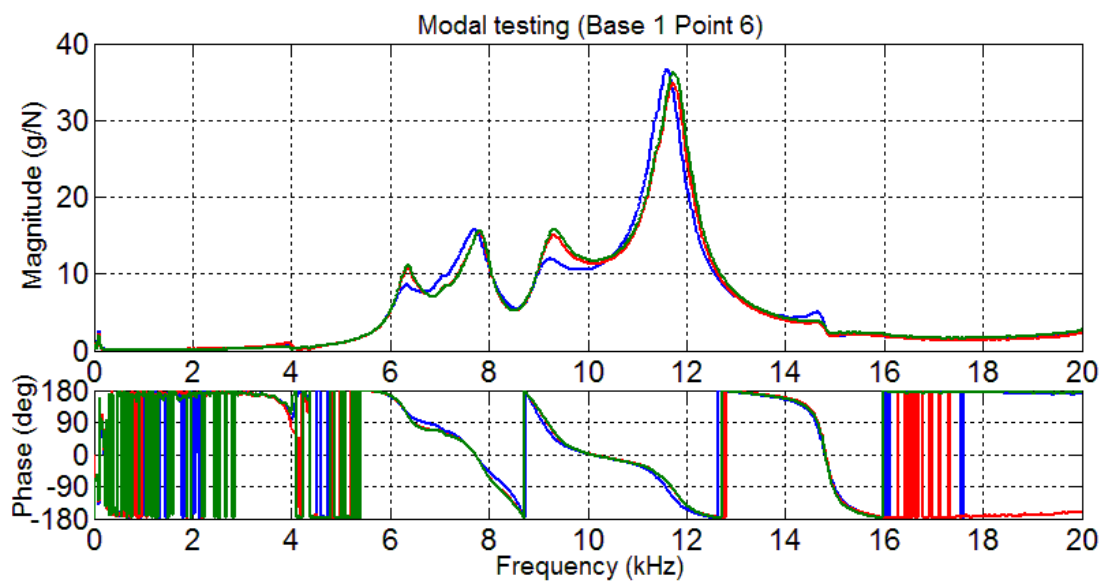
รูปที่ ค-43 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 3
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



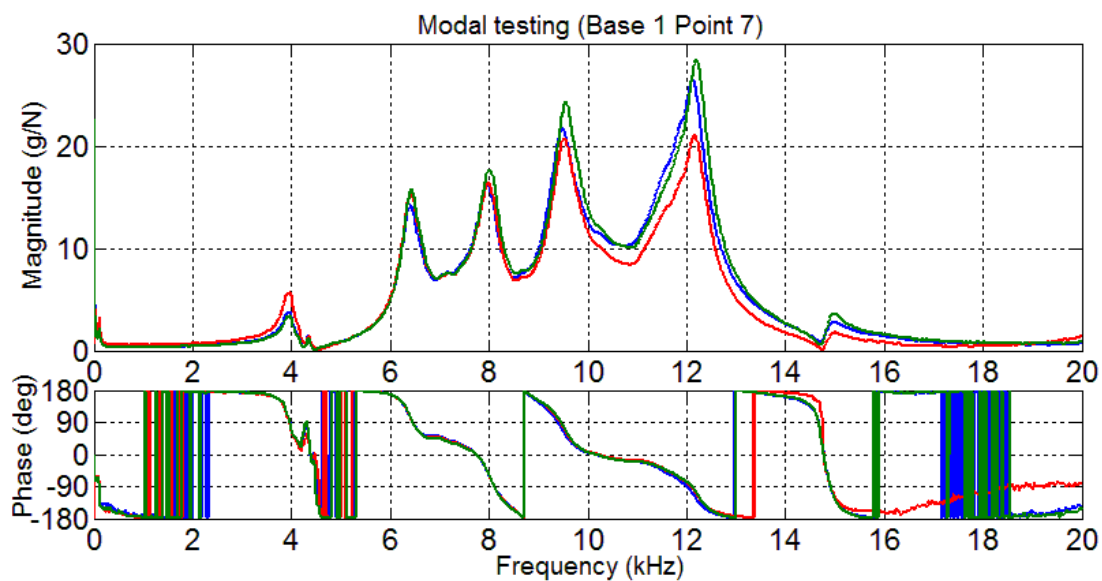
รูปที่ ค-44 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 4
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



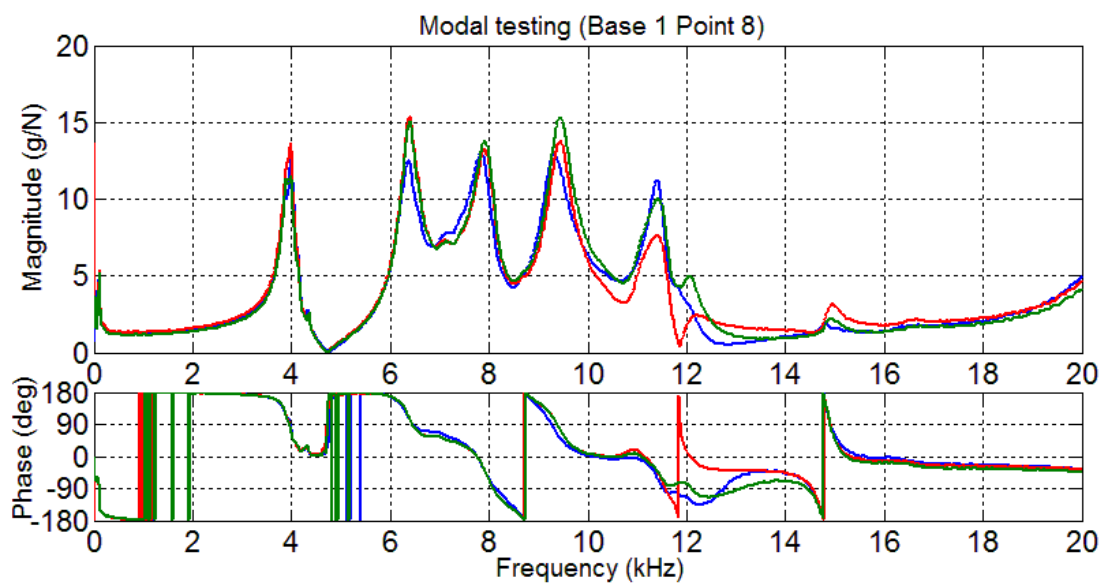
รูปที่ ค-45 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 5
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



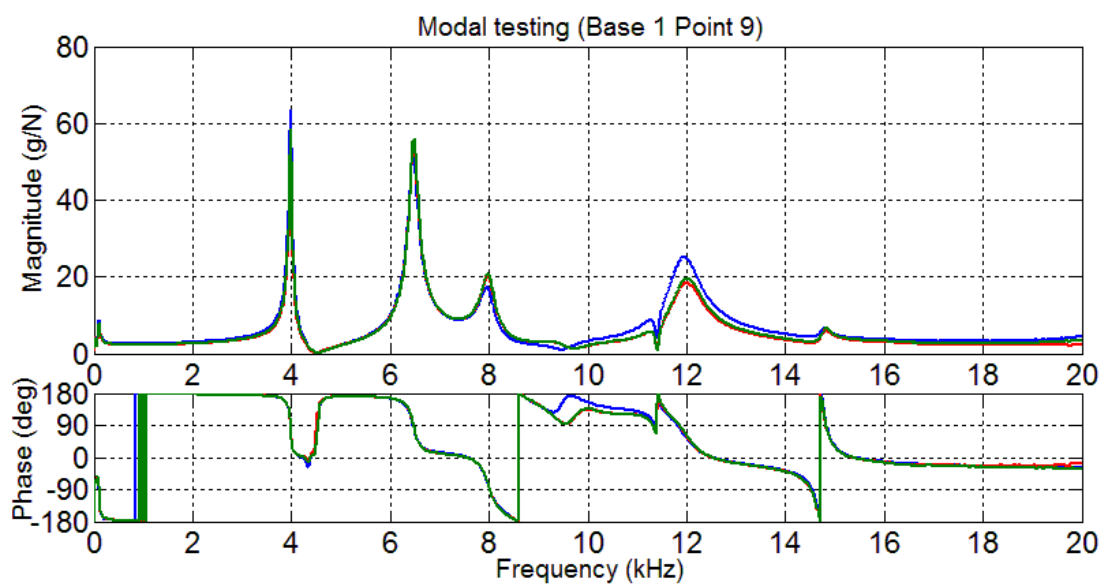
รูปที่ ค-46 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 6
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



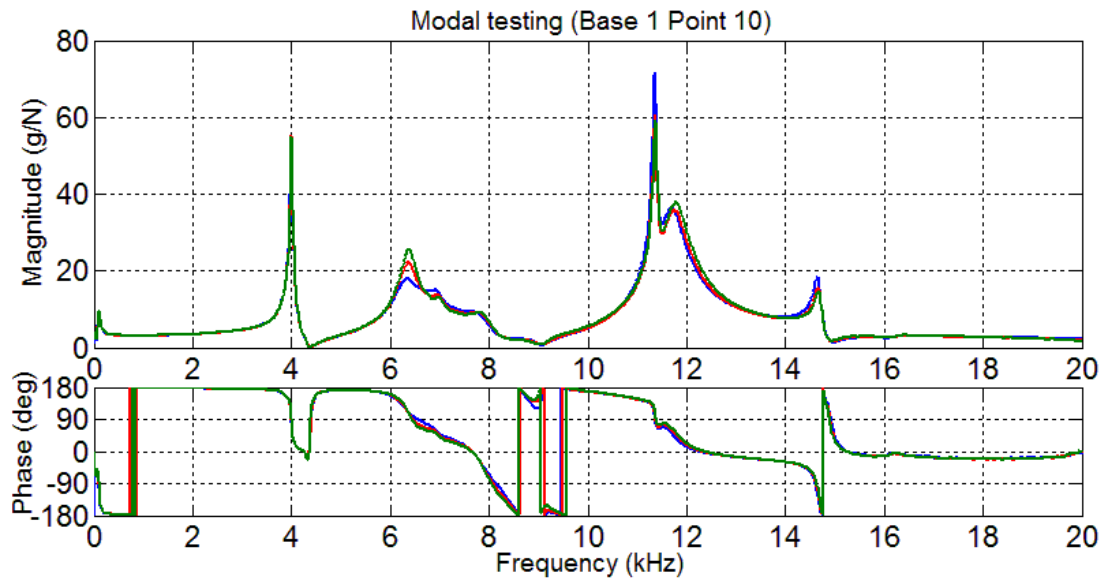
รูปที่ ค-47 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 7
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



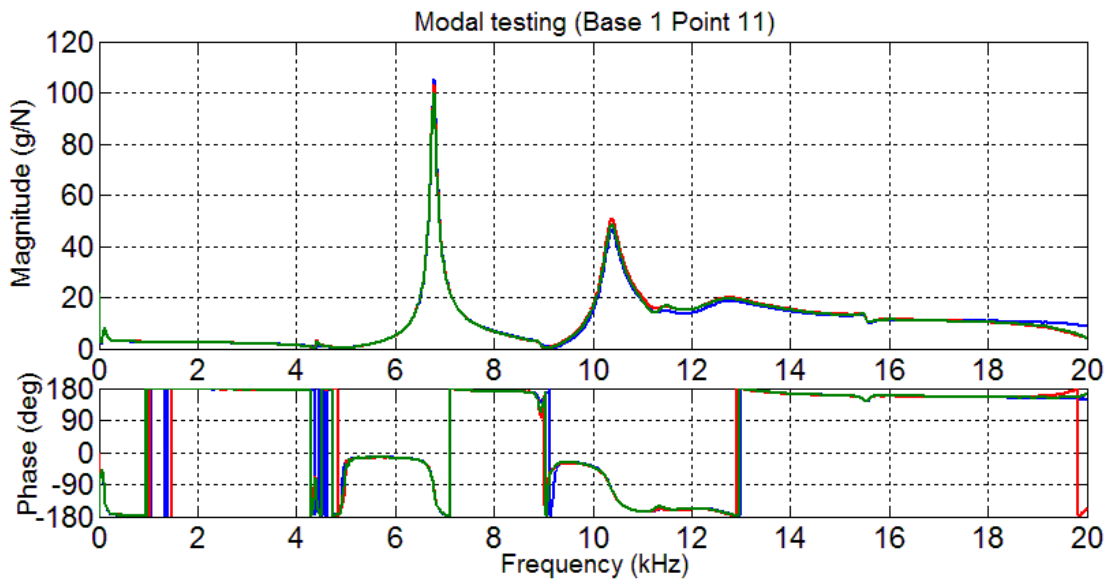
รูปที่ ค-48 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 8
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



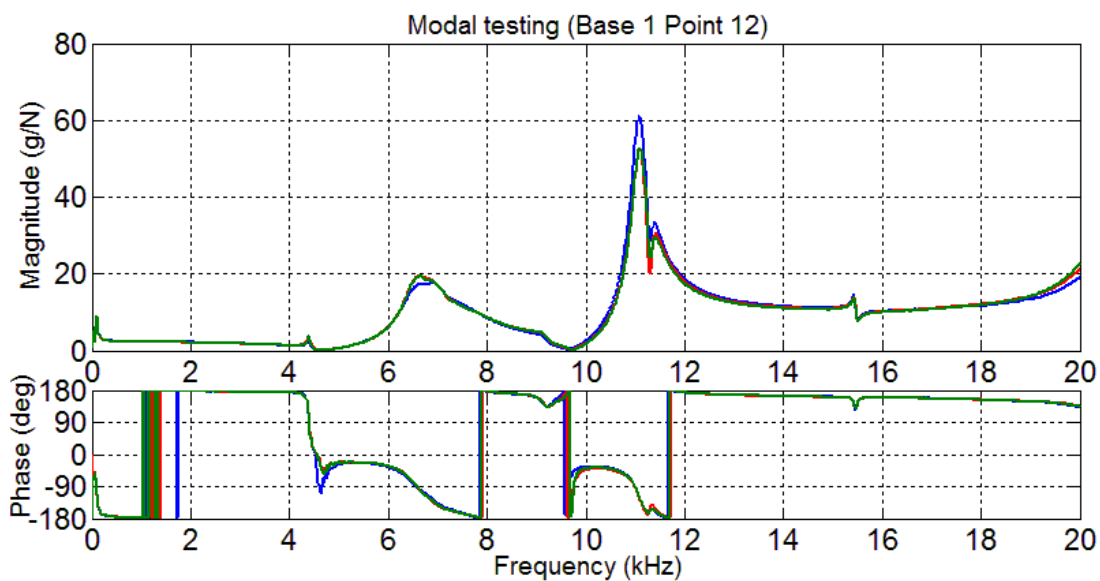
รูปที่ ค-49 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 9
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



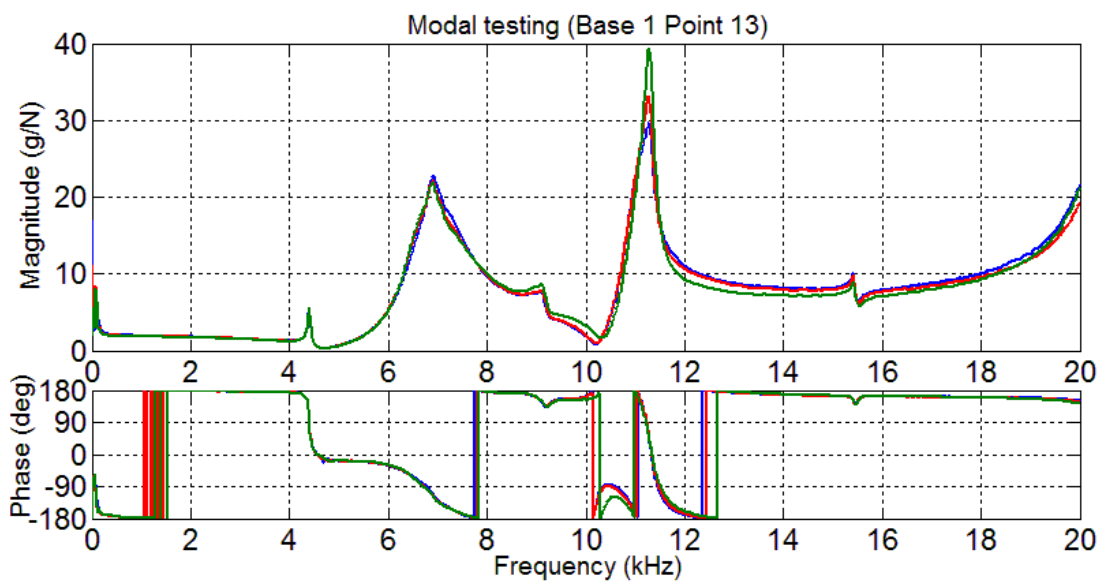
รูปที่ ค-50 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเด็ลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 10
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



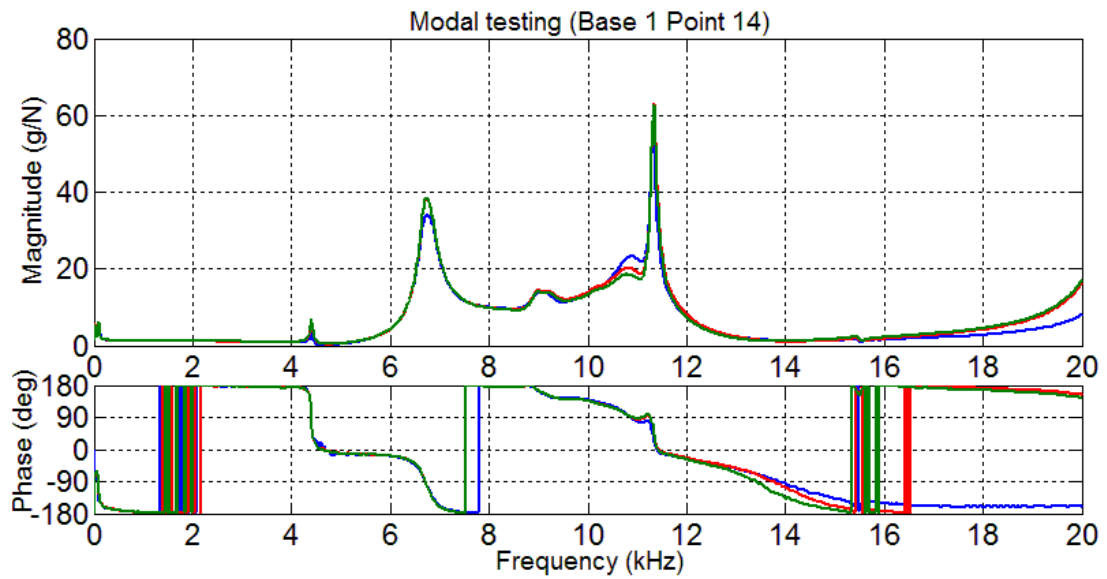
รูปที่ ค-51 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเด็ลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 11
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



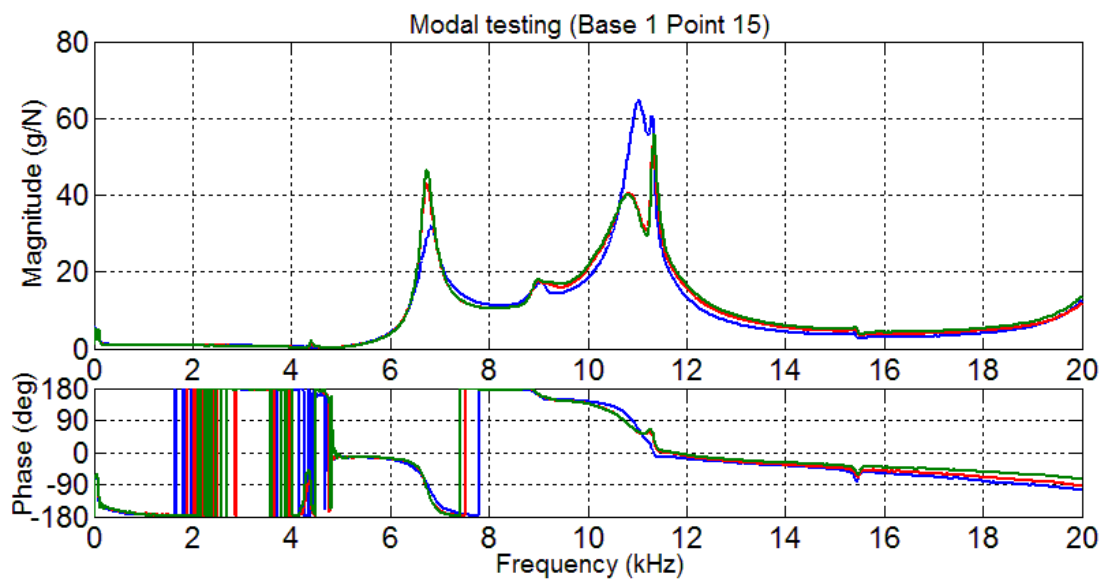
รูปที่ ค-52 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 12
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



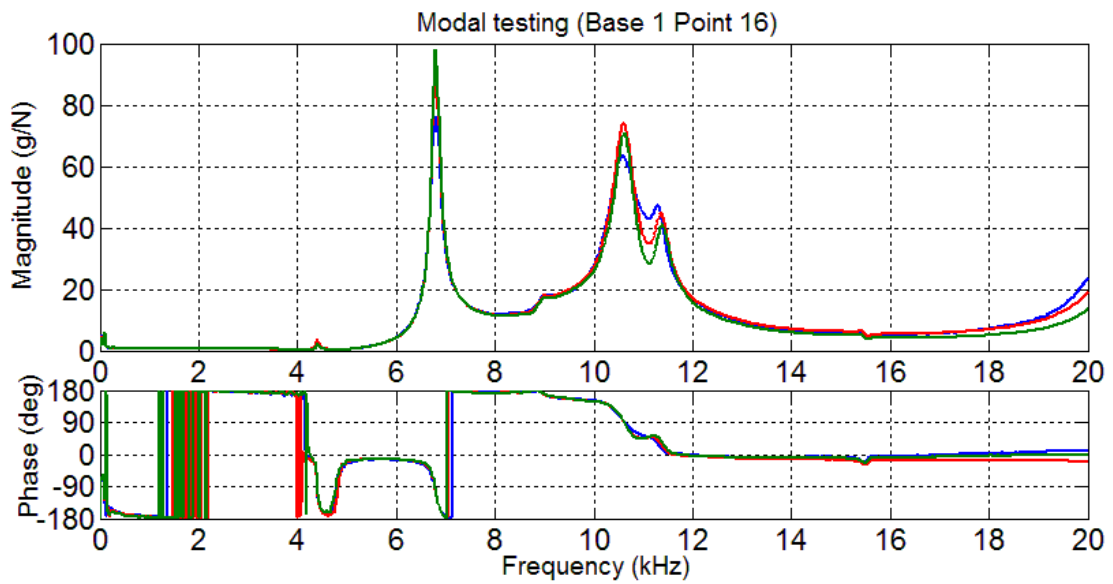
รูปที่ ค-53 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 13
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



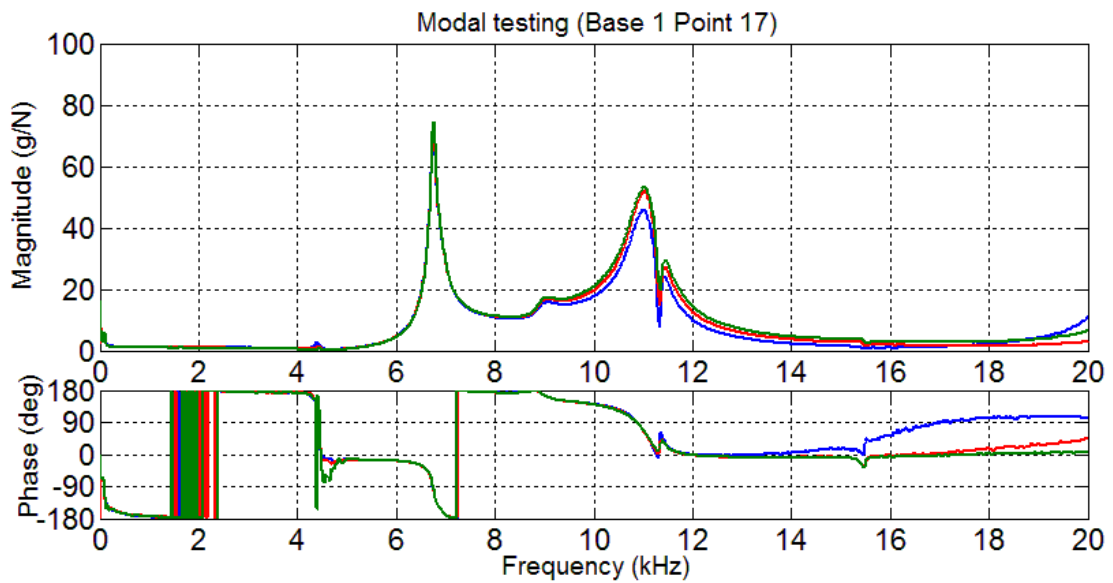
รูปที่ ค-54 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดilmอเตอร์ขึ้นที่ 1 จุดที่ 14
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



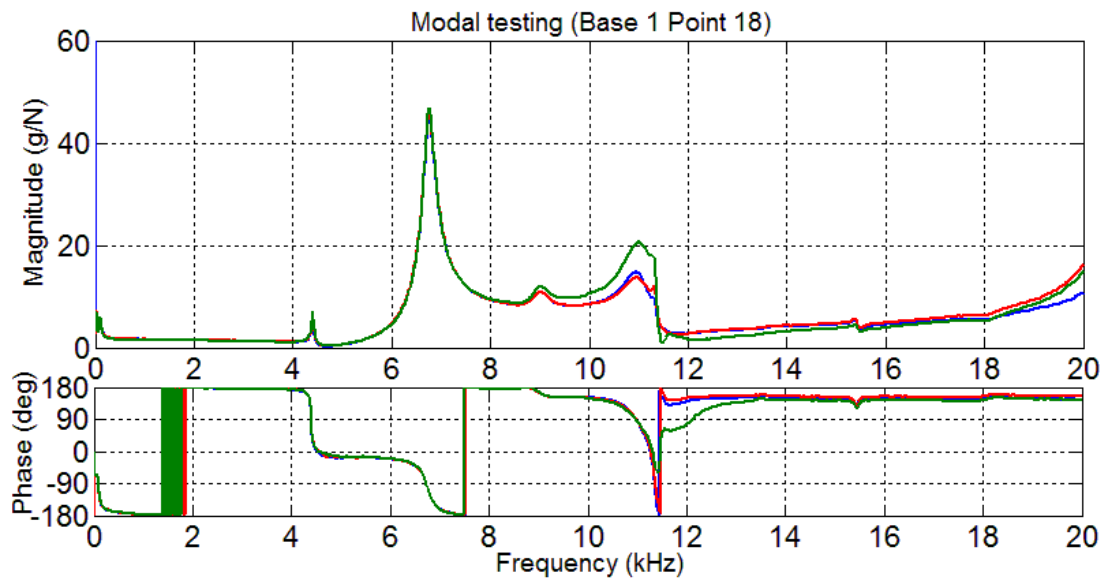
รูปที่ ค-55 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดilmอเตอร์ขึ้นที่ 1 จุดที่ 15
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



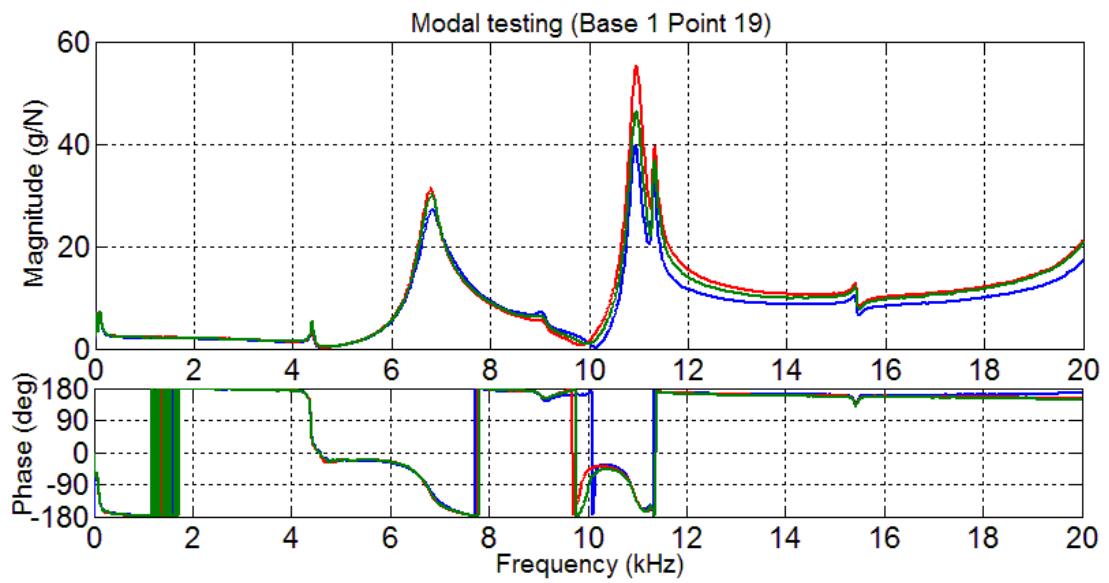
รูปที่ ค-56 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 16
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



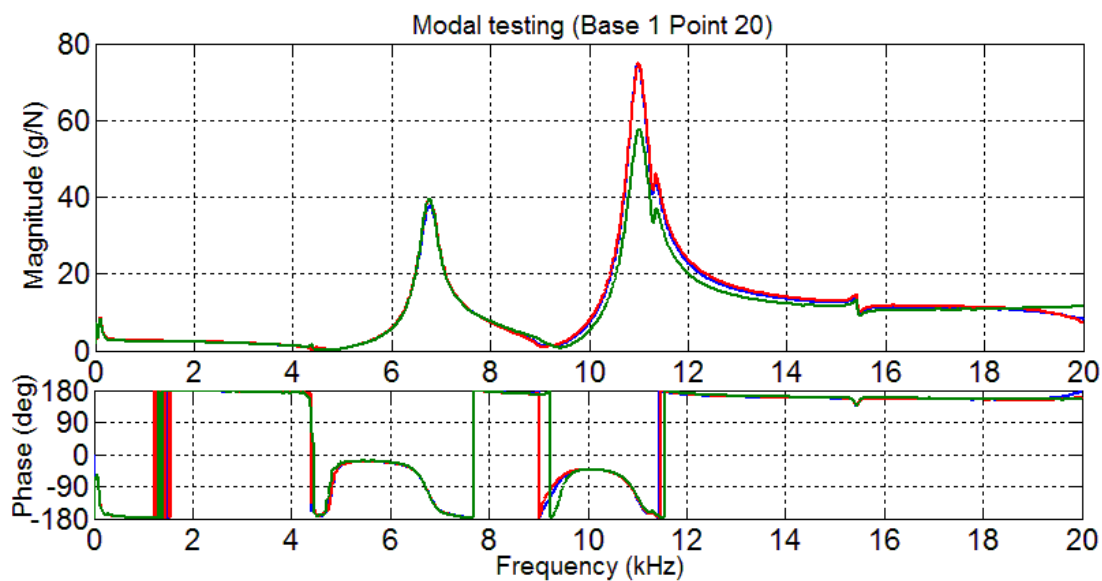
รูปที่ ค-57 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 17
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ค-58 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 18
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

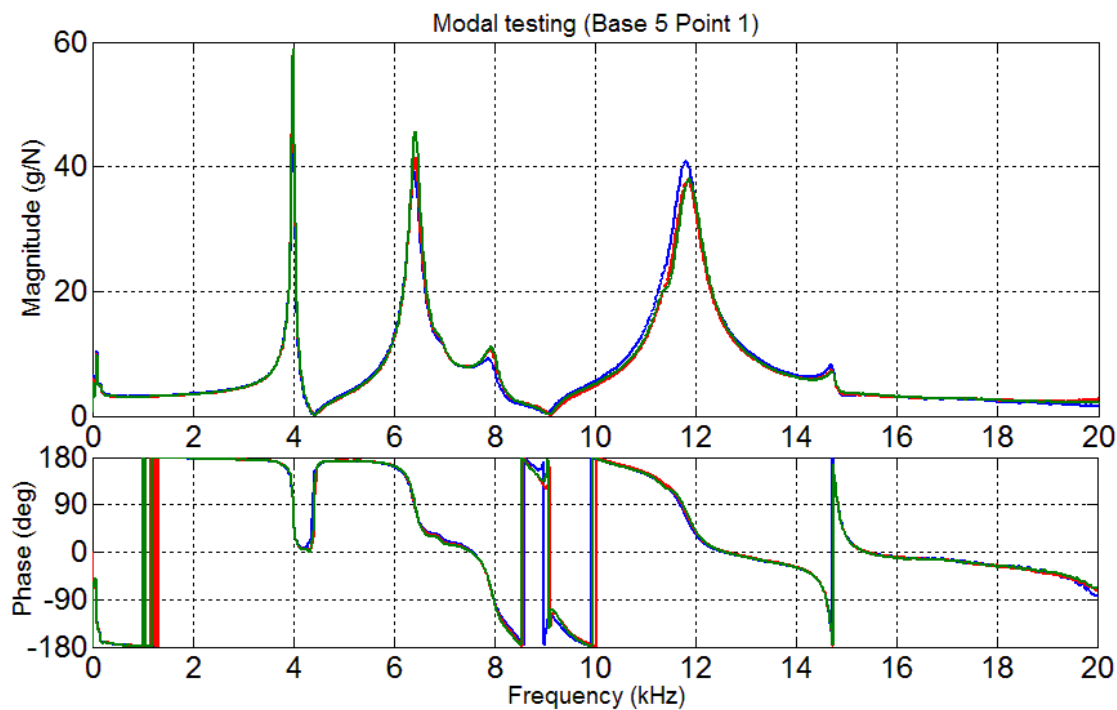


รูปที่ ค-59 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ชิ้นที่ 1 จุดที่ 19
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

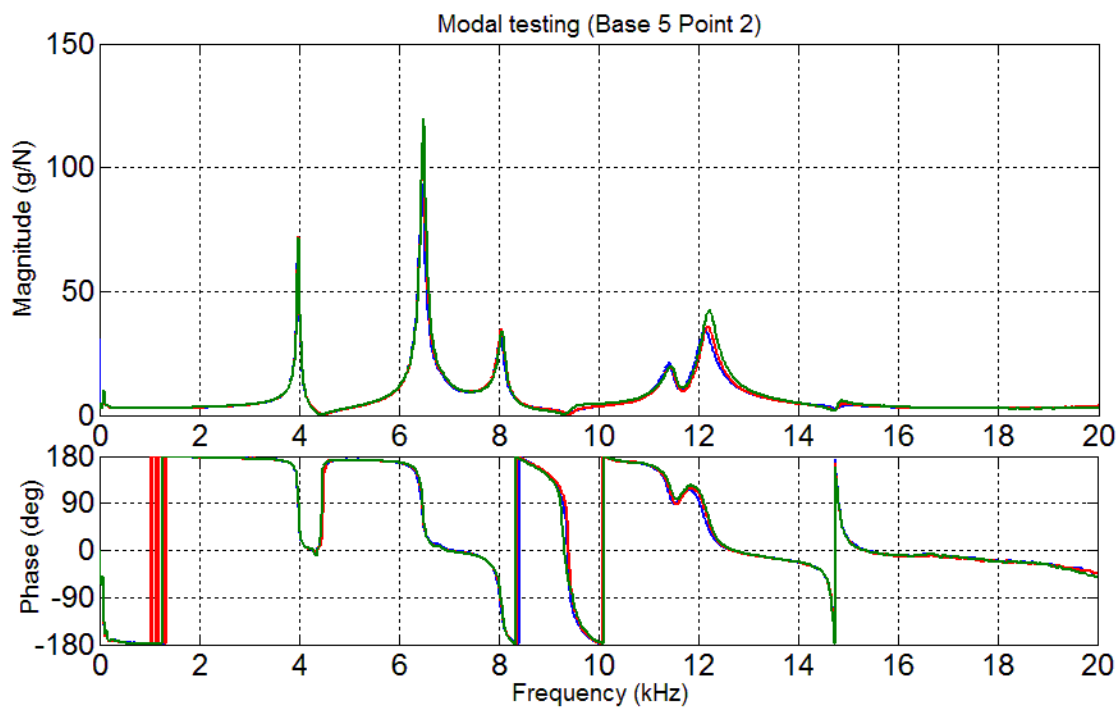


รูปที่ ค-60 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ขึ้นที่ 1 จุดที่ 20
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

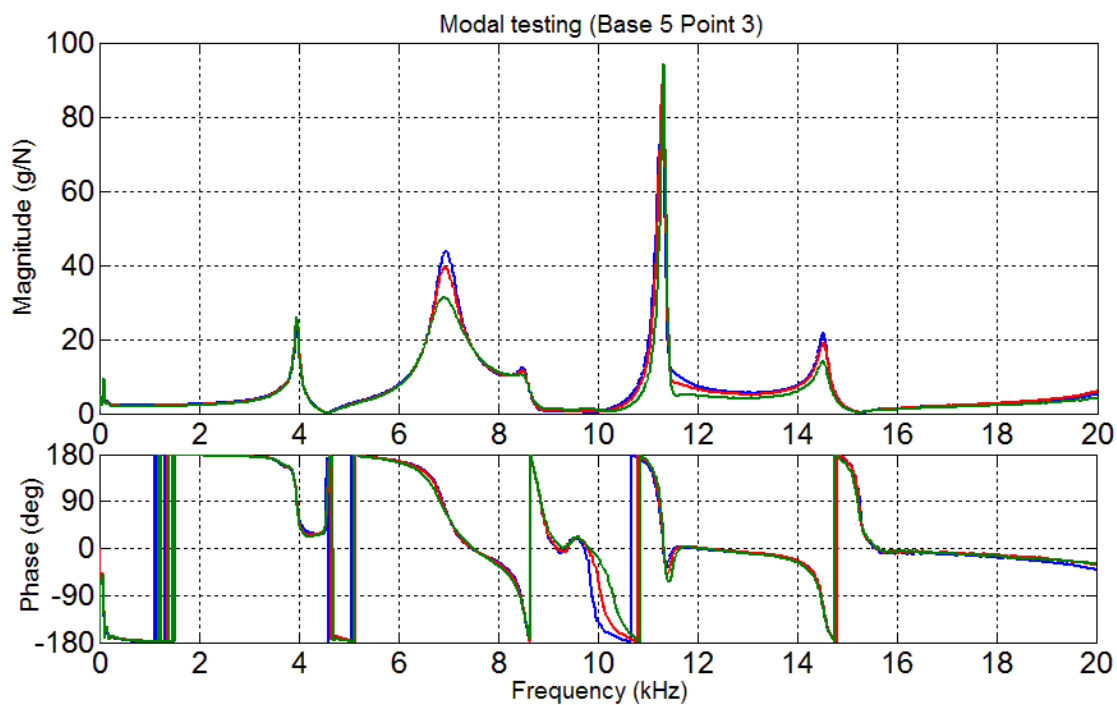
2. แบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ขึ้นที่ 5



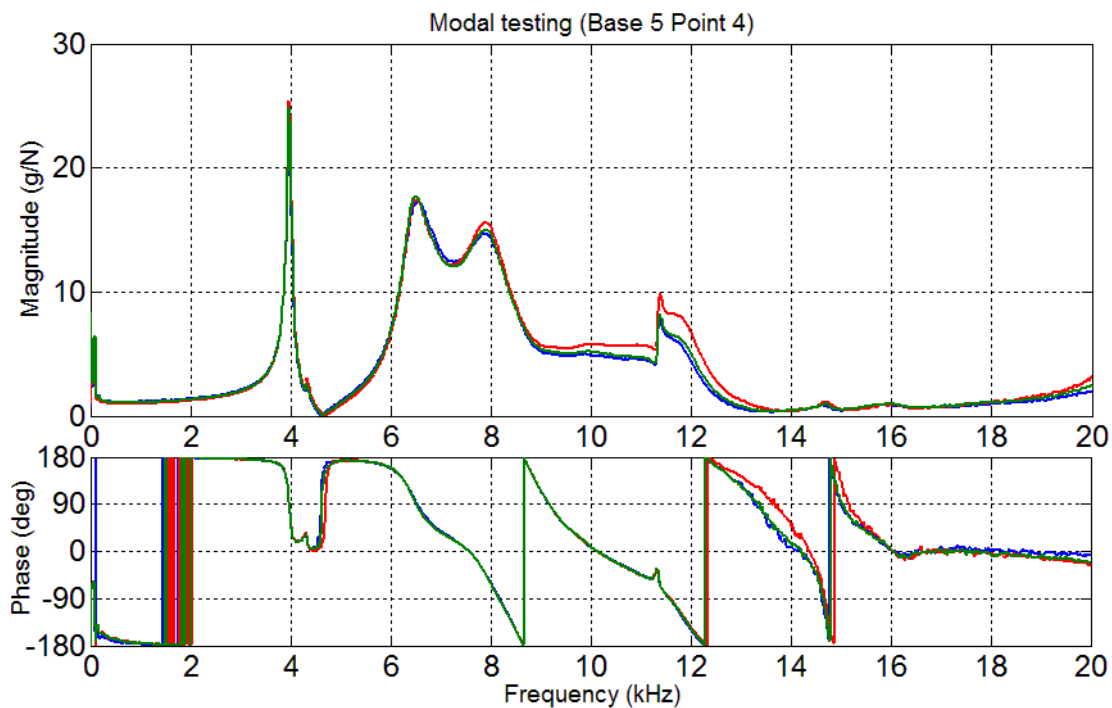
รูปที่ ค-61 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ขึ้นที่ 5 จุดที่ 1
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



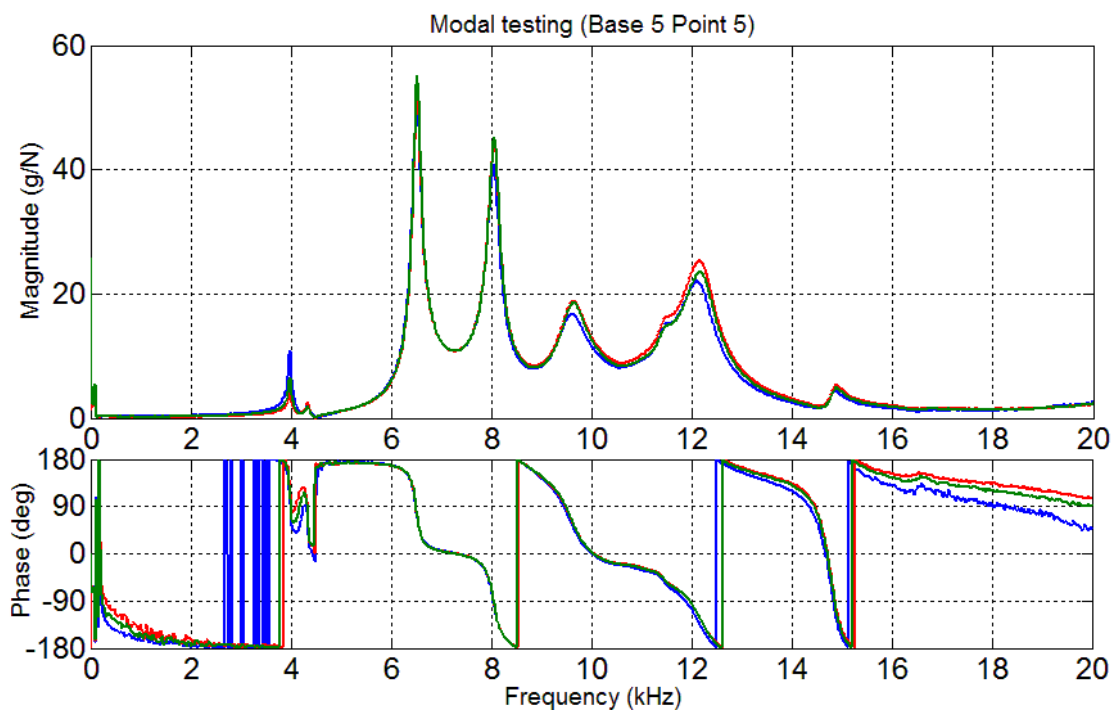
รูปที่ ค-62 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 2
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



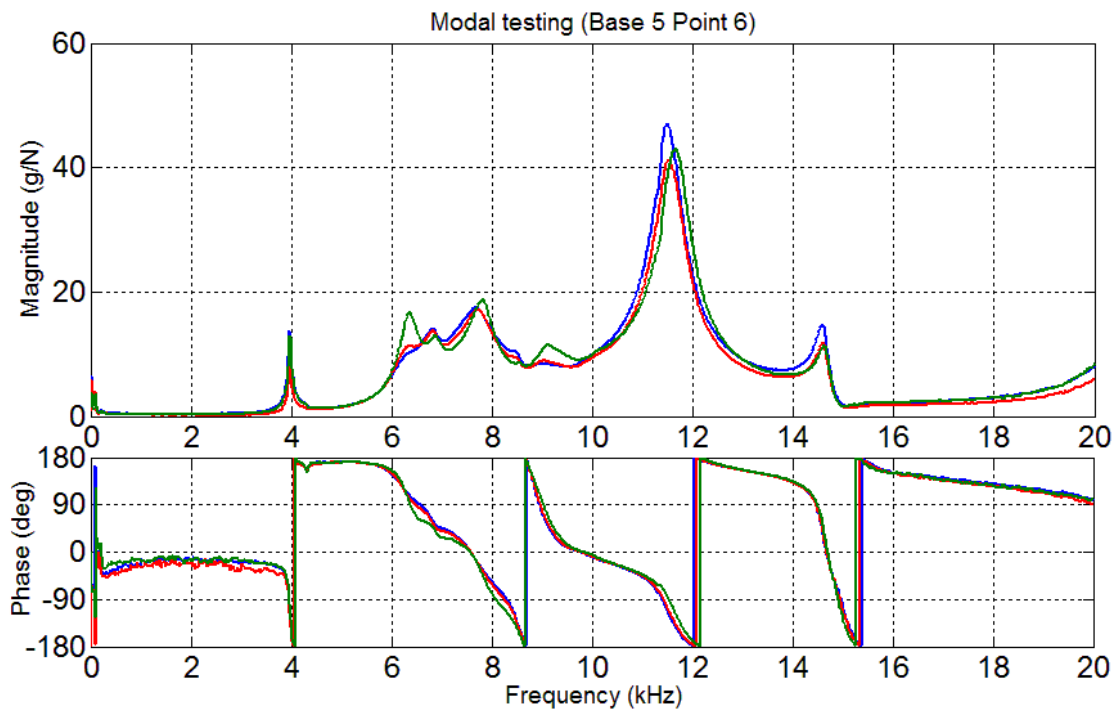
รูปที่ ค-63 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิโมเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 3
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



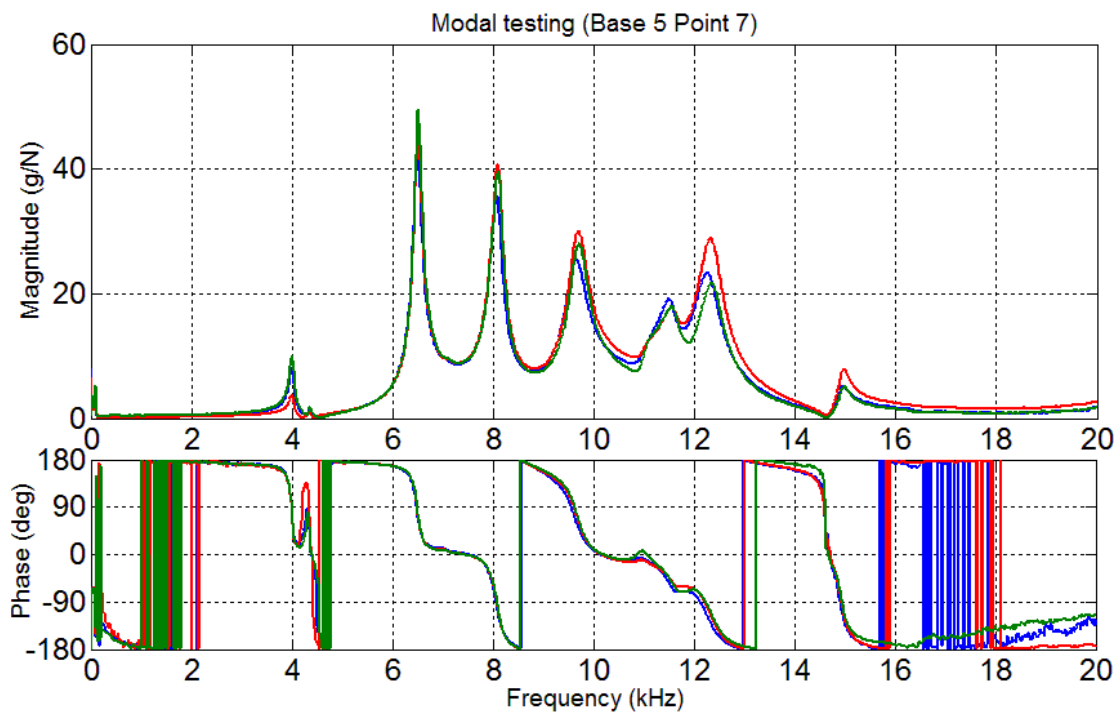
รูปที่ ค-64 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 4
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



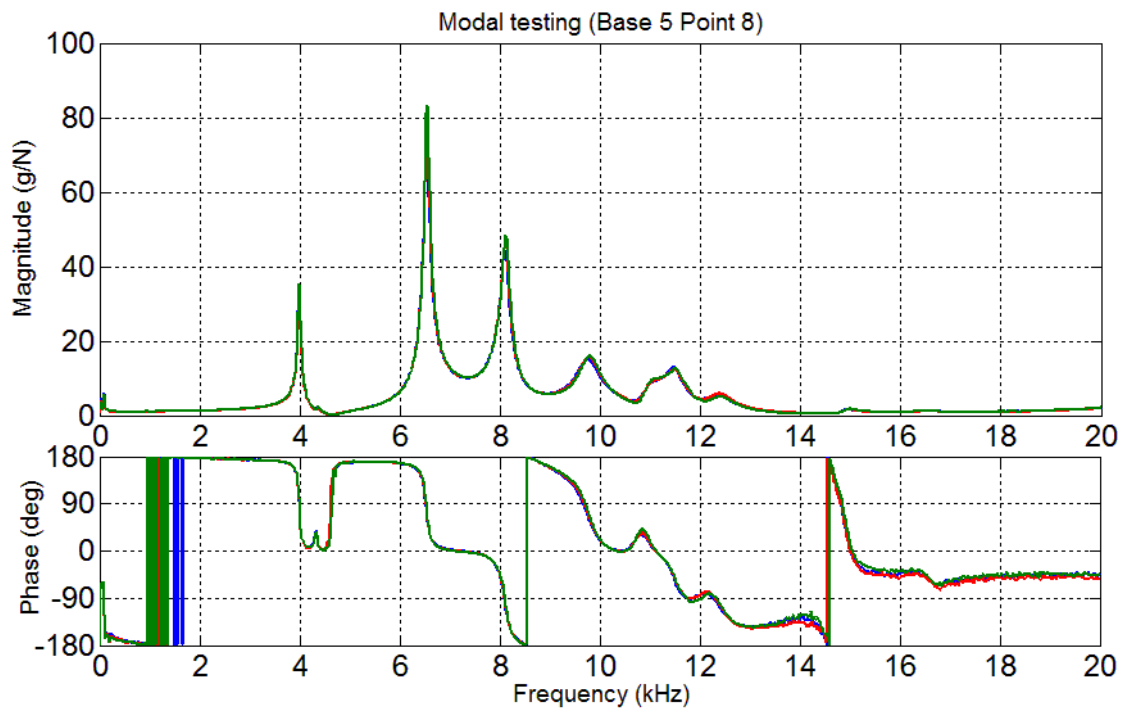
รูปที่ ค-65 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 5
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



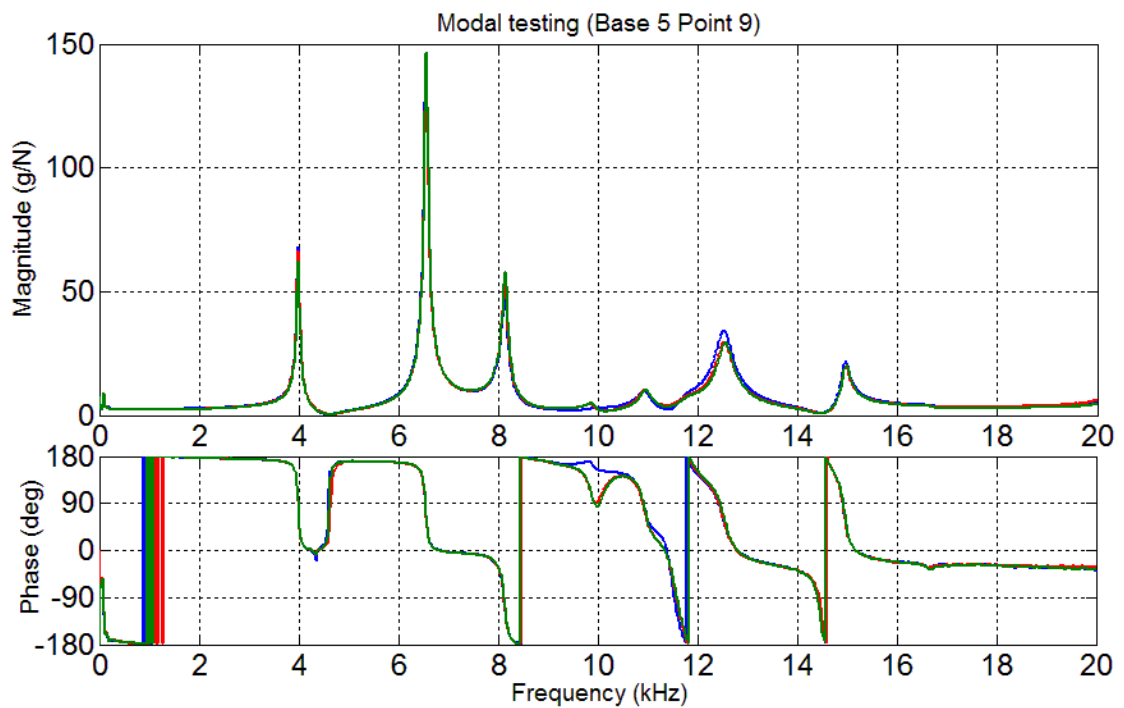
รูปที่ ค-66 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 6
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



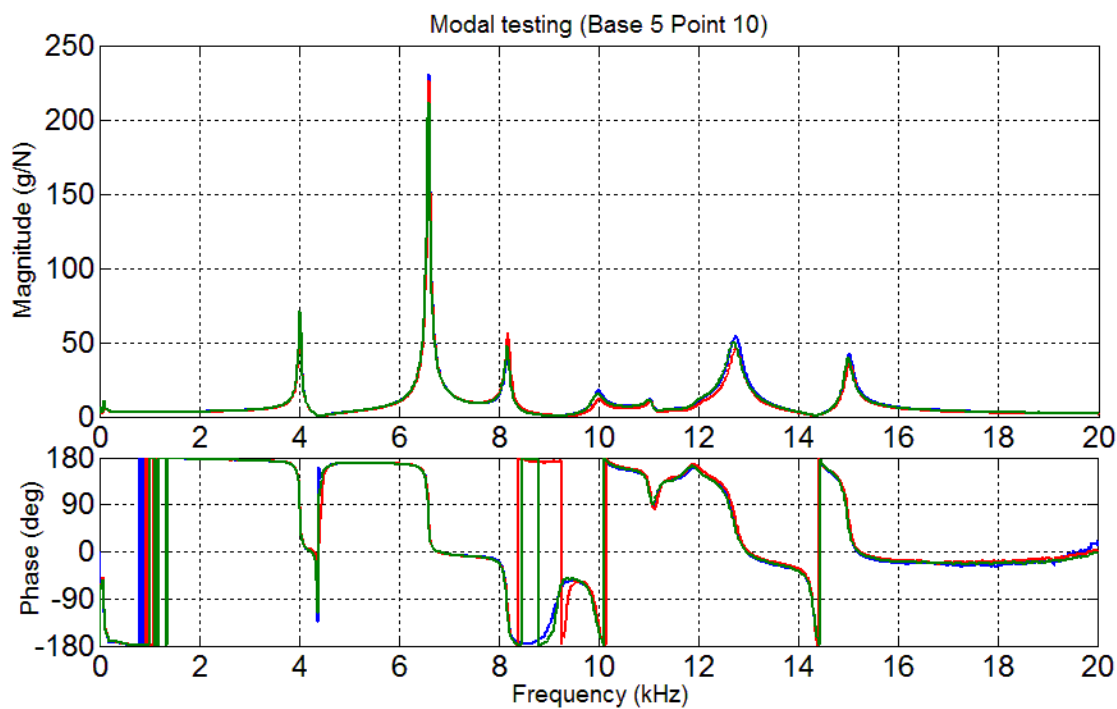
รูปที่ ค-67 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 7
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



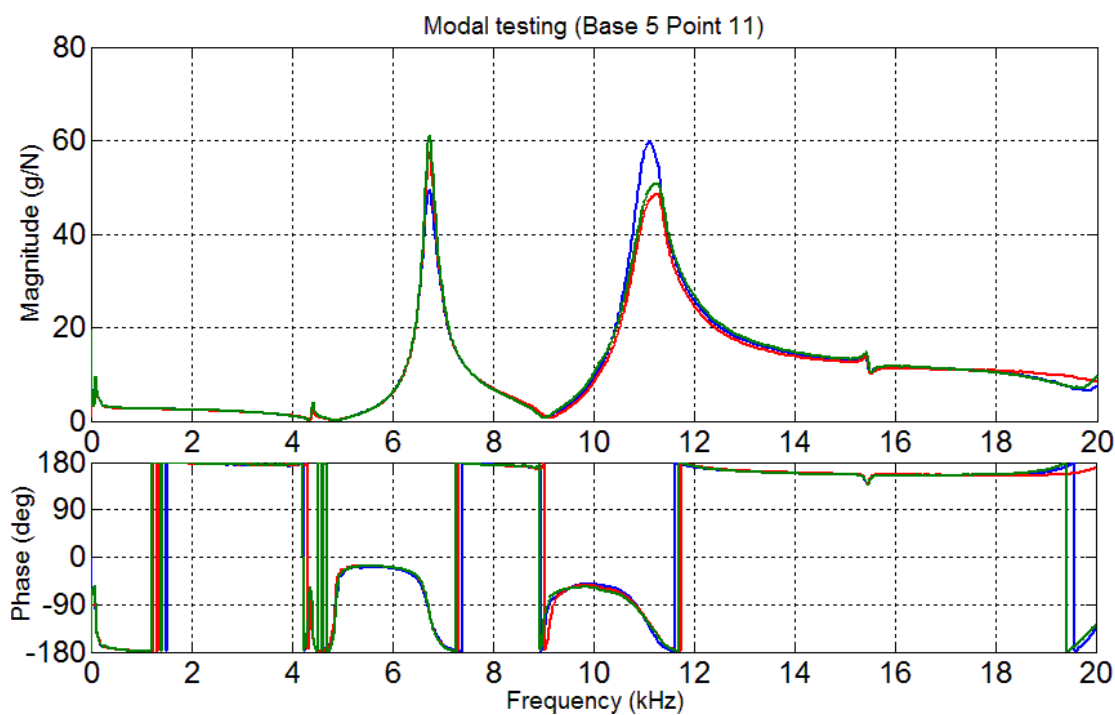
รูปที่ ค-68 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 8
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



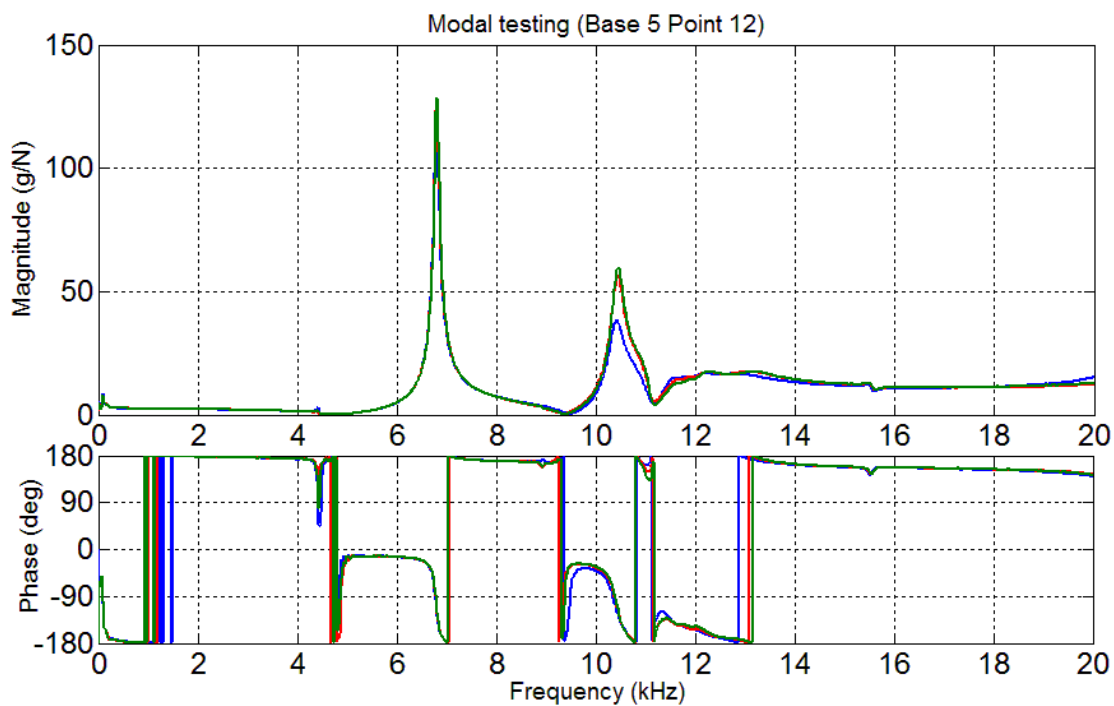
รูปที่ ค-69 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 9
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



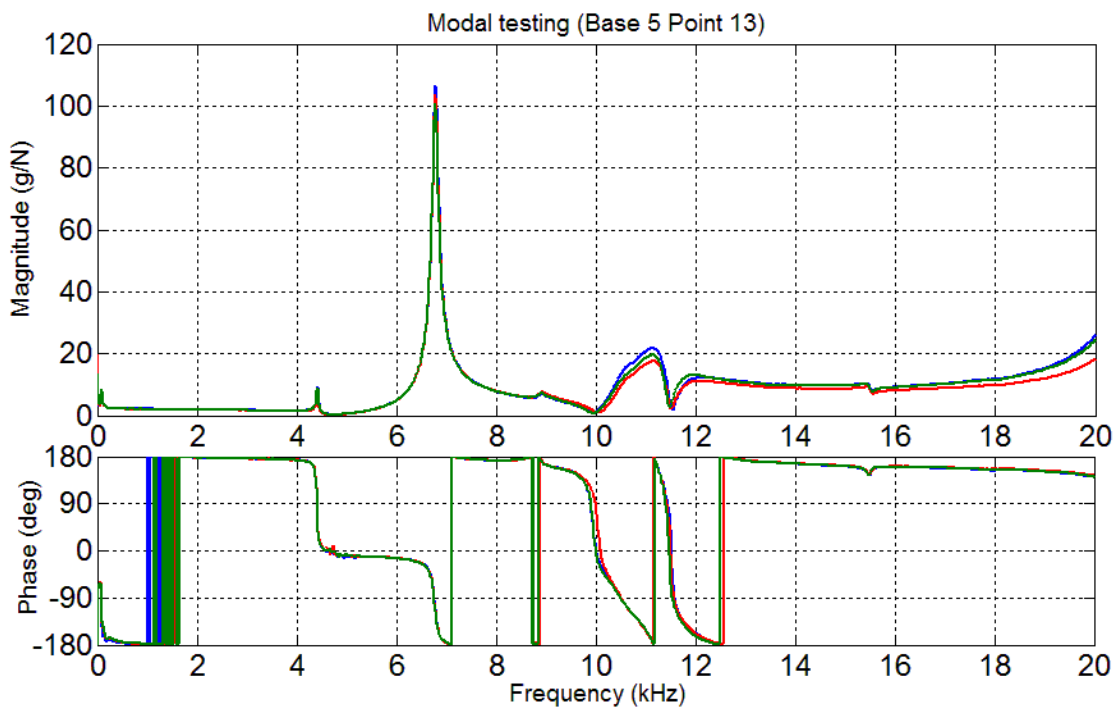
รูปที่ ค-70 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ขึ้นที่ 5 จุดที่ 10
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



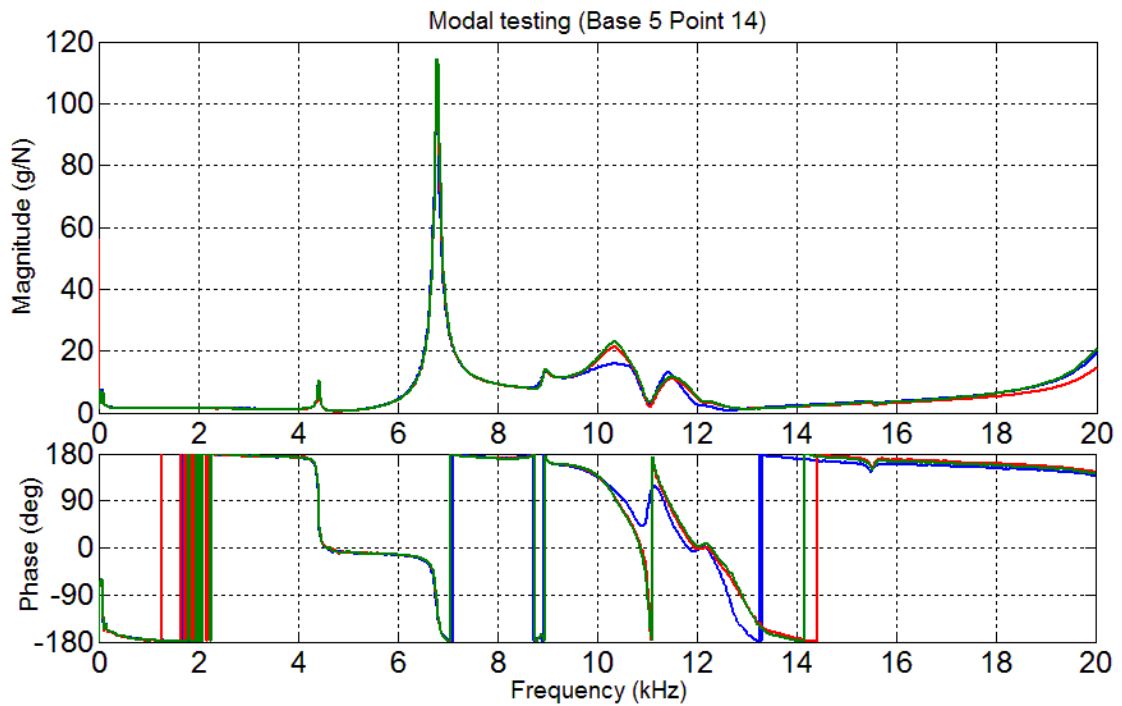
รูปที่ ค-71 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ขึ้นที่ 5 จุดที่ 11
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



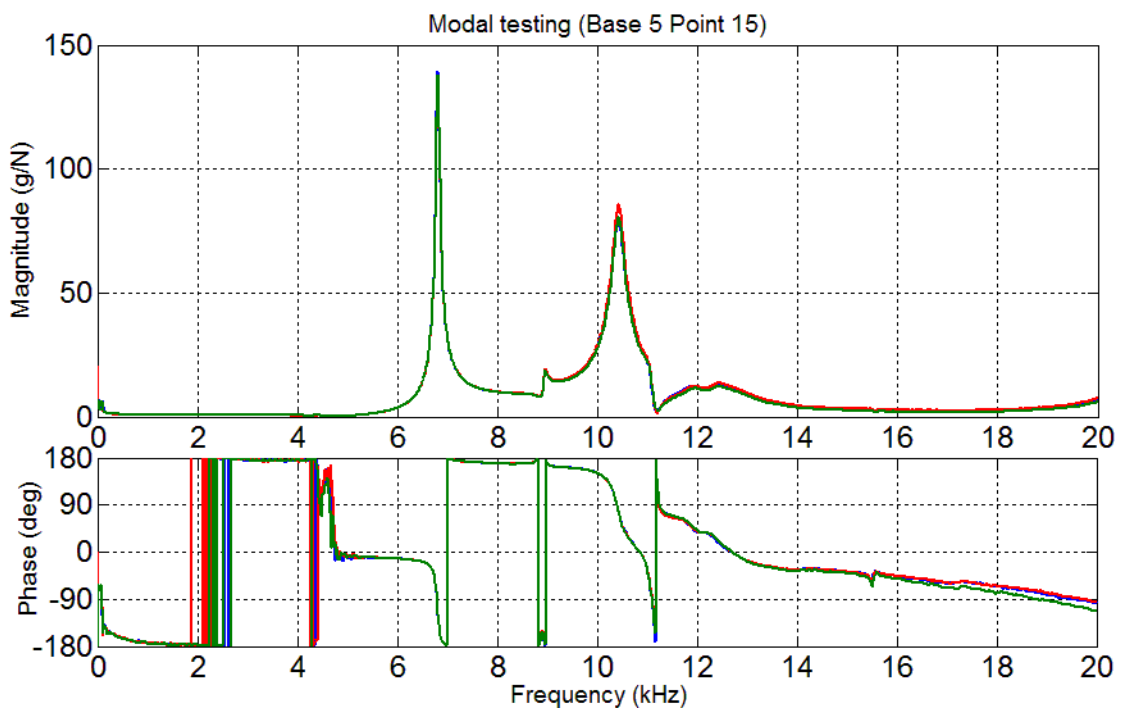
รูปที่ ค-72 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 12
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



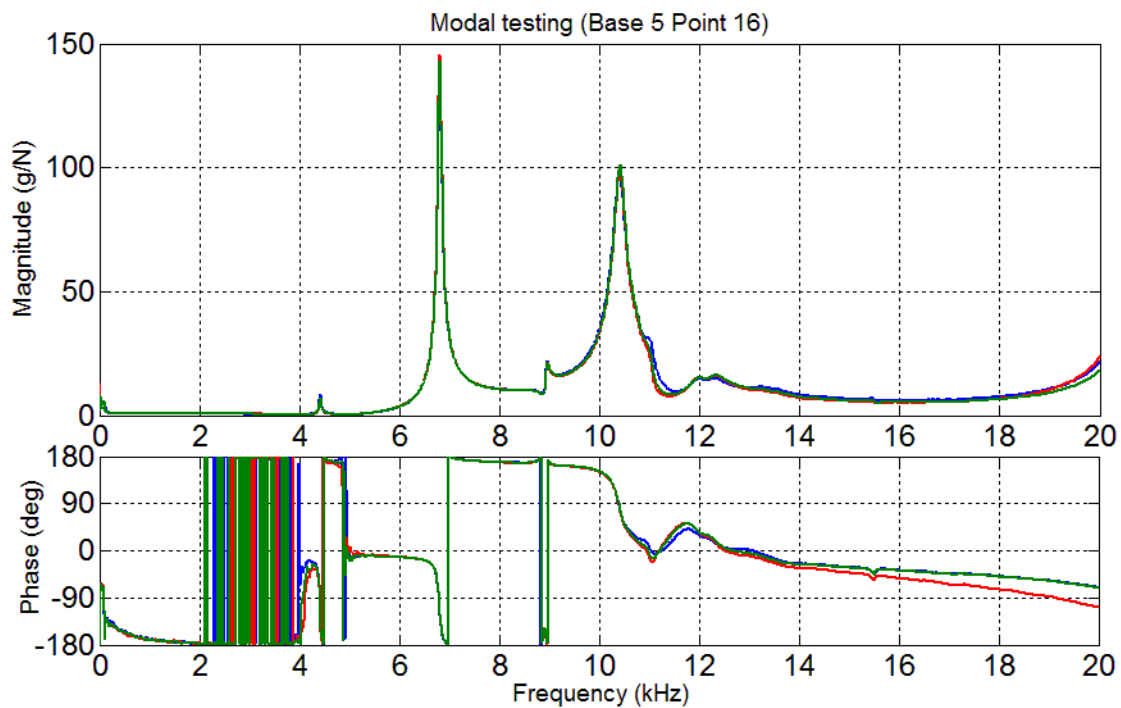
รูปที่ ค-73 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 13
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



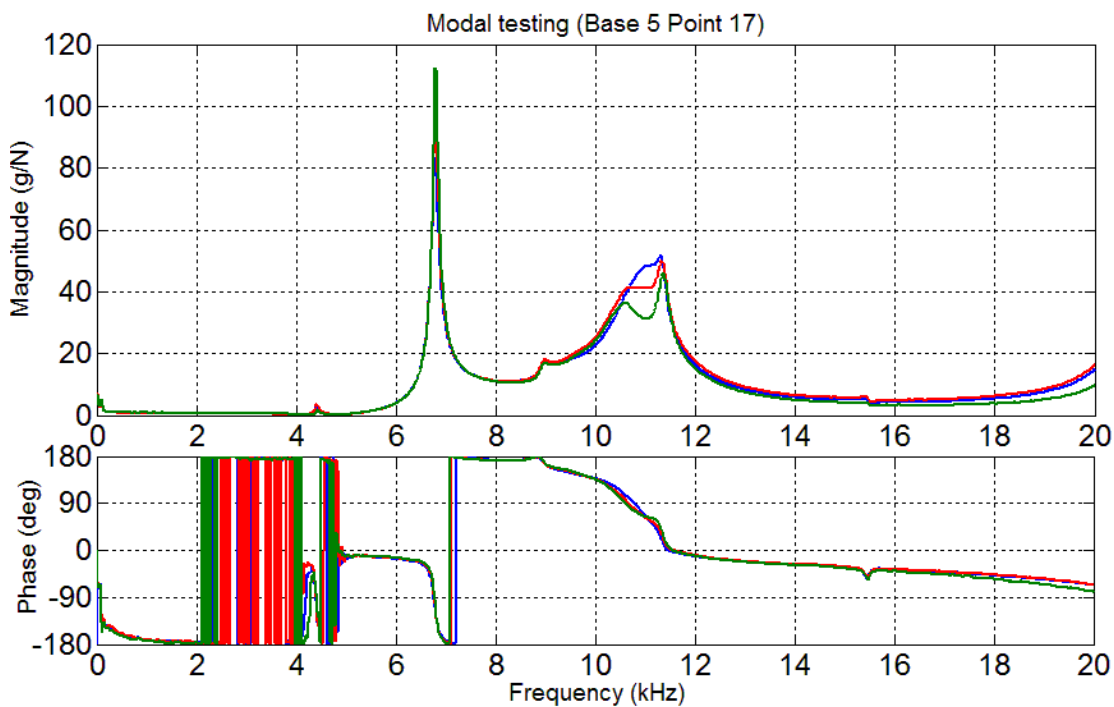
รูปที่ ค-74 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 14
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



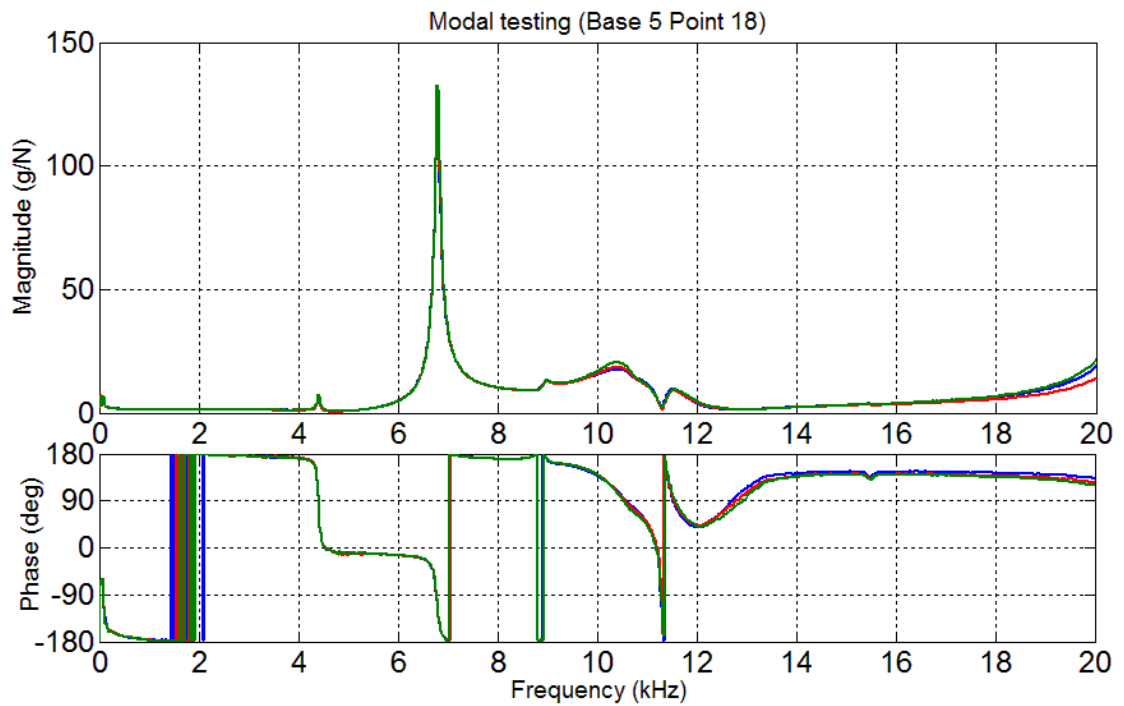
รูปที่ ค-75 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 15
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



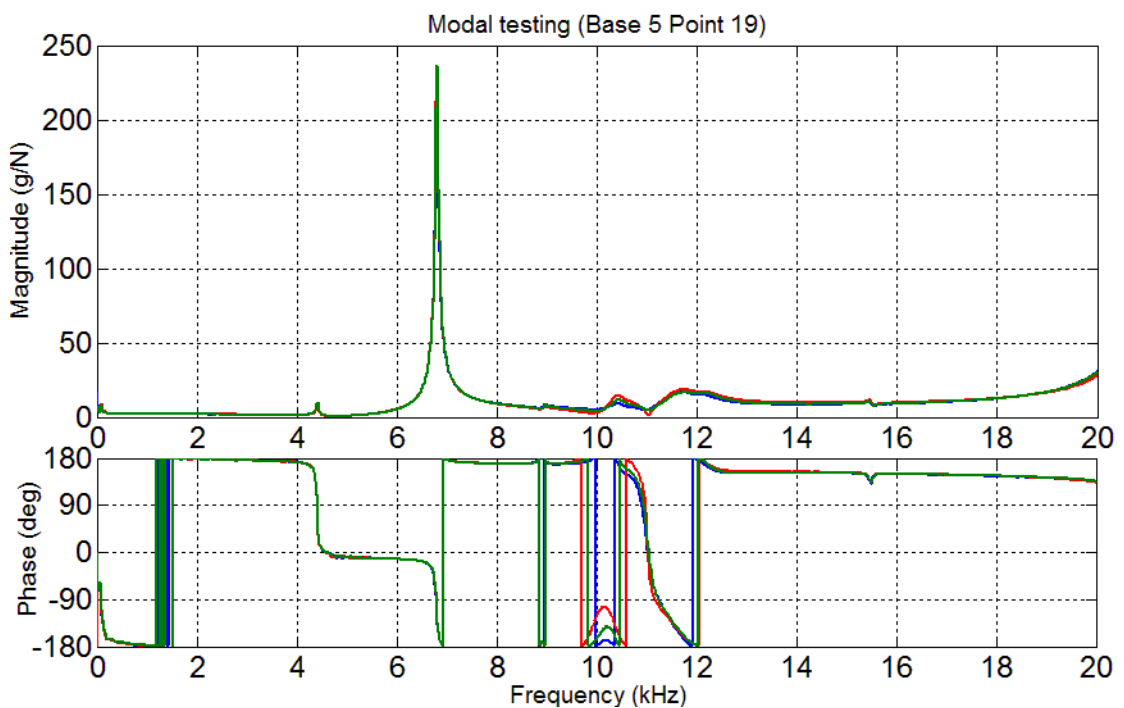
รูปที่ ค-76 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชนิดที่ 5 จุดที่ 16
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



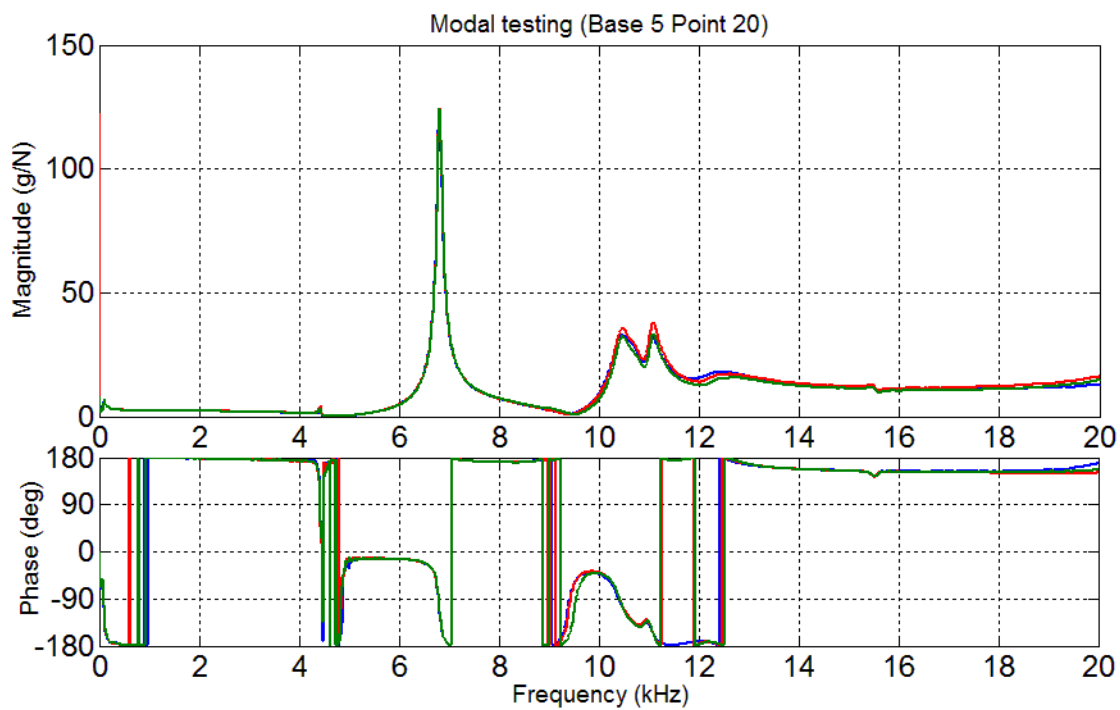
รูปที่ ค-77 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชนิดที่ 5 จุดที่ 17
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ค-78 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 18
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ค-79 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 19
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ค-80 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของฐานของสปริงเดลิมาเตอร์ชิ้นที่ 5 จุดที่ 20
เมื่อกระตุ้นตามแนวแกนด้วยค้อนเคาะ

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของสปริงเดิล
มอเตอร์ด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

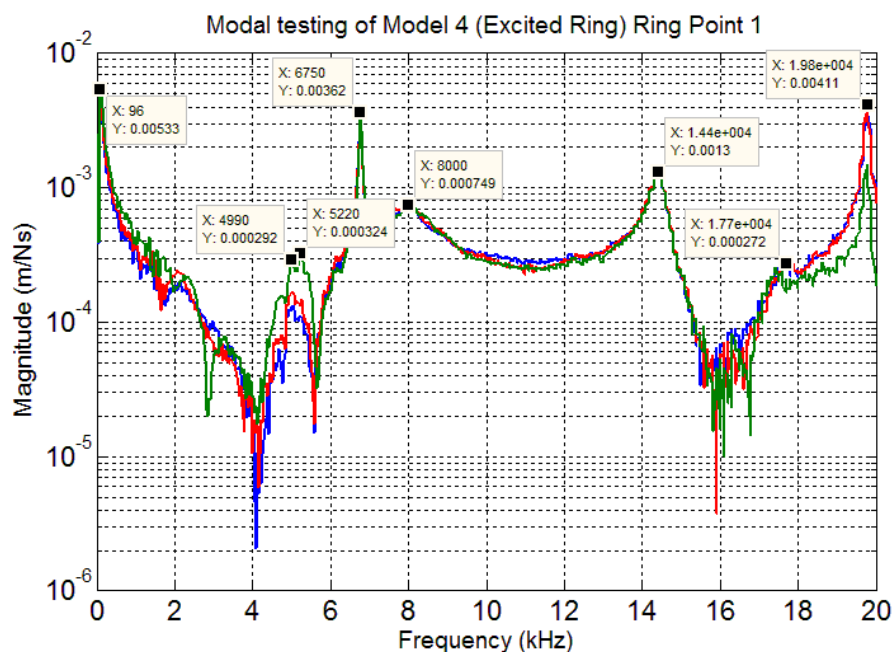
ผลจากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนจะแสดงอยู่ในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ของจุดวัดค่าการสั่นสะเทือน ณ จุดต่าง ๆ บนแบบจำลอง โดยผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองส่วนตามชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระตุ้น คือ ค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ง.1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะ

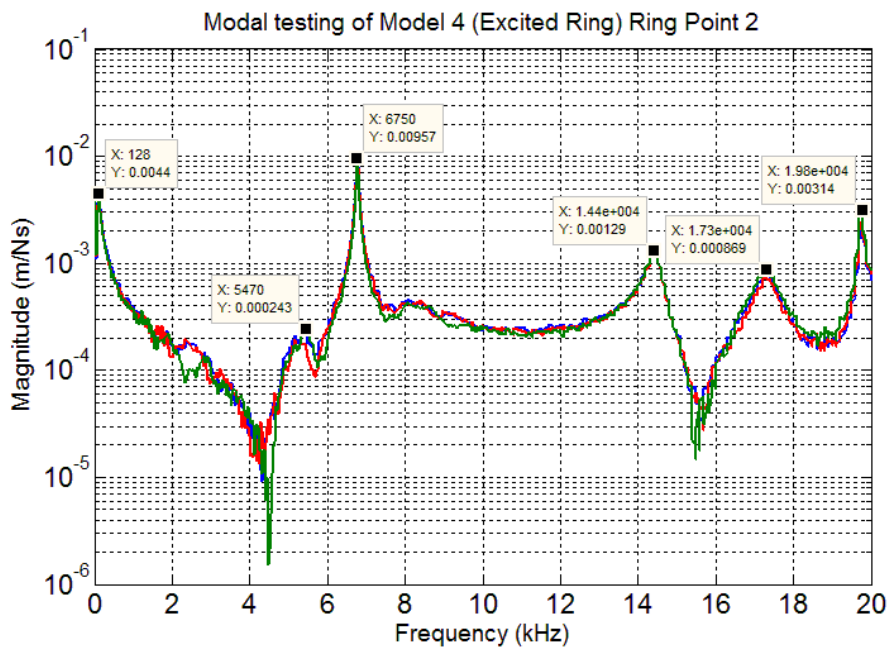
ผลการทดสอบในส่วนนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนตามจุดที่ใช้ค้อนเคาะในการกระตุ้น ได้แก่ บริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยมีผลการทดสอบ ดังนี้

1. กระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ

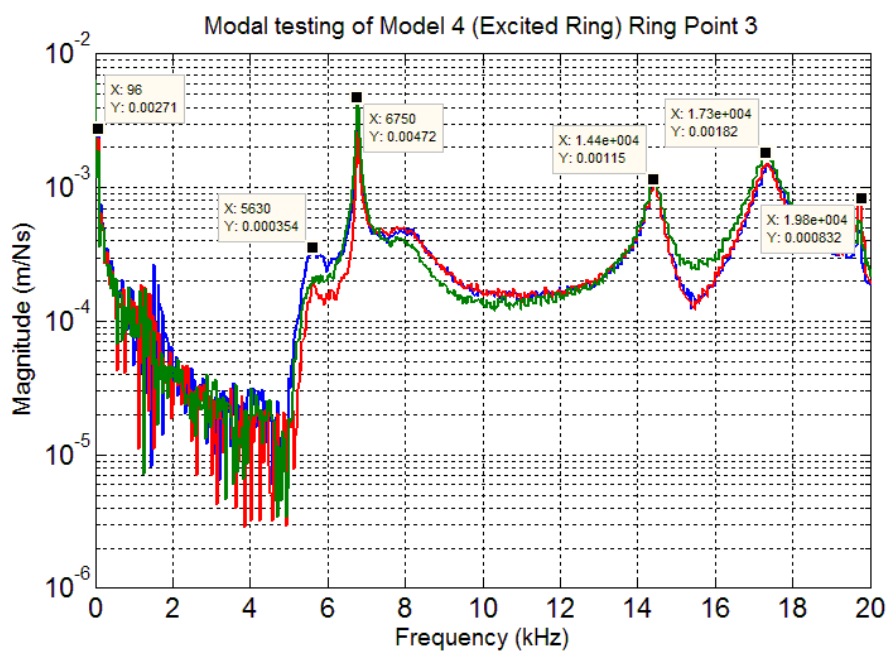
1.1 วัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ



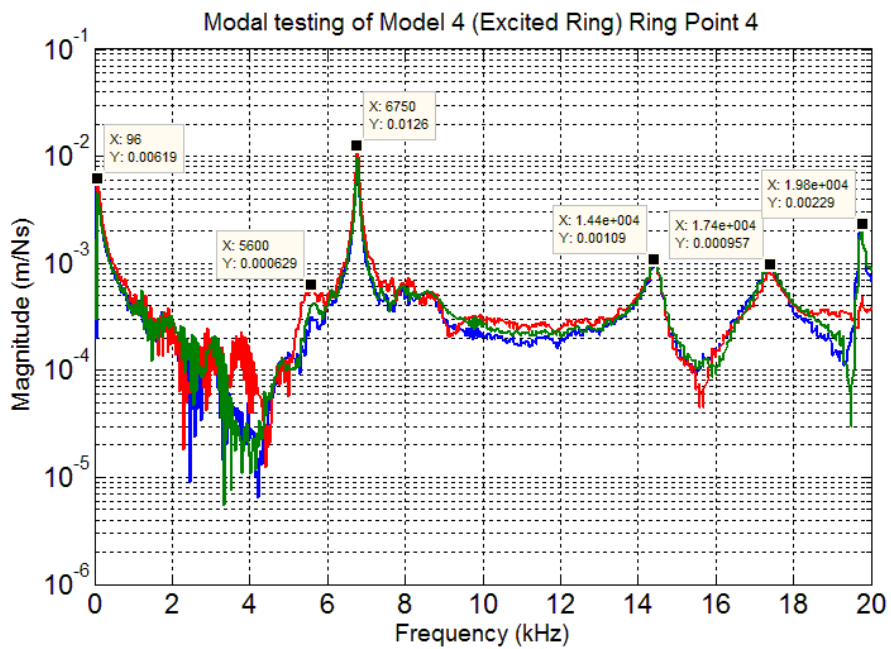
รูปที่ ง-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 1 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



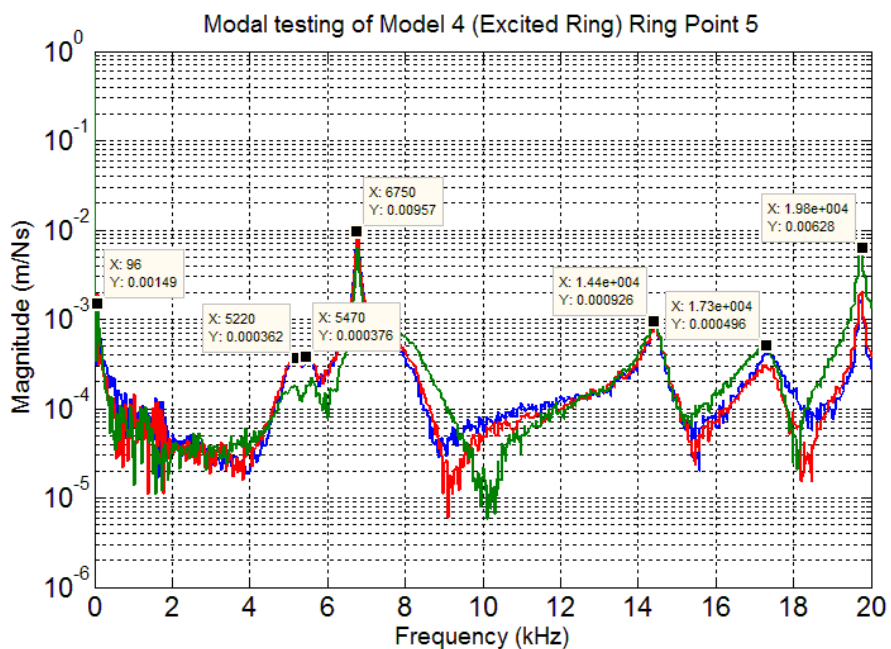
รูปที่ ง-2 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 2 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ง-3 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 3 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ

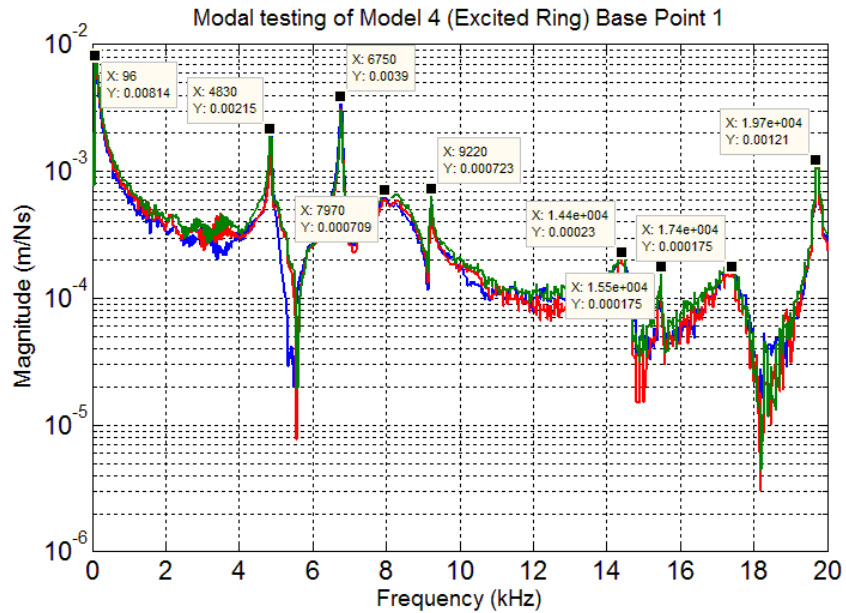


รูปที่ ง-4 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 4 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ

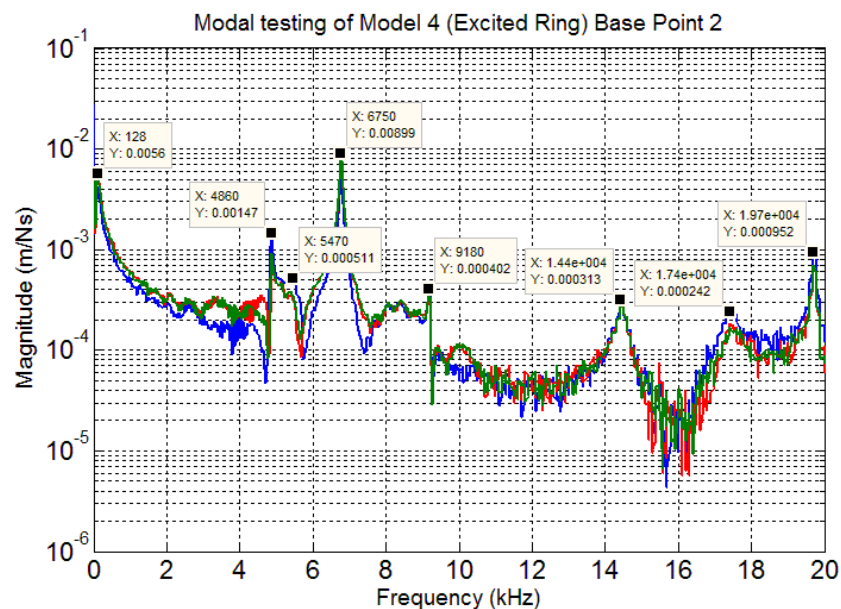


รูปที่ ง-5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 5 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ

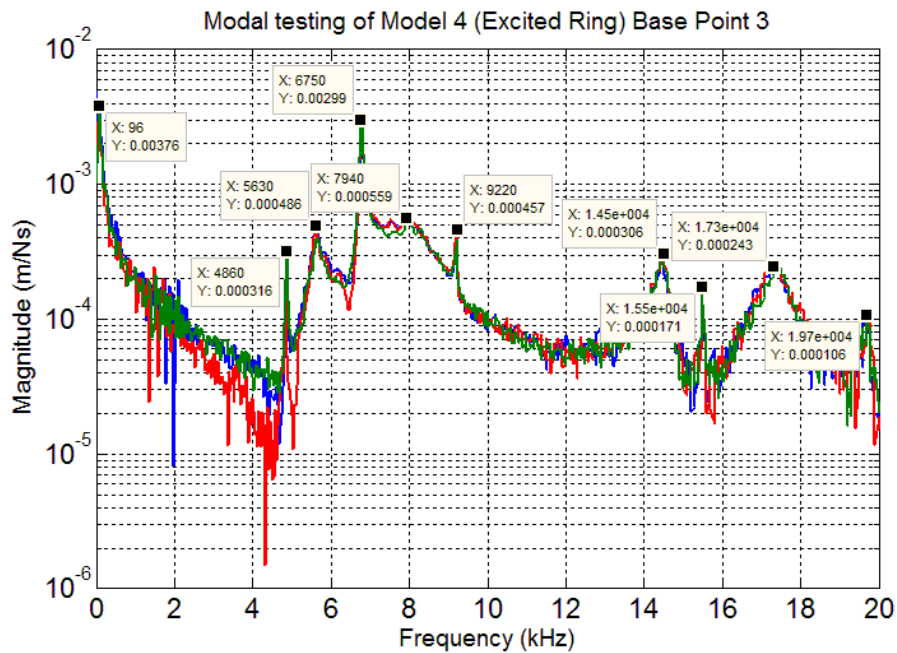
1.2 วัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์



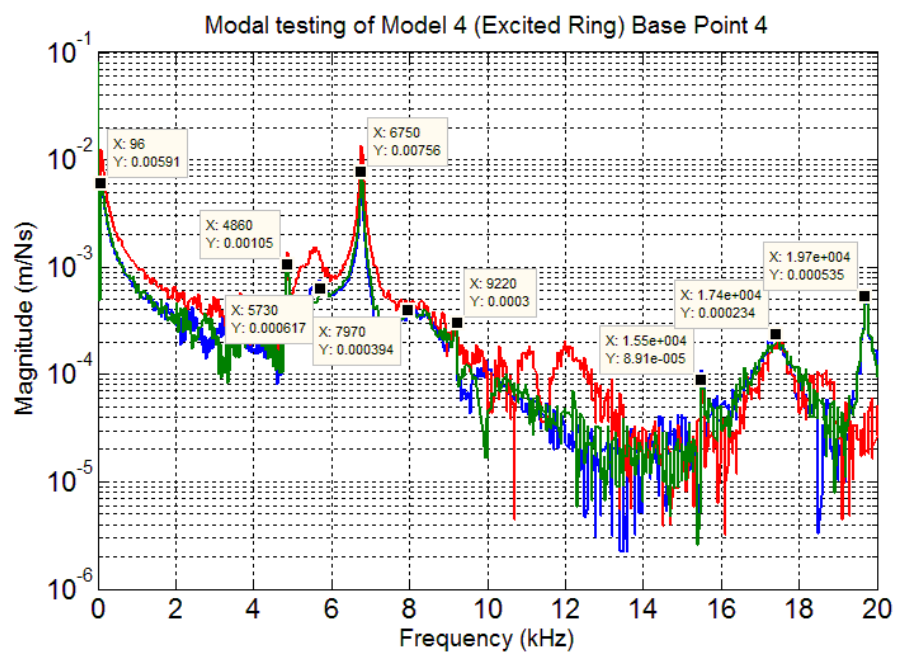
รูปที่ ง-6 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จุดที่ 1 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



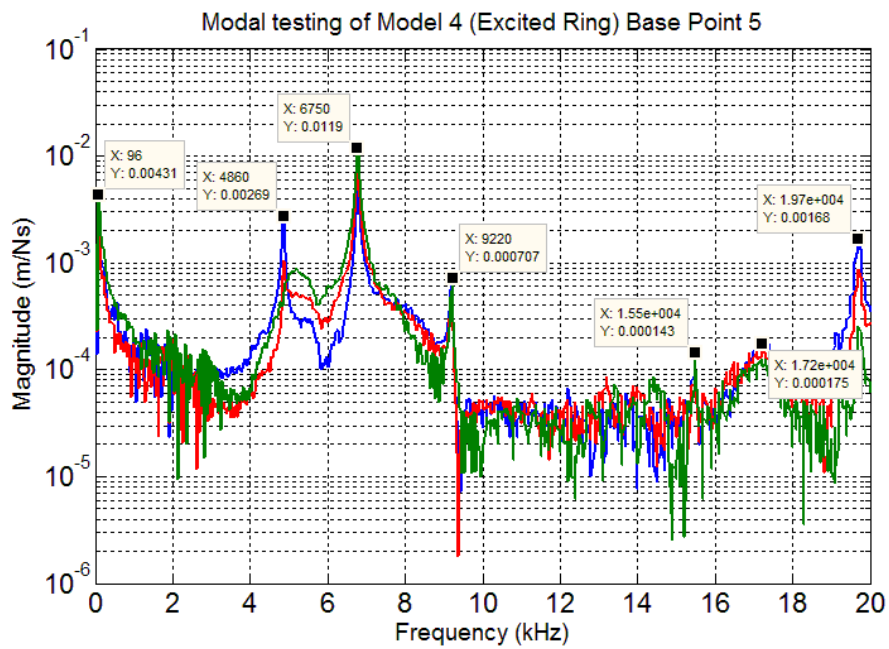
รูปที่ ง-7 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จุดที่ 2 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



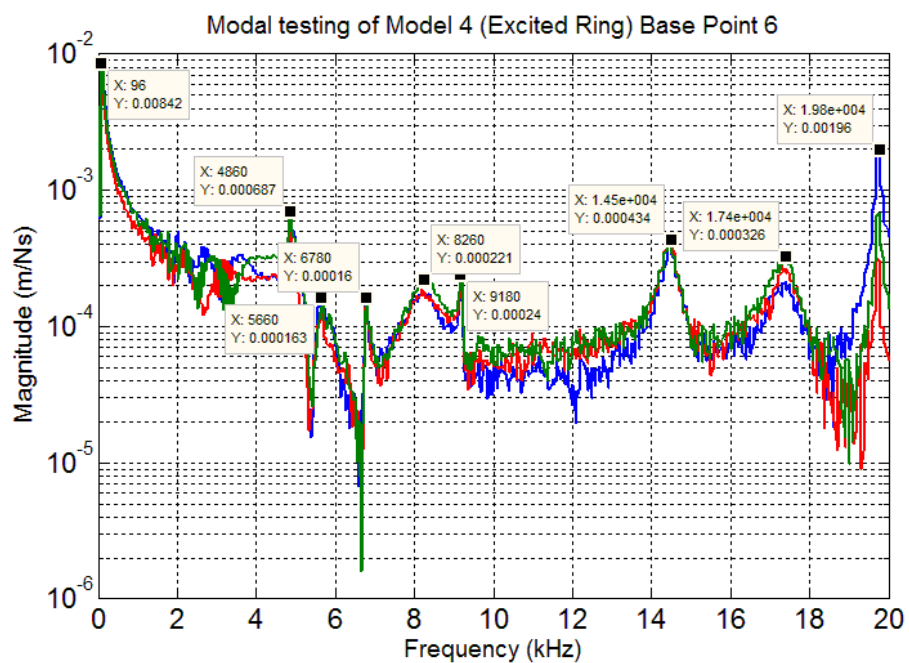
รูปที่ ๘-8 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 3 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



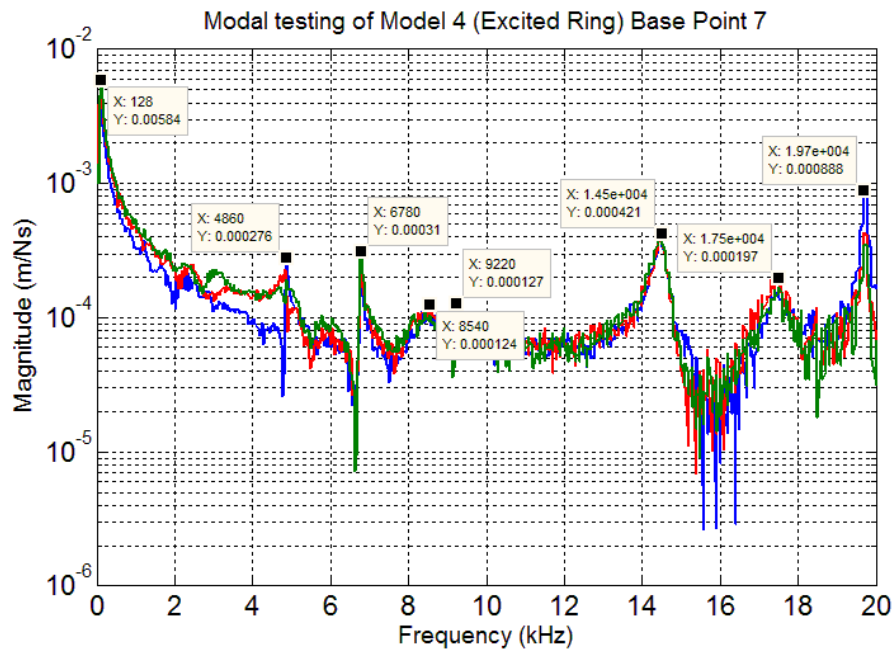
รูปที่ ๘-9 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



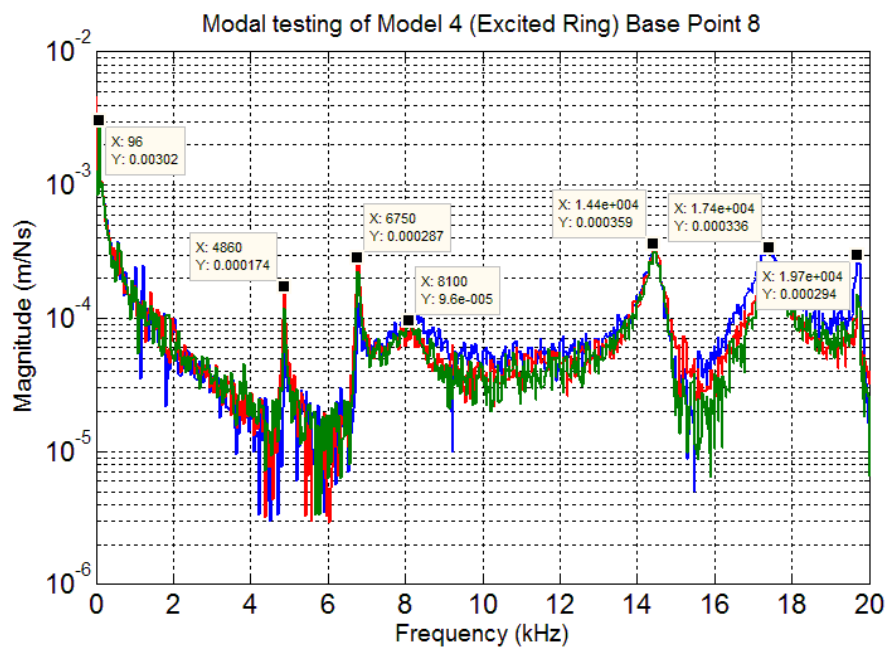
รูปที่ ง-10 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



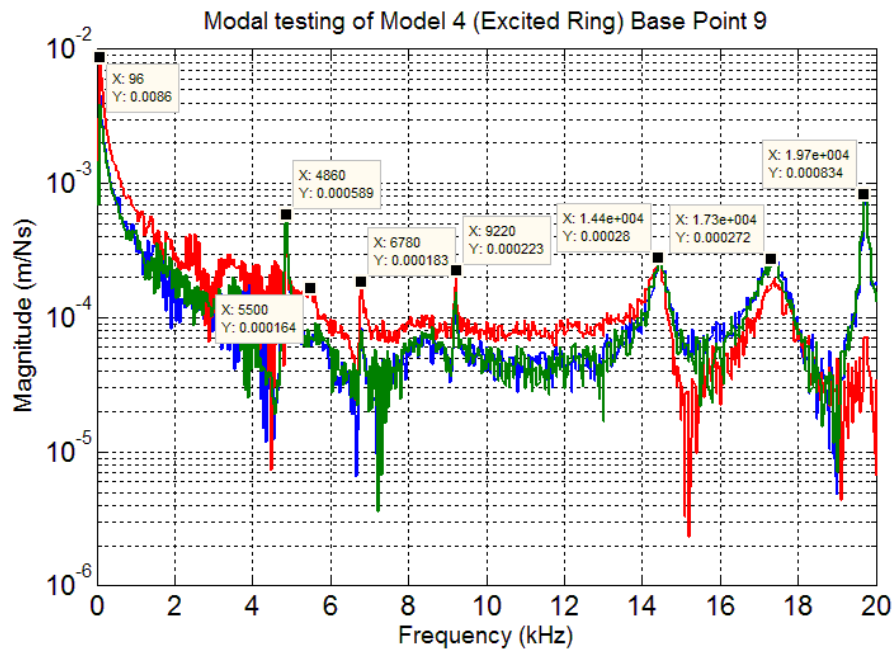
รูปที่ ง-11 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 6 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



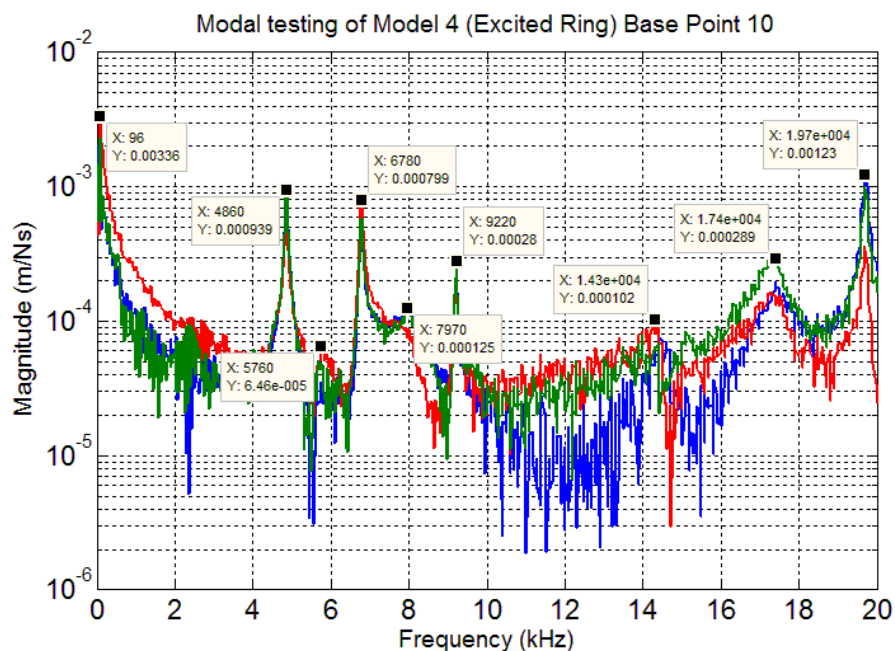
รูปที่ ง-12 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 7 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ง-13 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 8 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



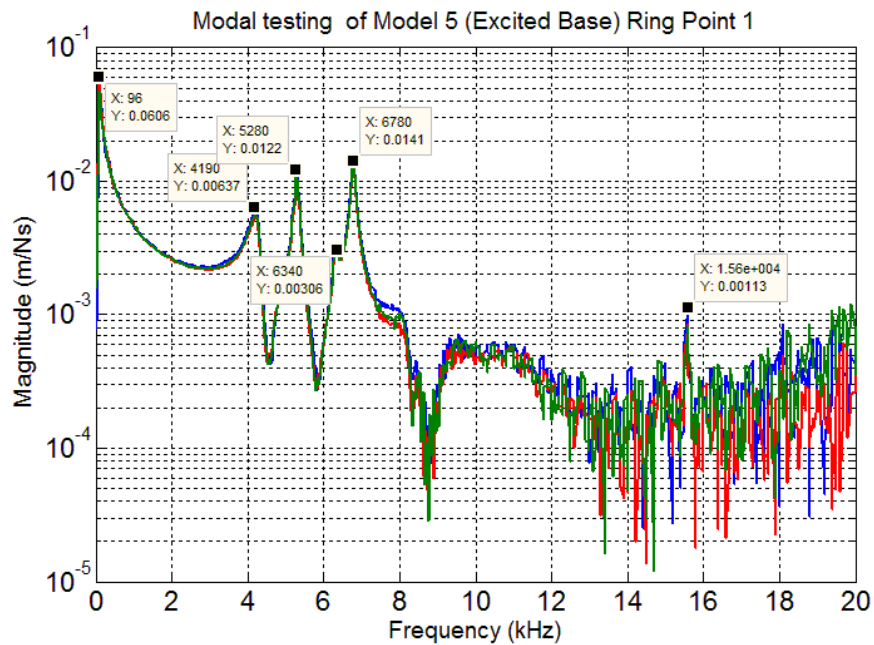
รูปที่ ง-14 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 9 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ



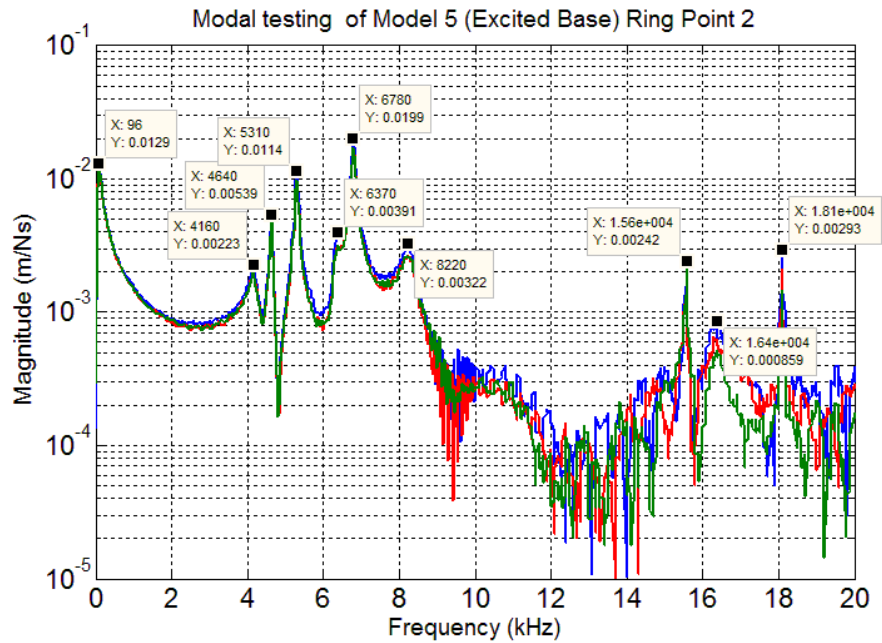
รูปที่ ง-15 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 10 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยค้อนเคาะ

2. กระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ

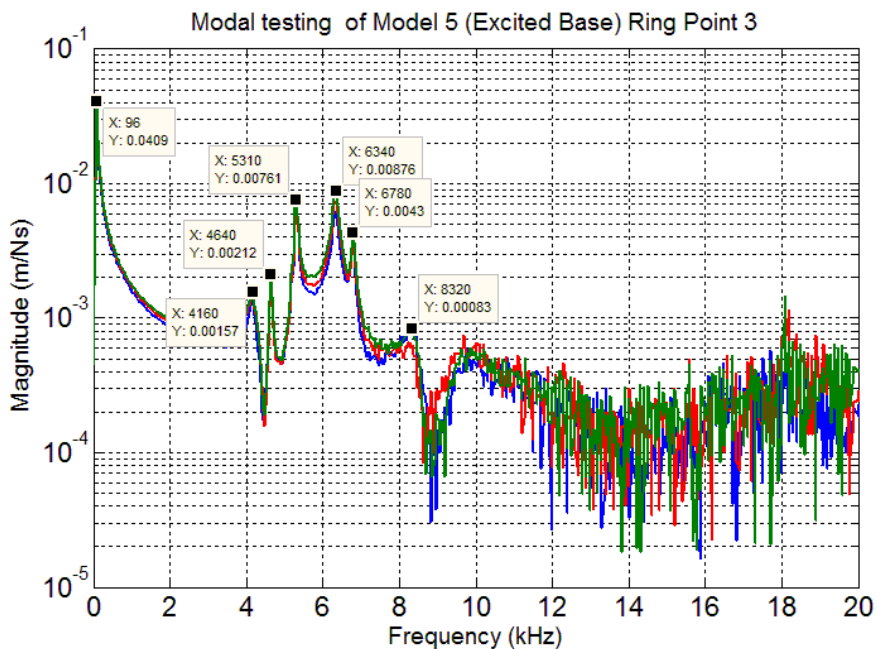
2.1 วัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ



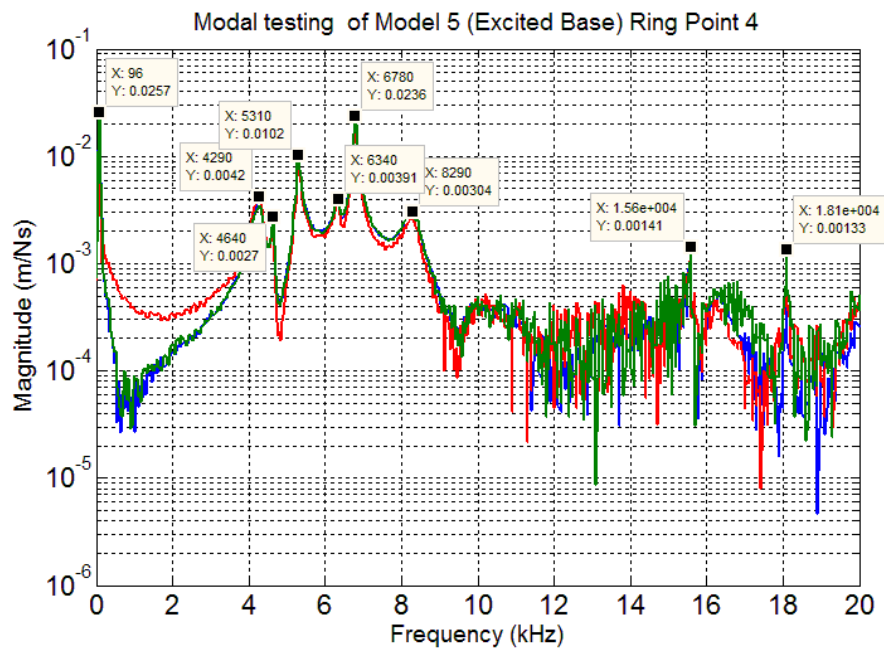
รูปที่ ง-16 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 1 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



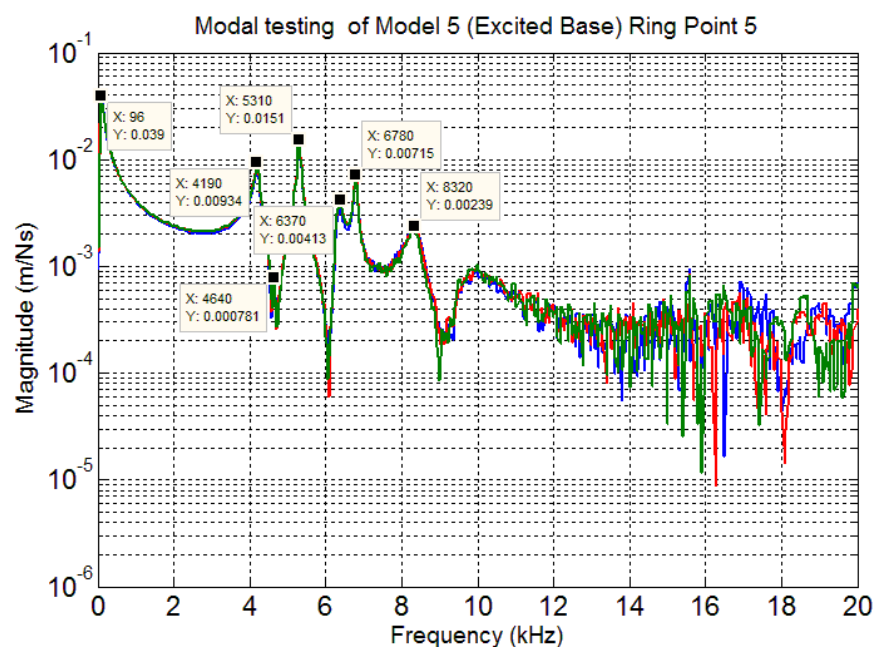
รูปที่ ง-17 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 2 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ง-18 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 3 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ

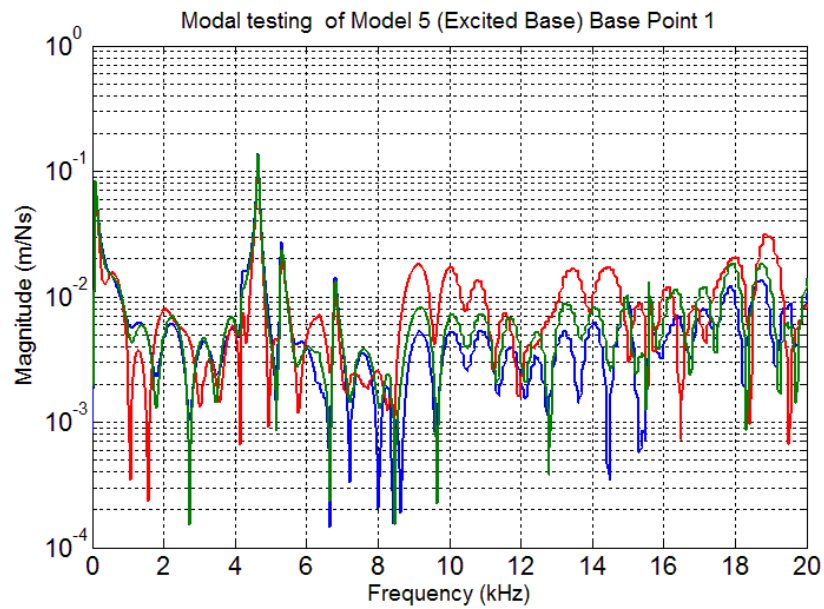


รูปที่ ง-19 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 4 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ

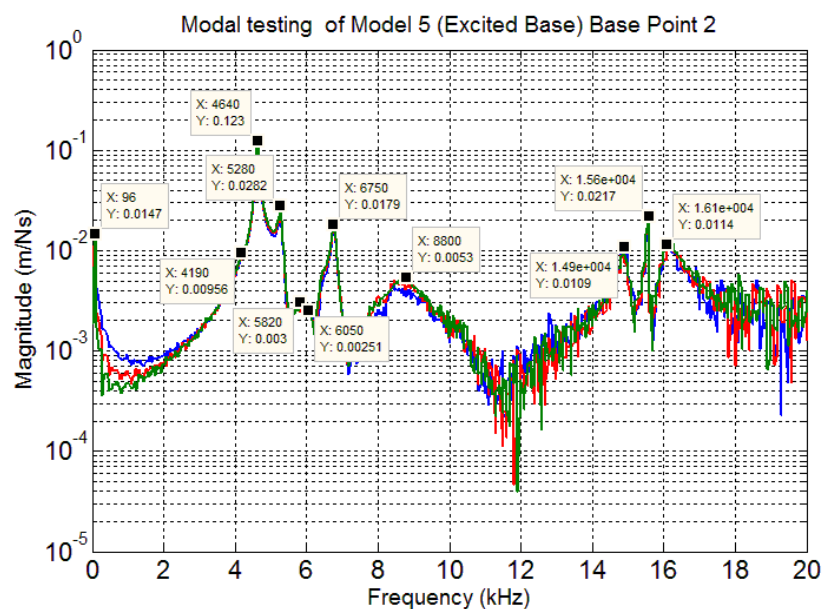


รูปที่ ง-20 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 5 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ

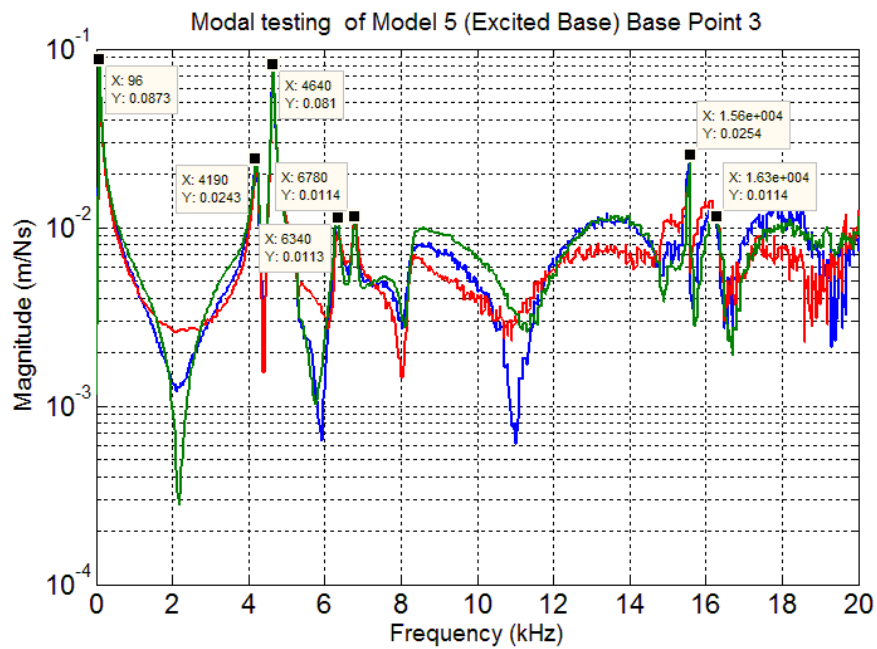
2.2 วัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์



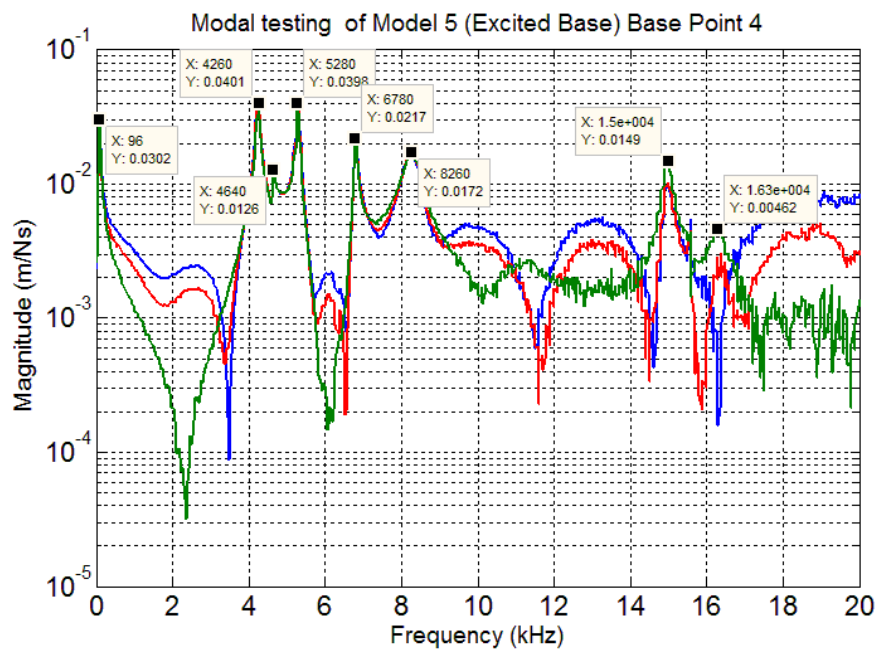
รูปที่ ง-21 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปริงเดลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์จุดที่ 1 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



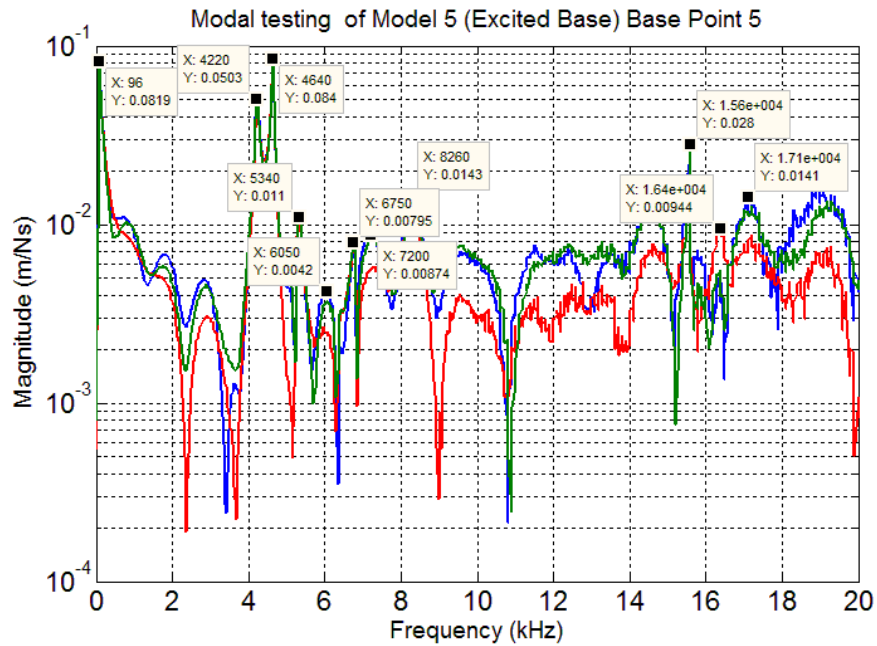
รูปที่ ง-22 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปริงเดลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์จุดที่ 2 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปริงเดลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



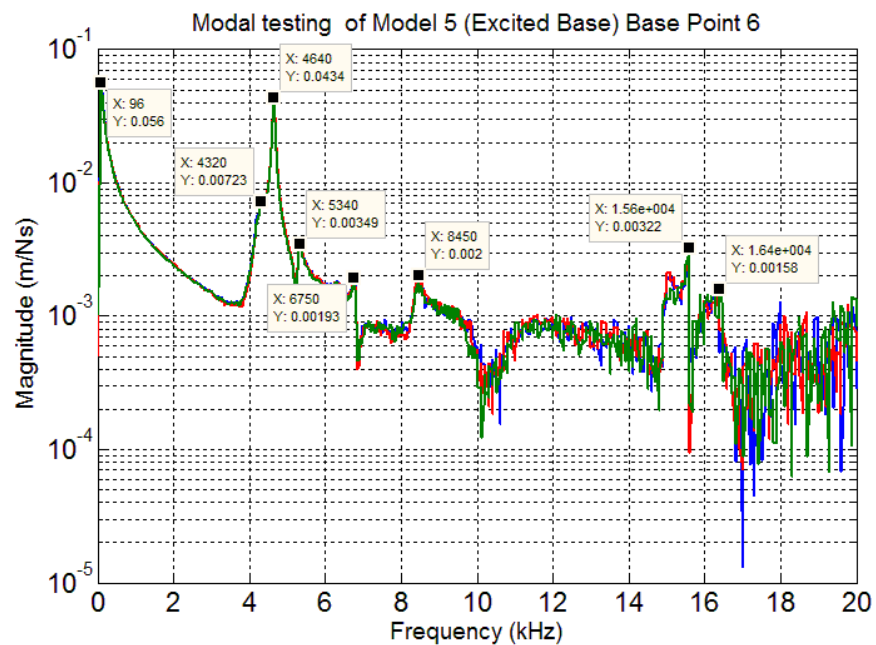
รูปที่ ง-23 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 3 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



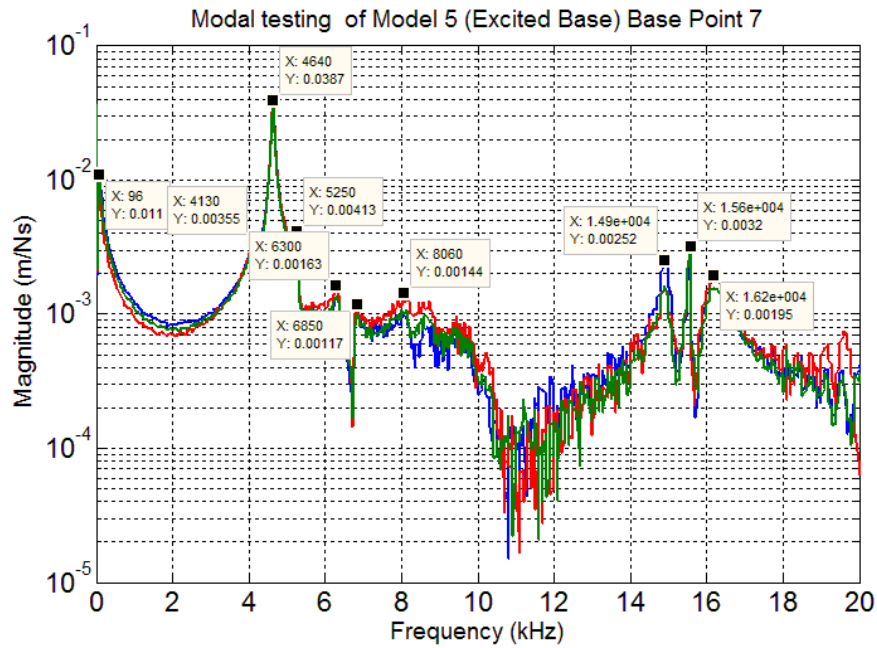
รูปที่ ง-24 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



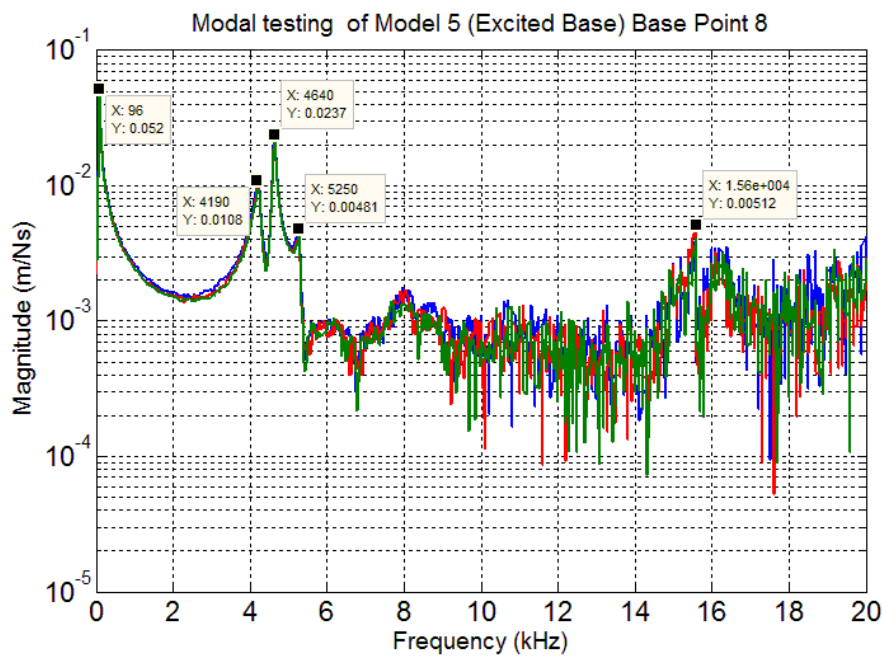
รูปที่ ง-25 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการ
 สั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลอง
 ของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



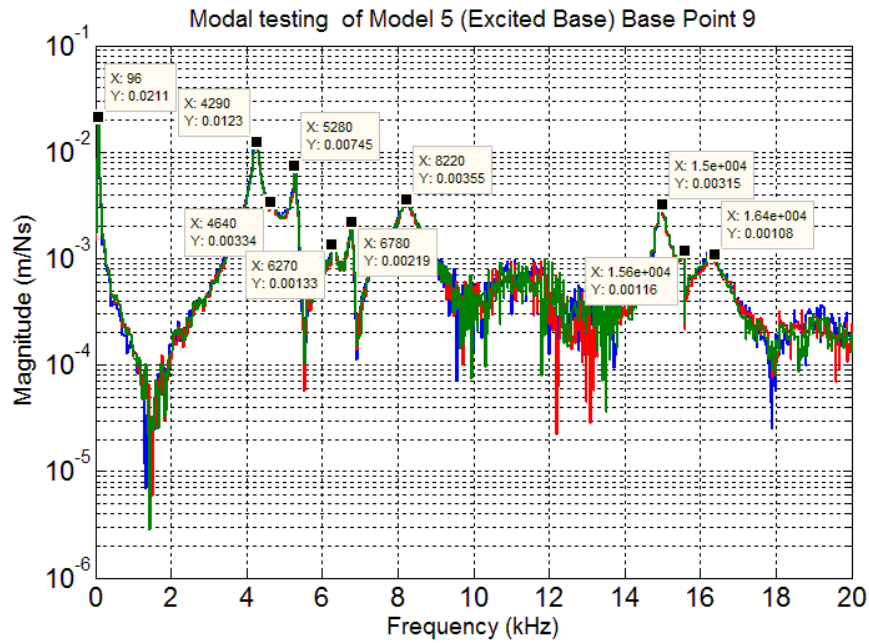
รูปที่ ง-26 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการ
 สั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 6 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลอง
 ของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



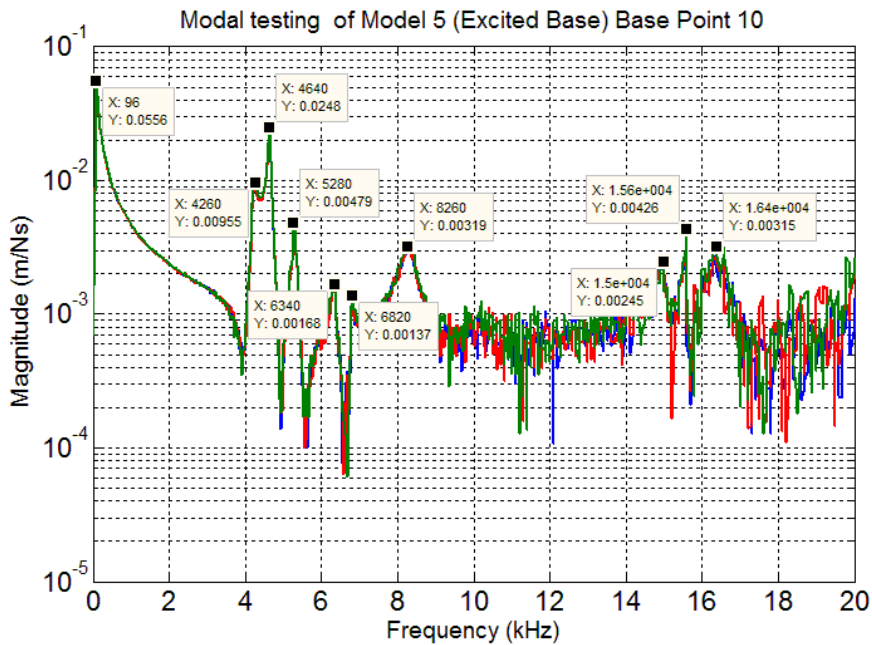
รูปที่ ง-27 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 7 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ง-28 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 8 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



รูปที่ ง-29 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จุดที่ 9 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ



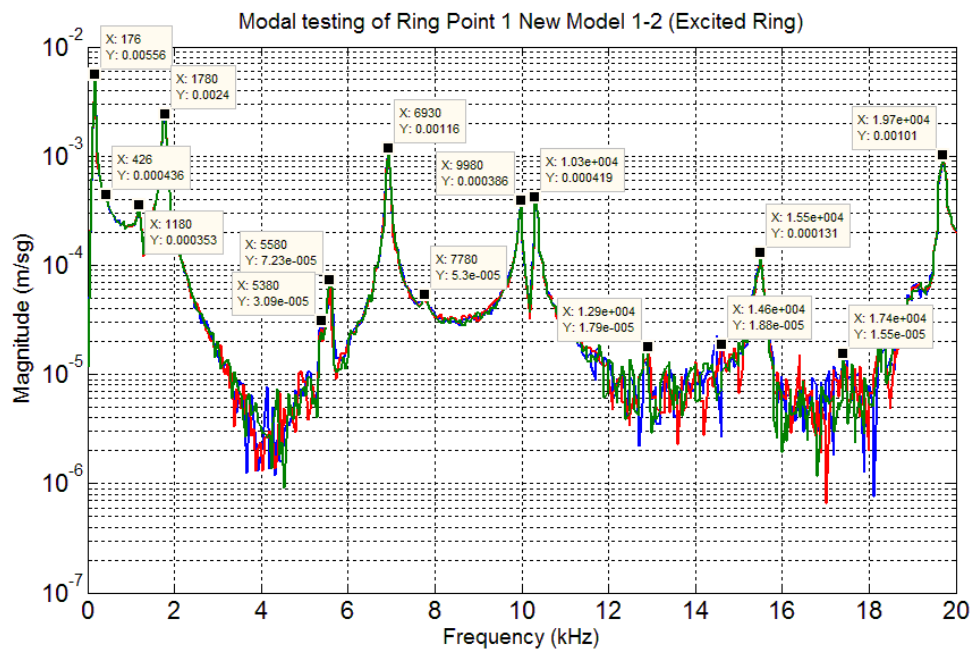
รูปที่ ง-30 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จุดที่ 10 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยค้อนเคาะ

ง.2 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์จากการทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

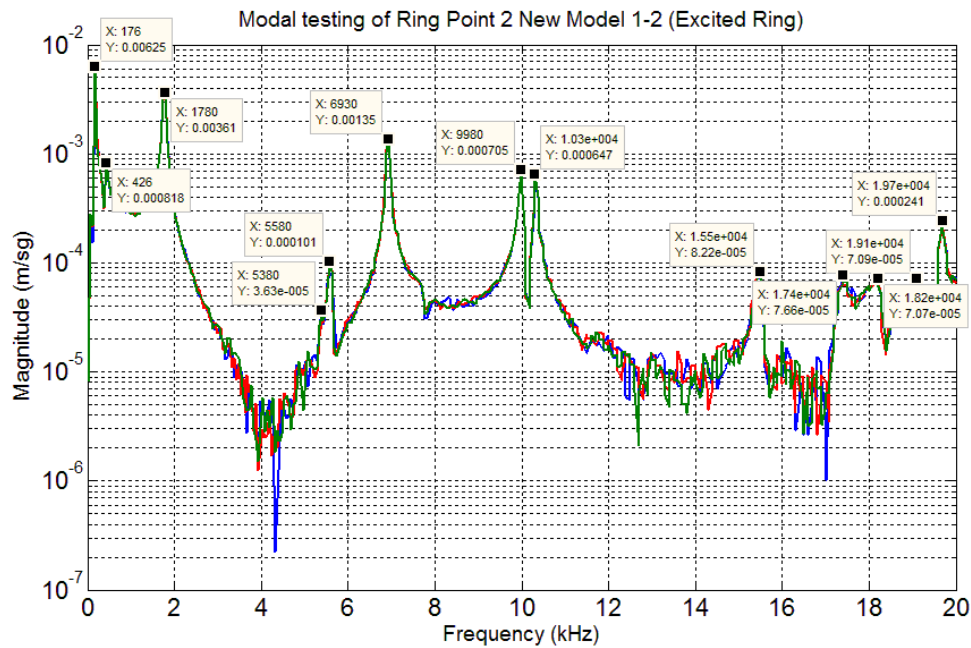
ผลการทดสอบในส่วนนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนตามจุดที่ใช้เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนในการกระตุ้น ได้แก่ บริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยมีผลการทดสอบ ดังนี้

1. กระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

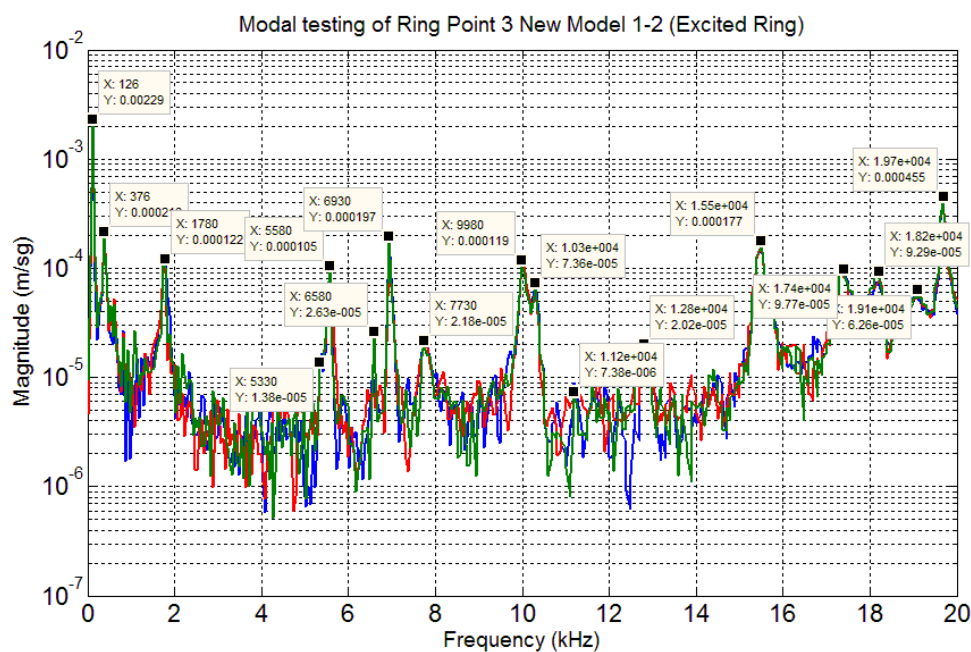
1.1 วัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ



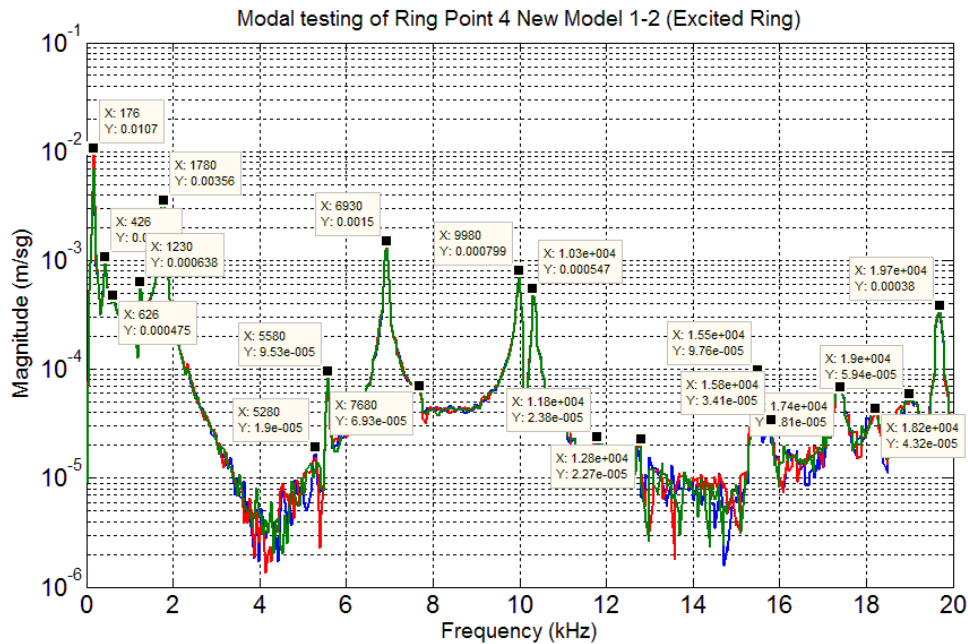
รูปที่ ง-31 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 1 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



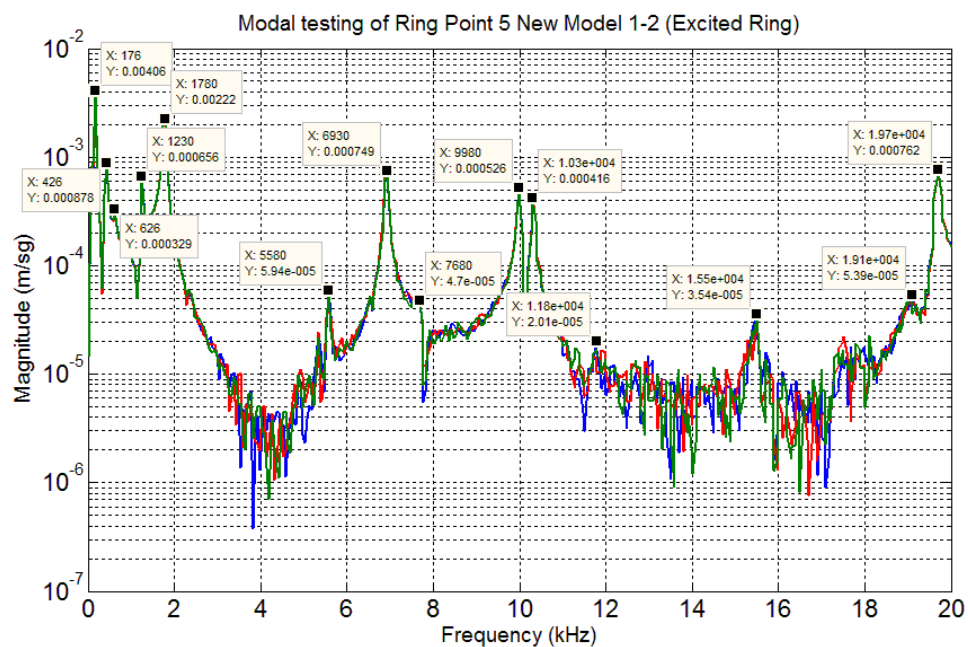
รูปที่ ง-32 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 2 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ ง-33 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 3 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

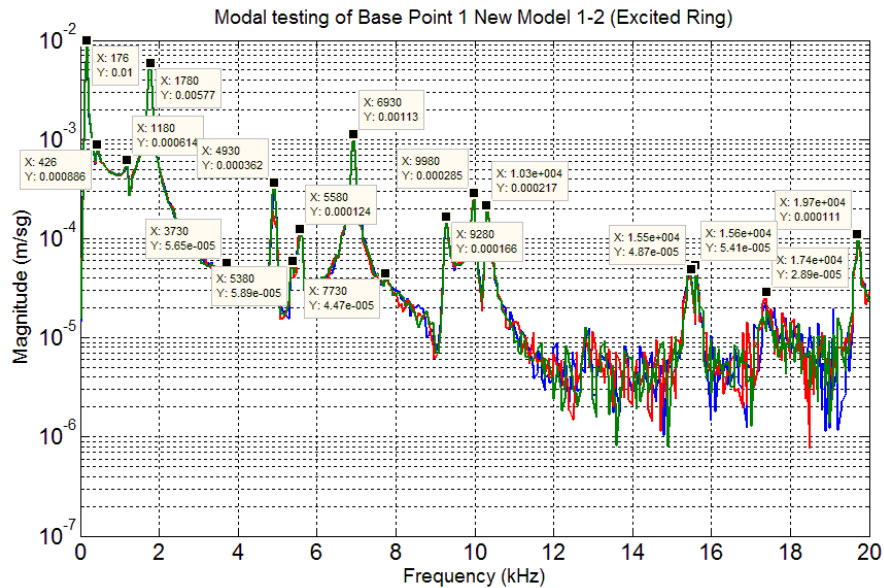


รูปที่ ง-34 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 4 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

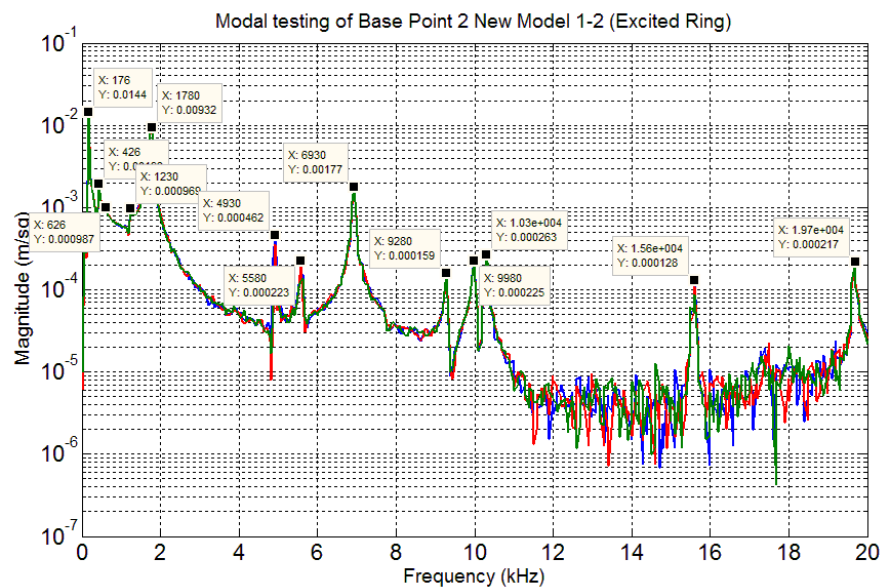


รูปที่ ง-35 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 5 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

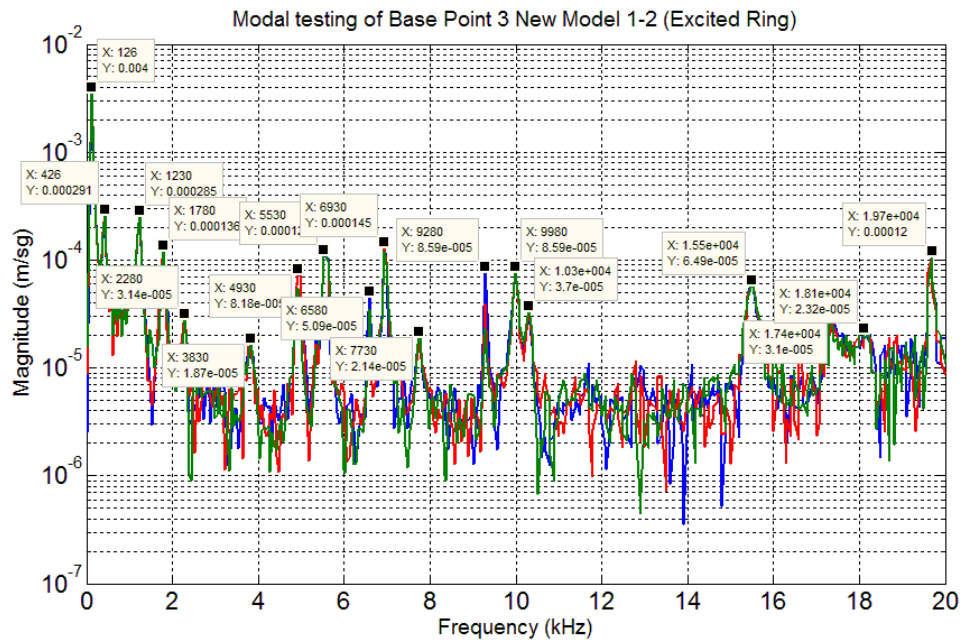
1.2 วัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์



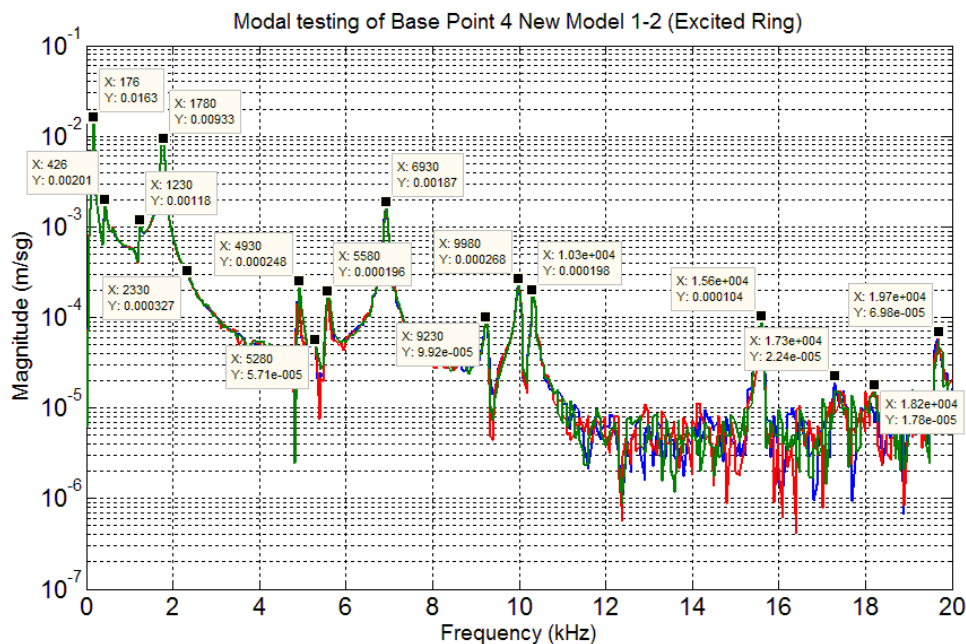
รูปที่ ง-36 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



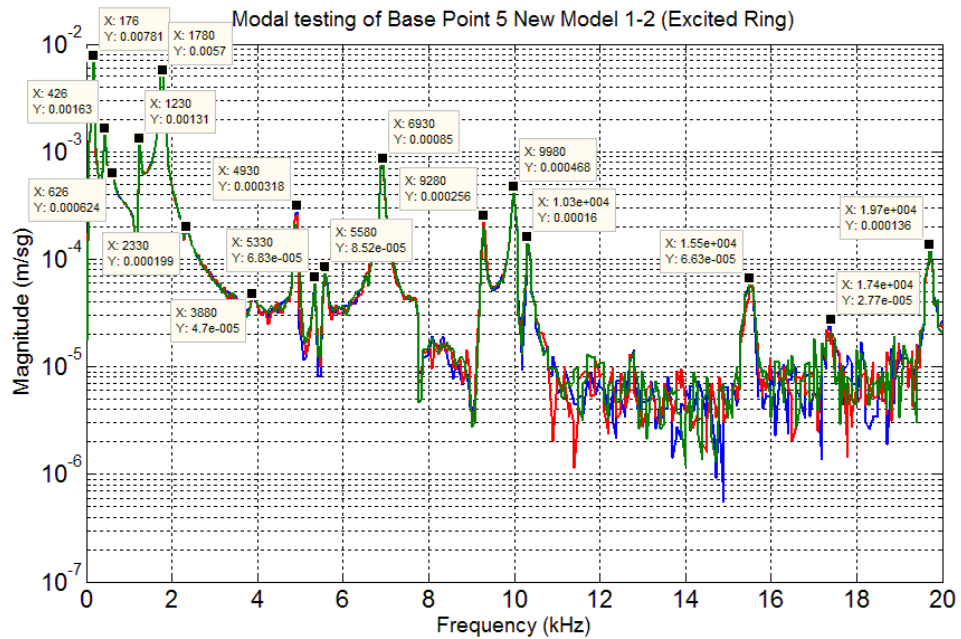
รูปที่ ง-37 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 2 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



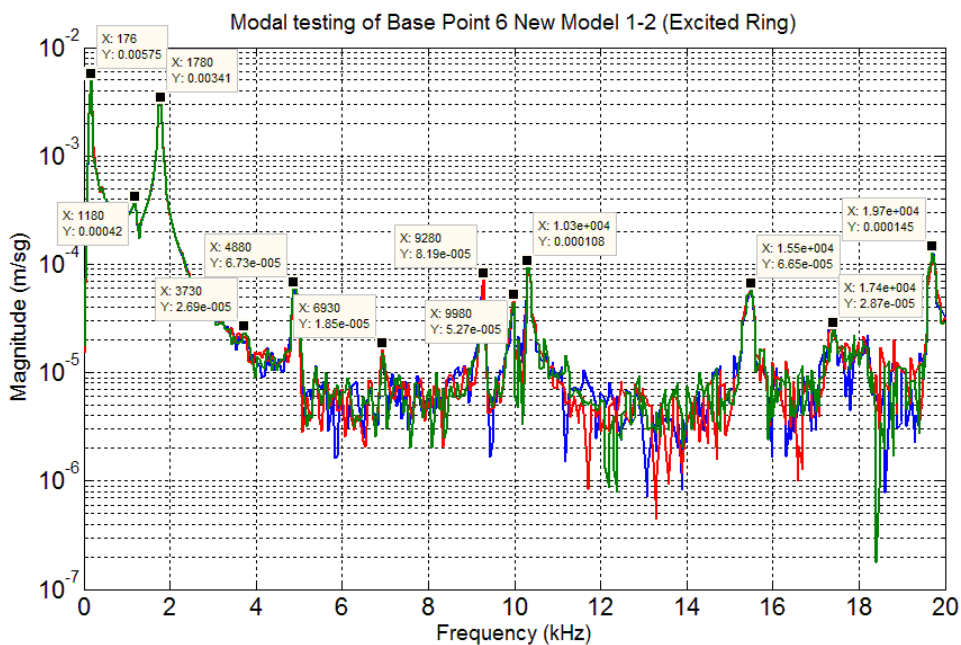
รูปที่ ง-38 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 3 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



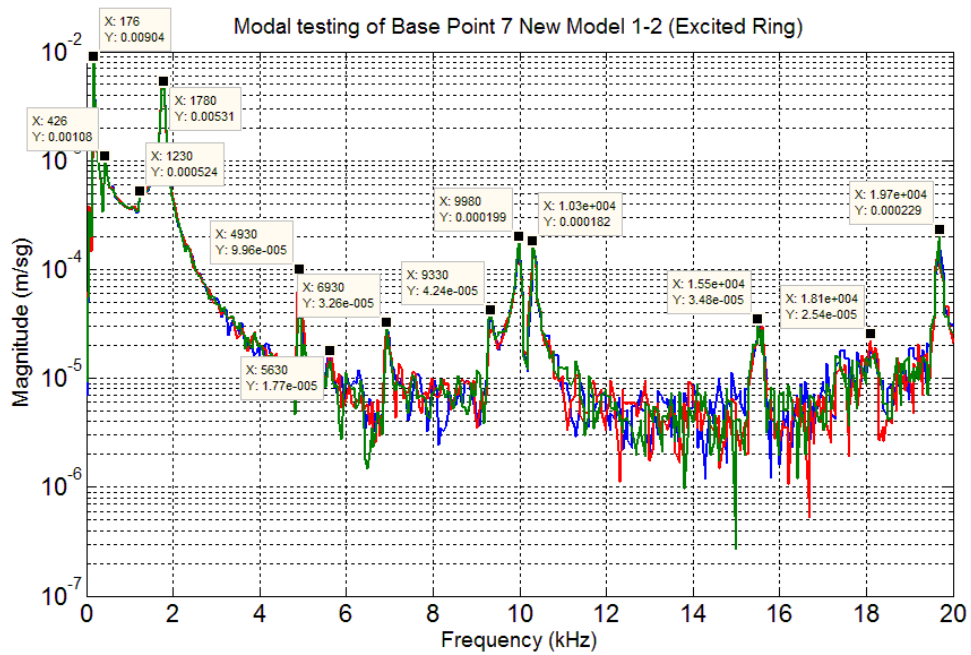
รูปที่ ง-39 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 4 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



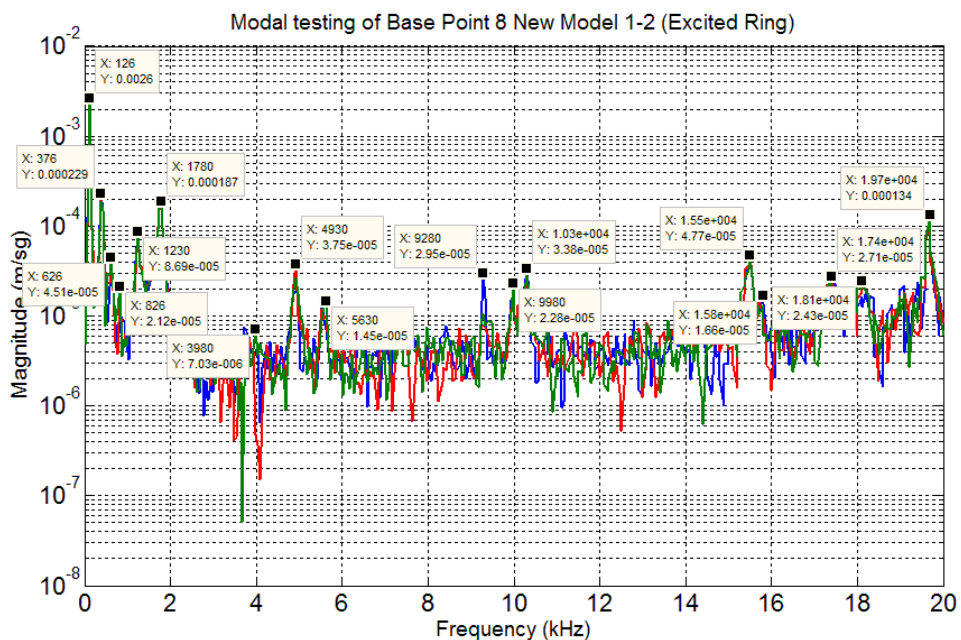
รูปที่ ง-40 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



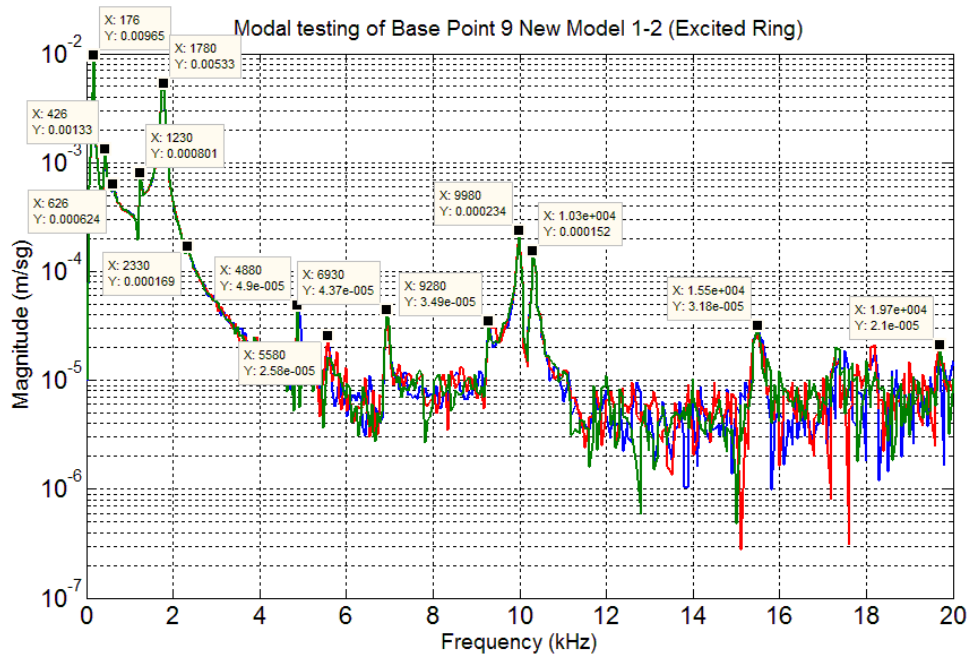
รูปที่ ง-41 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 6 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



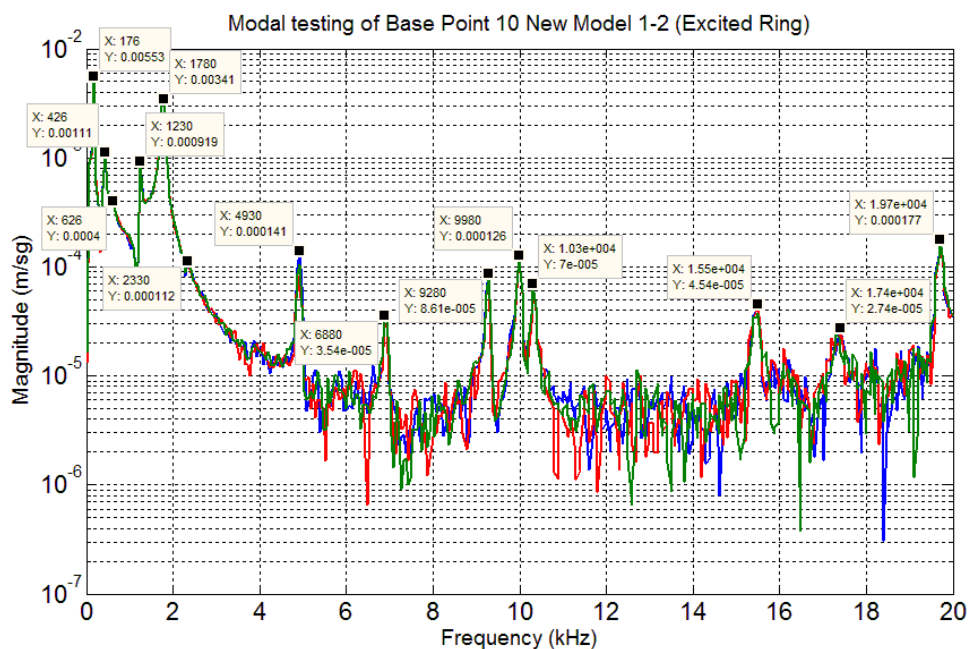
รูปที่ ง-42 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 7 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ ง-43 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 8 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



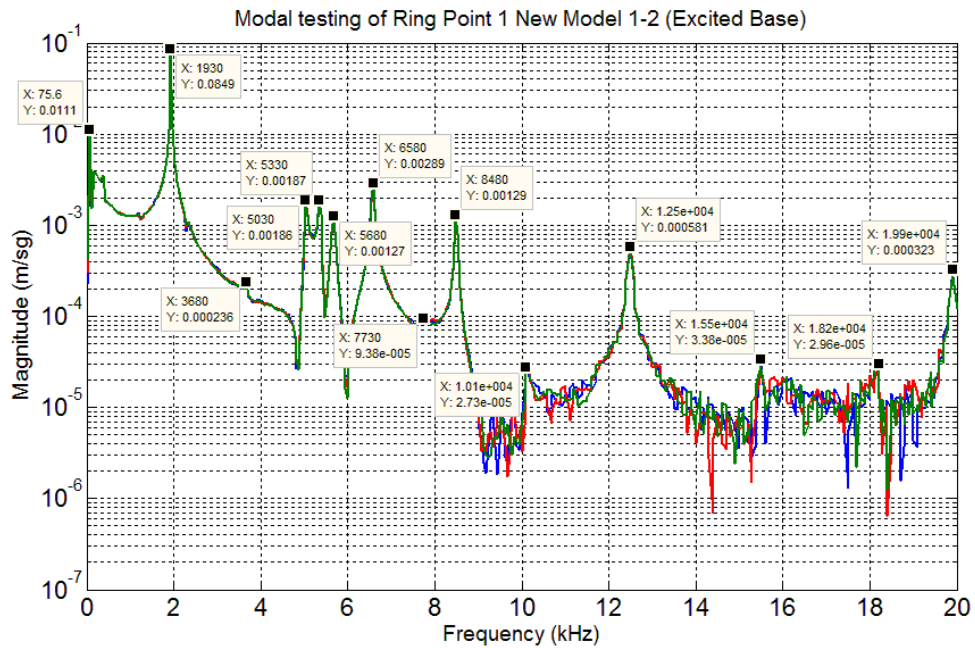
รูปที่ ง-44 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 9 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



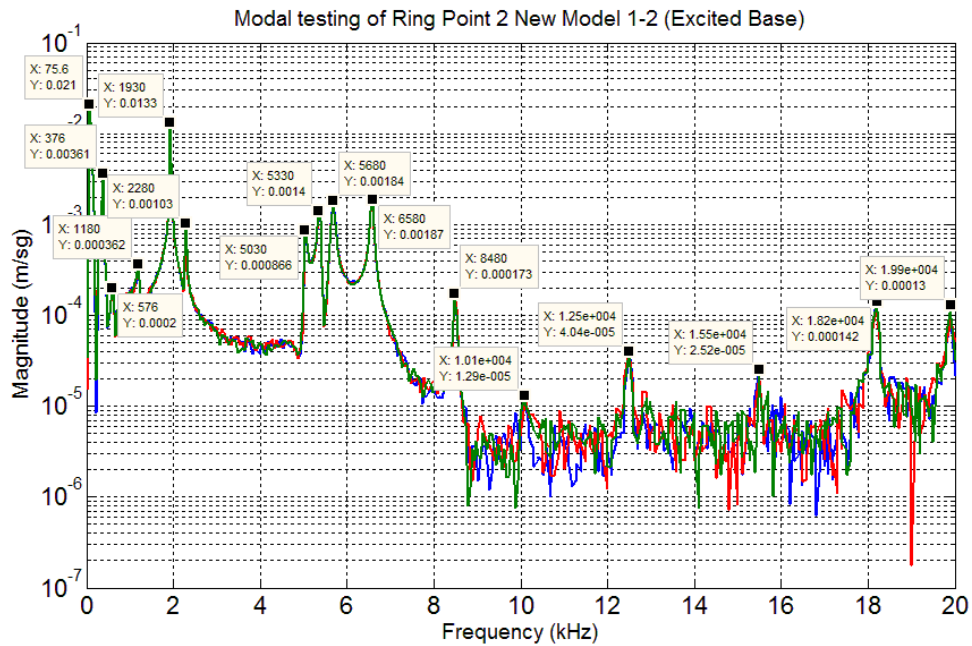
รูปที่ ง-45 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 10 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

2. กระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

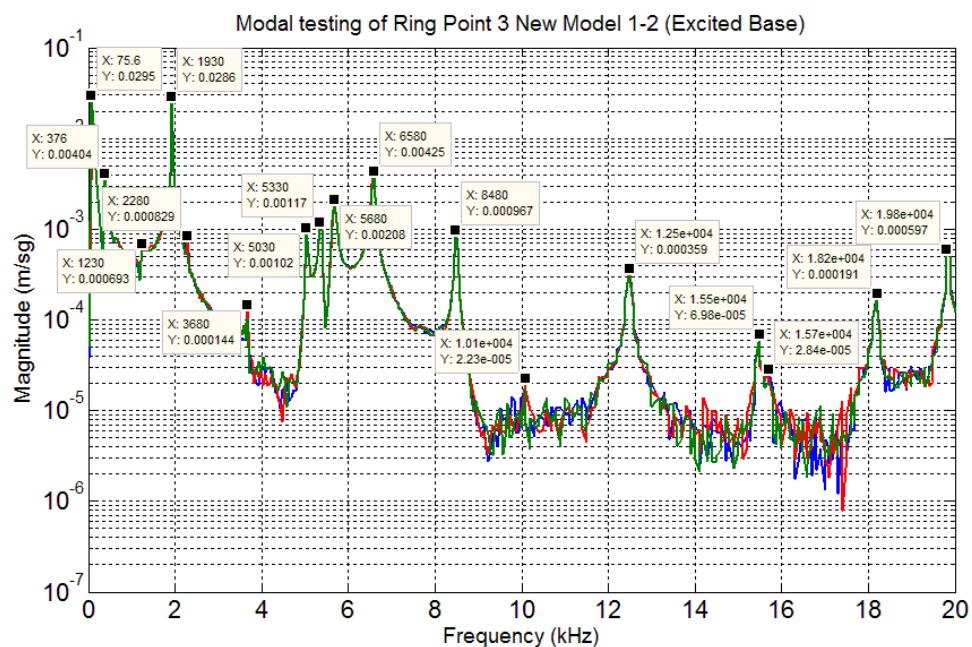
2.1 วัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ



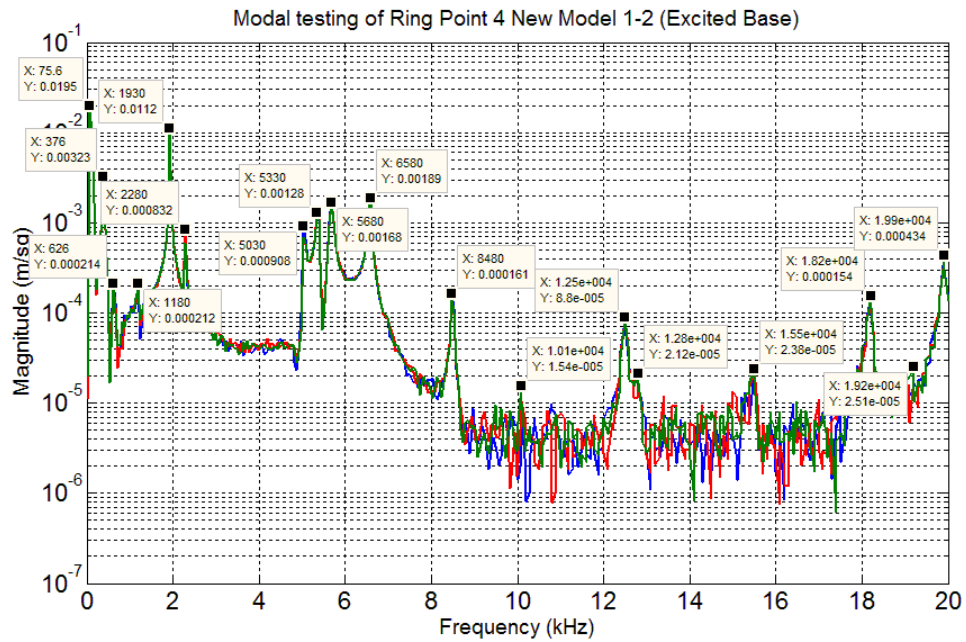
รูปที่ ง-46 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 1 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



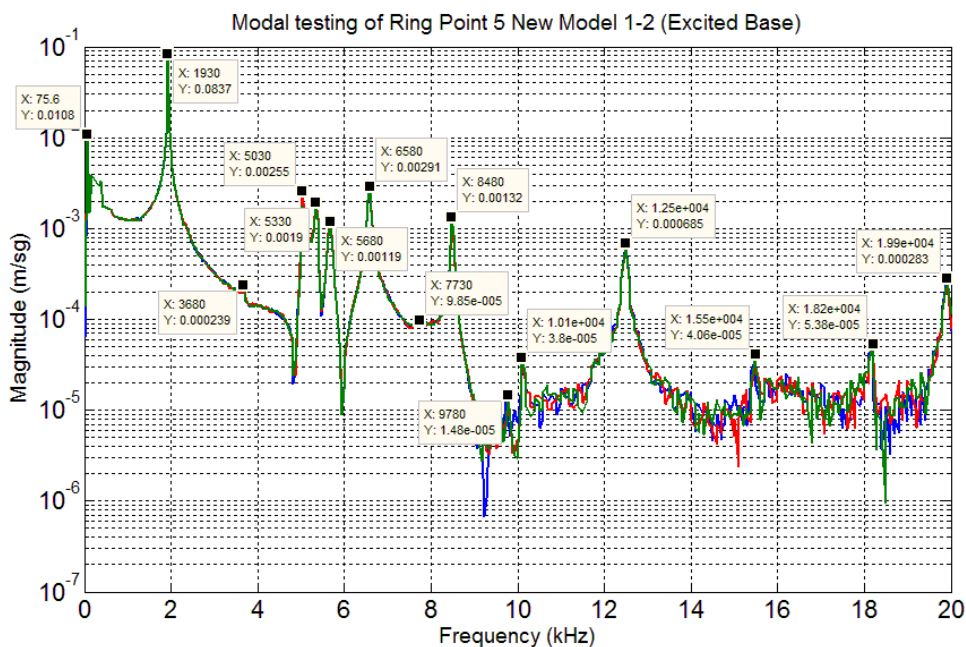
รูปที่ ง-47 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 2 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ ง-48 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 3 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

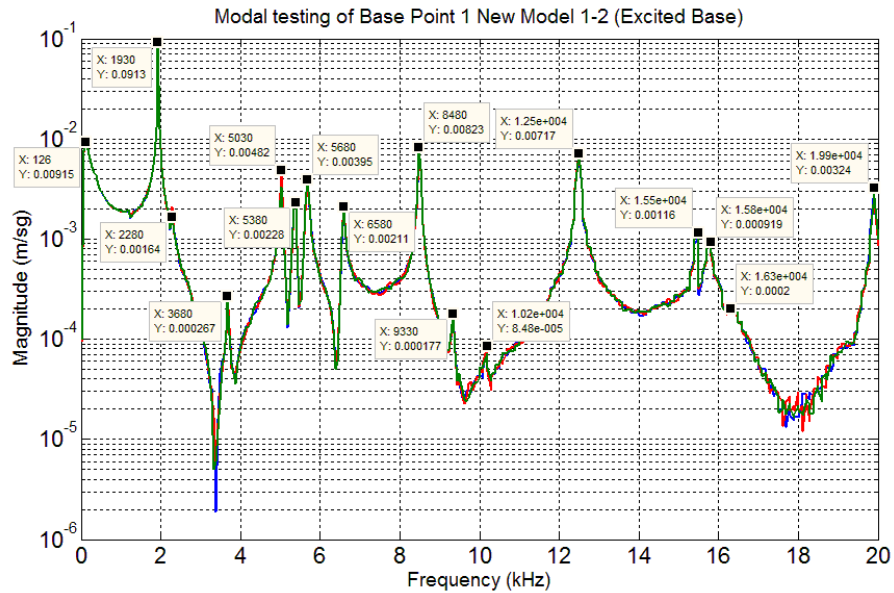


รูปที่ ง-49 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 4 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

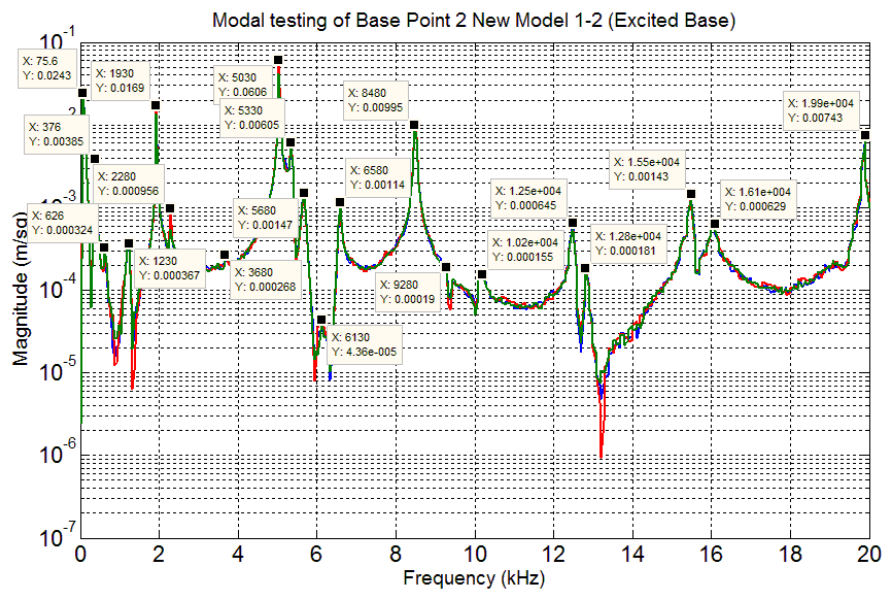


รูปที่ ง-50 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจุดที่ 5 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

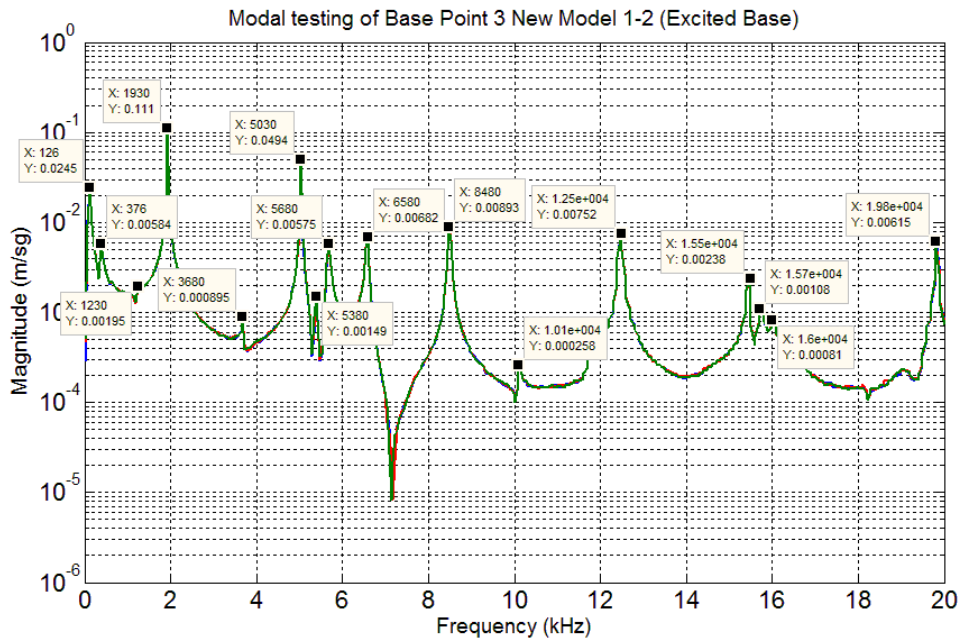
2.2 วัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์



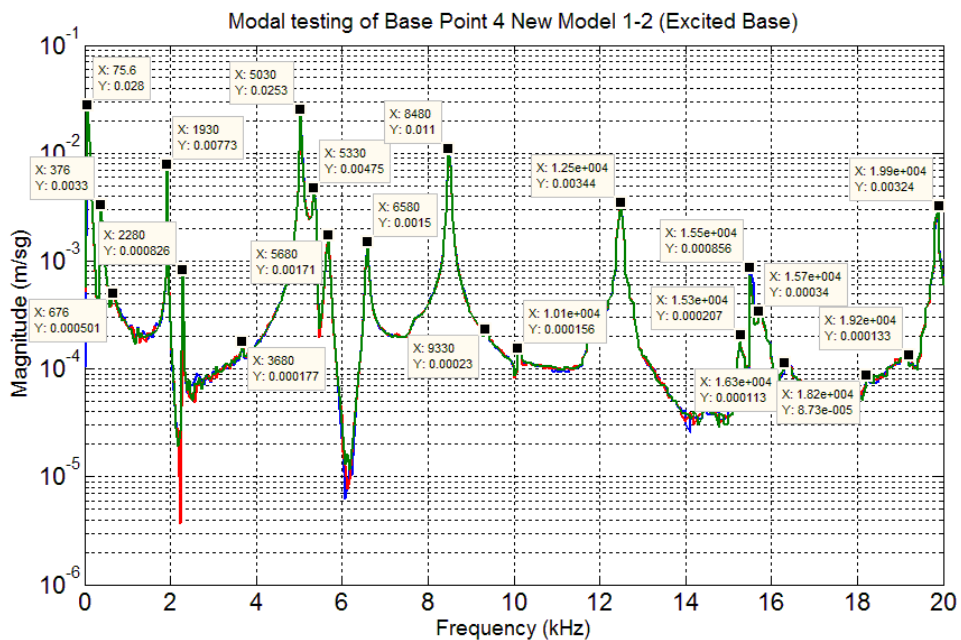
รูปที่ ง-51 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



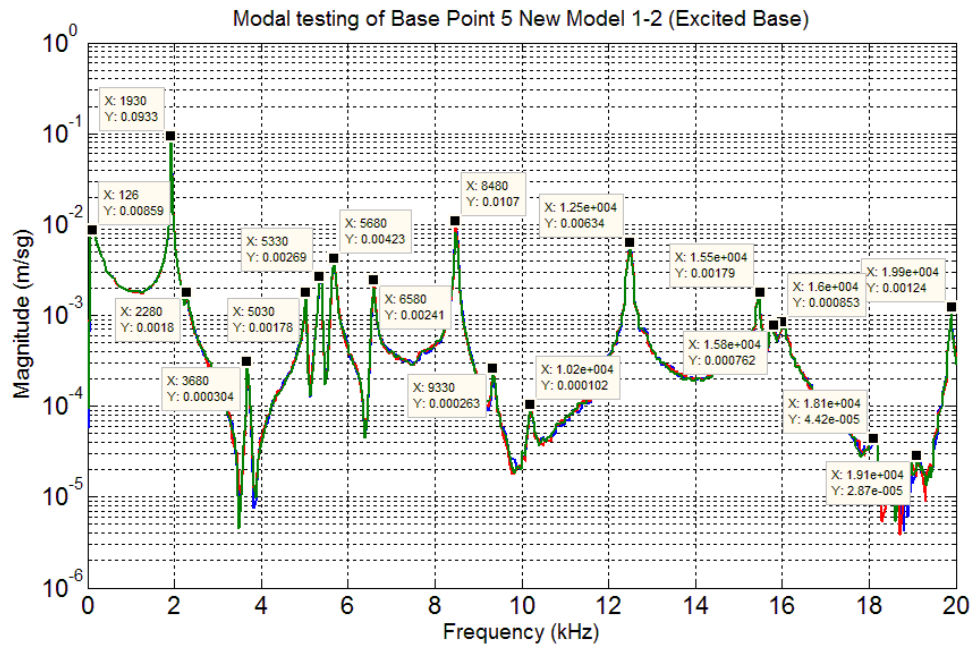
รูปที่ ง-52 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 2 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



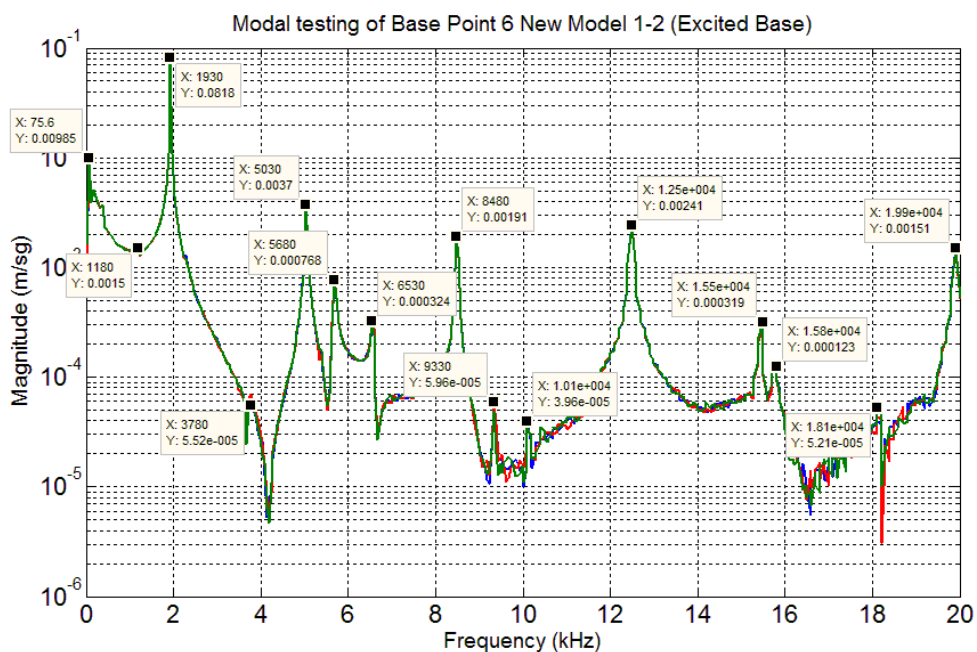
รูปที่ ง-53 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จุดที่ 3 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



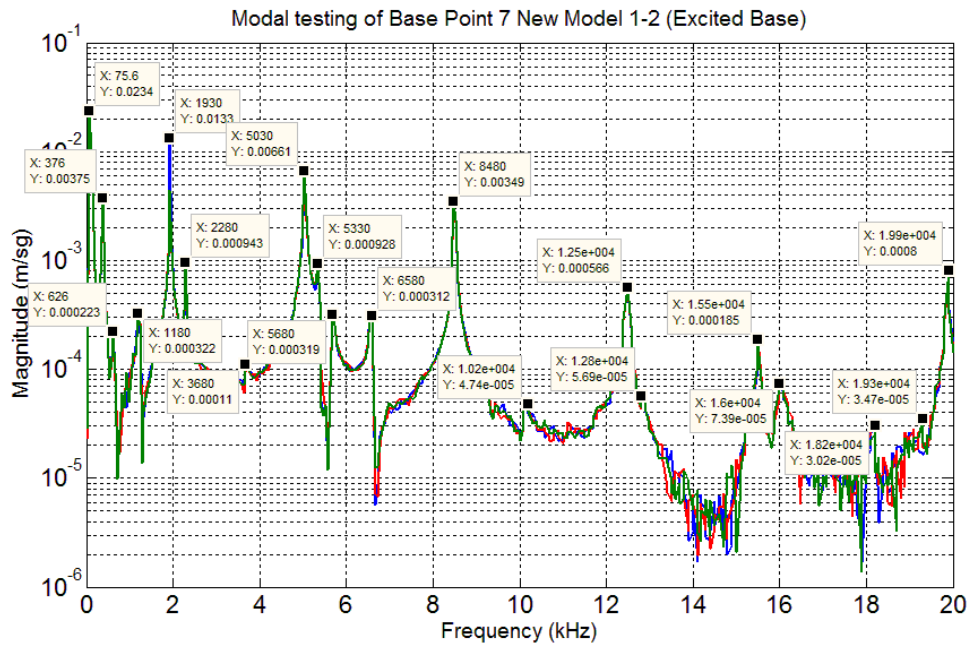
รูปที่ ง-54 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์จุดที่ 4 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



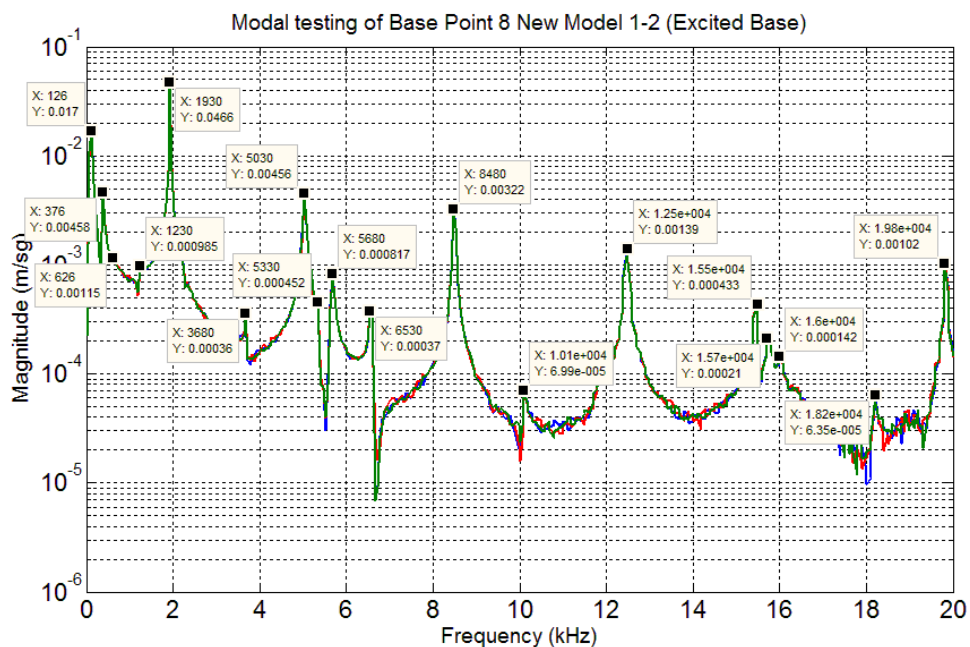
รูปที่ ง-55 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 5 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



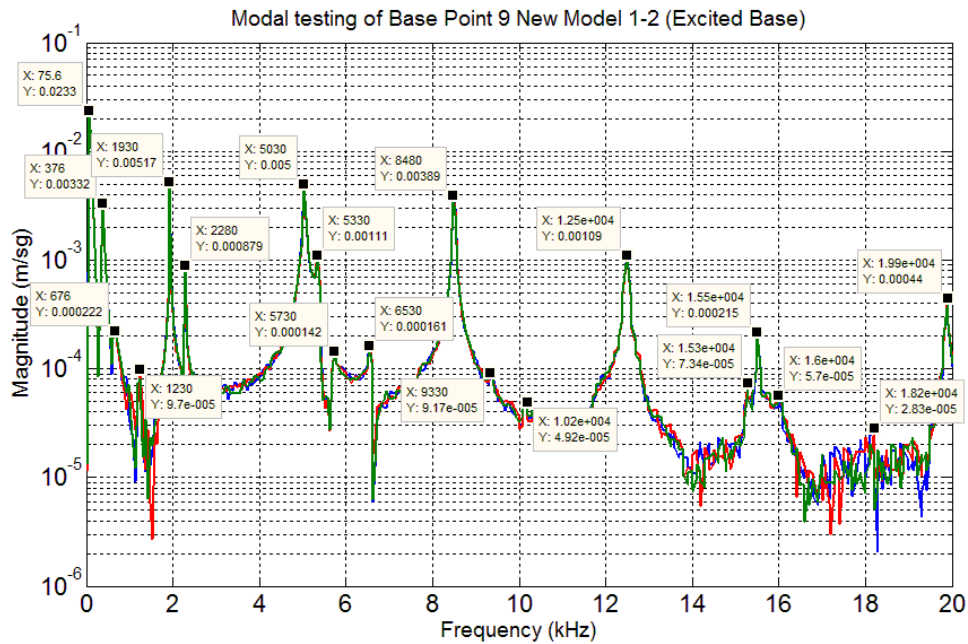
รูปที่ ง-56 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 6 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



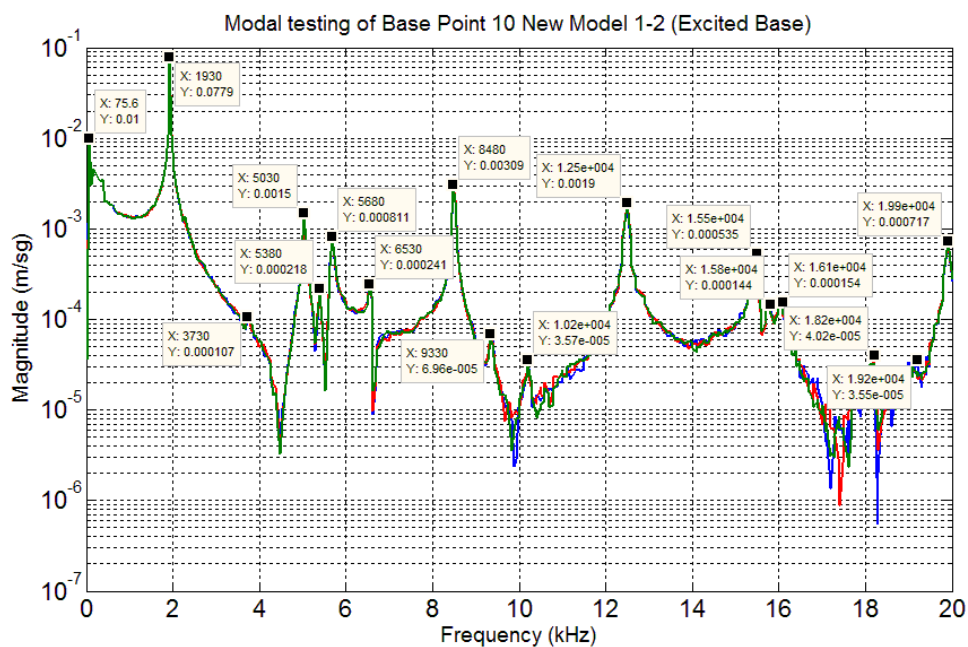
รูปที่ ง-57 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 7 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ ง-58 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 8 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ ง-59 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 8 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

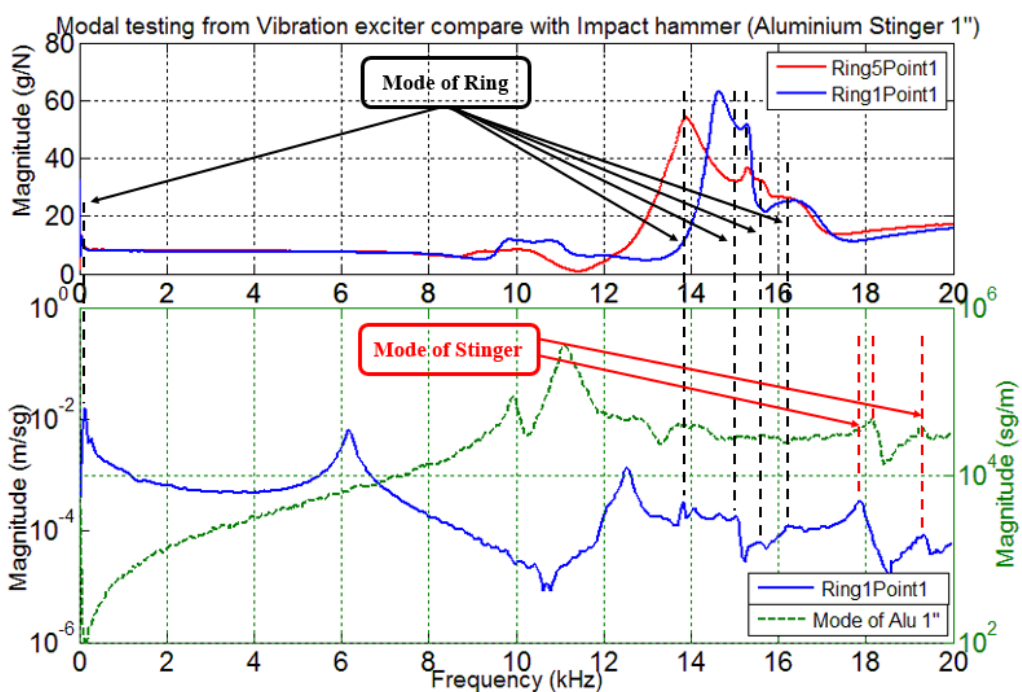


รูปที่ ง-60 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 1 เมื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ชุดที่ 8 และกระตุ้นบริเวณแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน

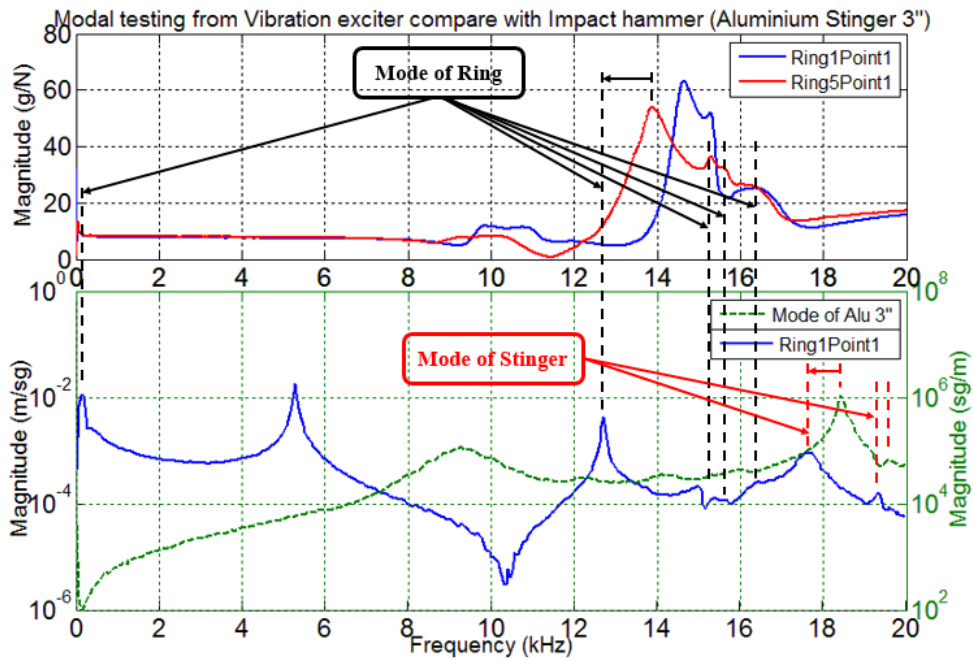
ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบเพื่อเลือกแหล่งส่งผ่านการสันสะเทือน

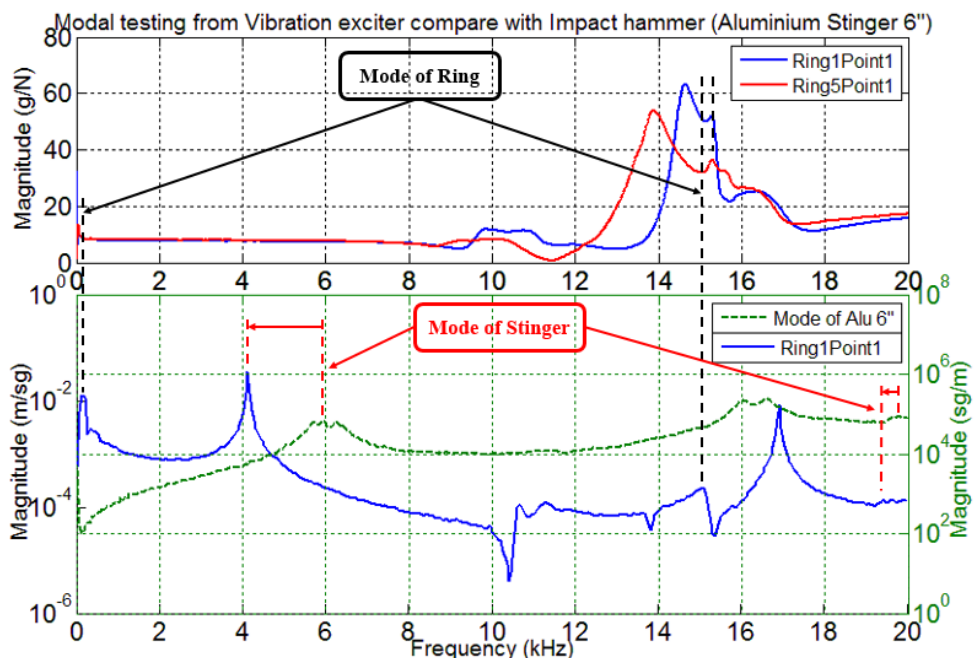
ในการทดสอบเพื่อเลือกแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือน จะนำผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 ด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนและแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแท่งมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 ด้วยค้อนเคาะ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแท่งที่แสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะมากที่สุด โดยผลที่ได้จากการทดสอบแท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนแต่ละแท่ง มีดังต่อไปนี้



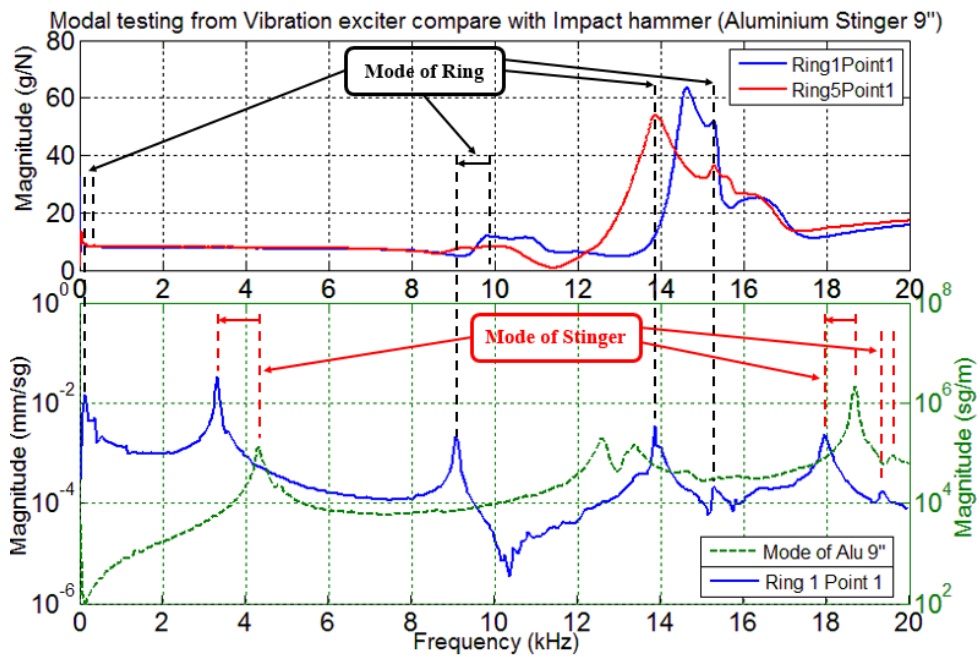
รูปที่ จ-1 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 1 นิ้ว



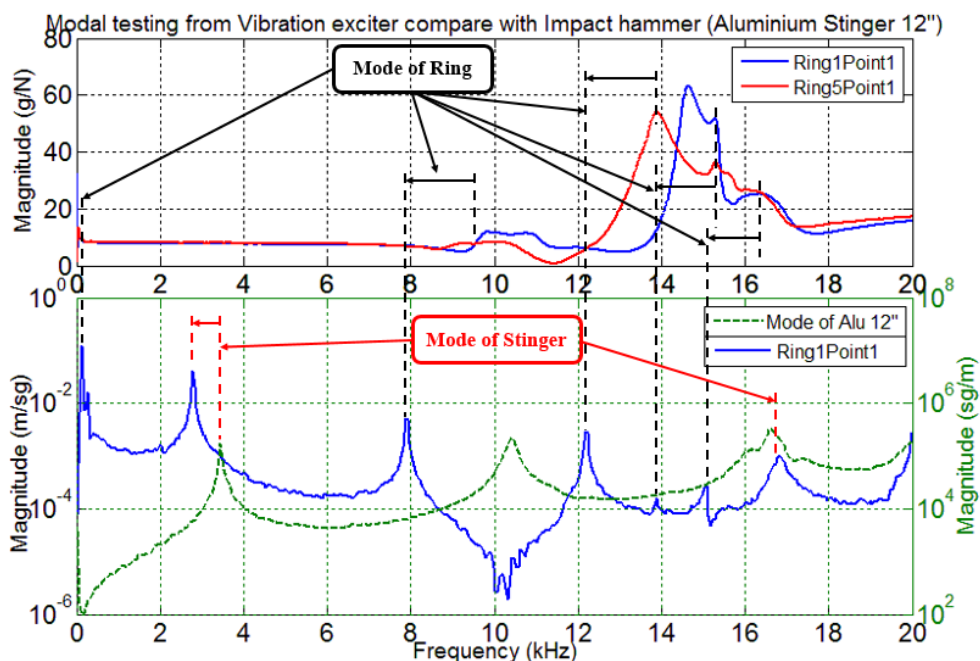
รูปที่ จ-2 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขนาดลดเหนียวน้ำหนักที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 3 นิ้ว



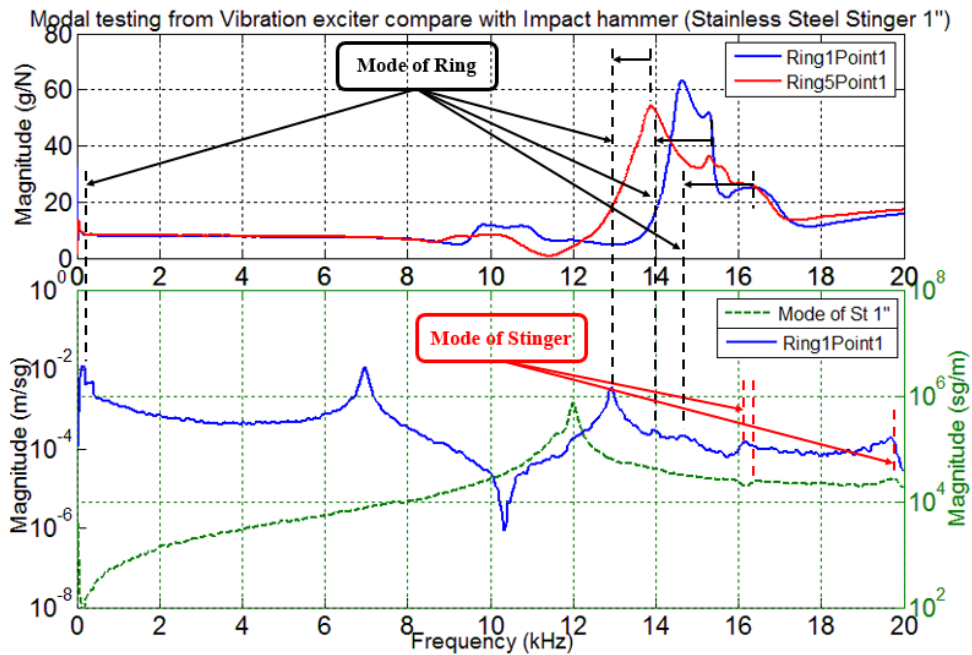
รูปที่ จ-3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขนาดลดเหนียวน้ำหนักที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แท่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 6 นิ้ว



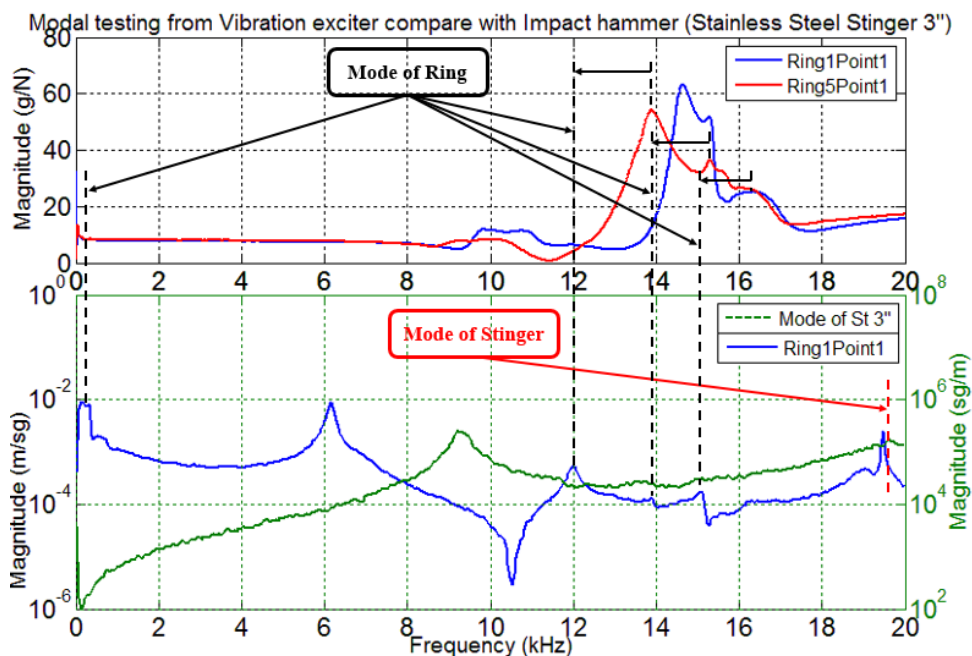
รูปที่ จ-4 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวน้ำหนัก 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แทงส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 9 นิ้ว



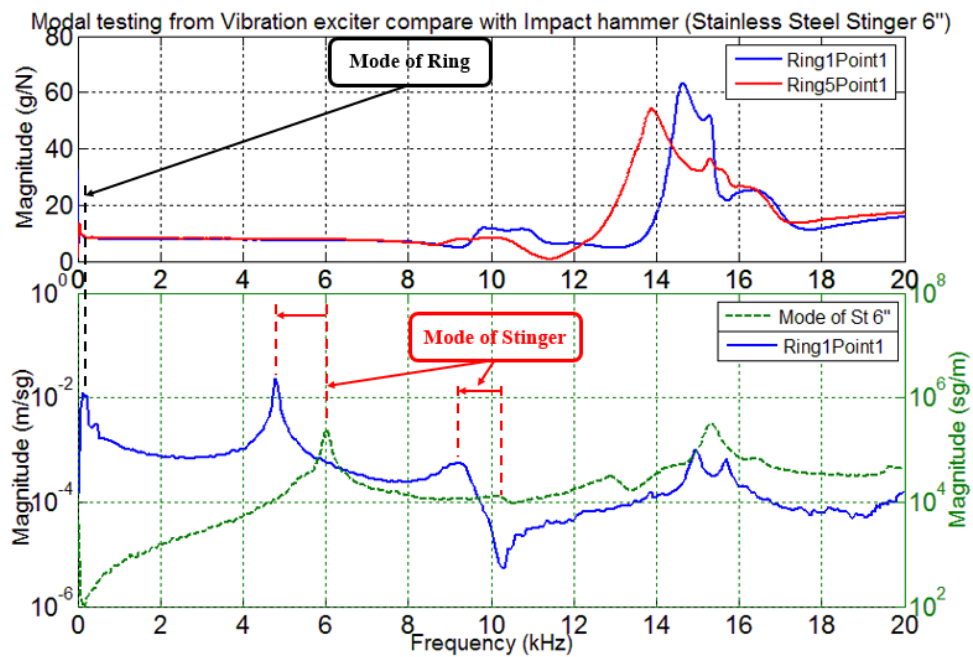
รูปที่ จ-5 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวน้ำหนัก 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แทงส่งผ่านการสั่นสะเทือนอะลูมิเนียมขนาด 12 นิ้ว



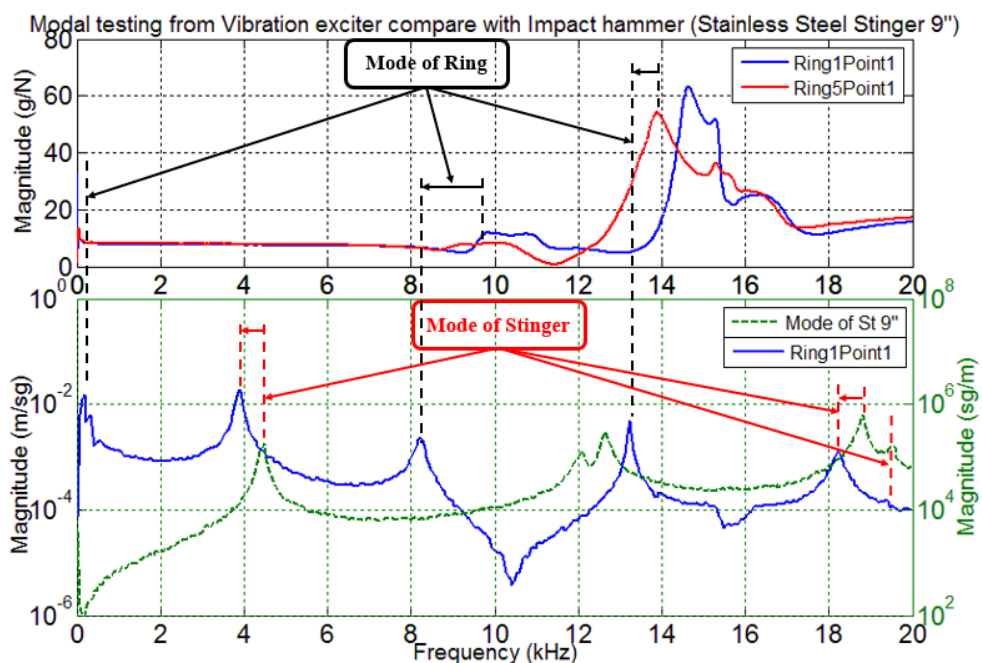
รูปที่ จ-6 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำ
 ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แทงส่งผ่าน
 การสั่นสะเทือนเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 1 นิ้ว



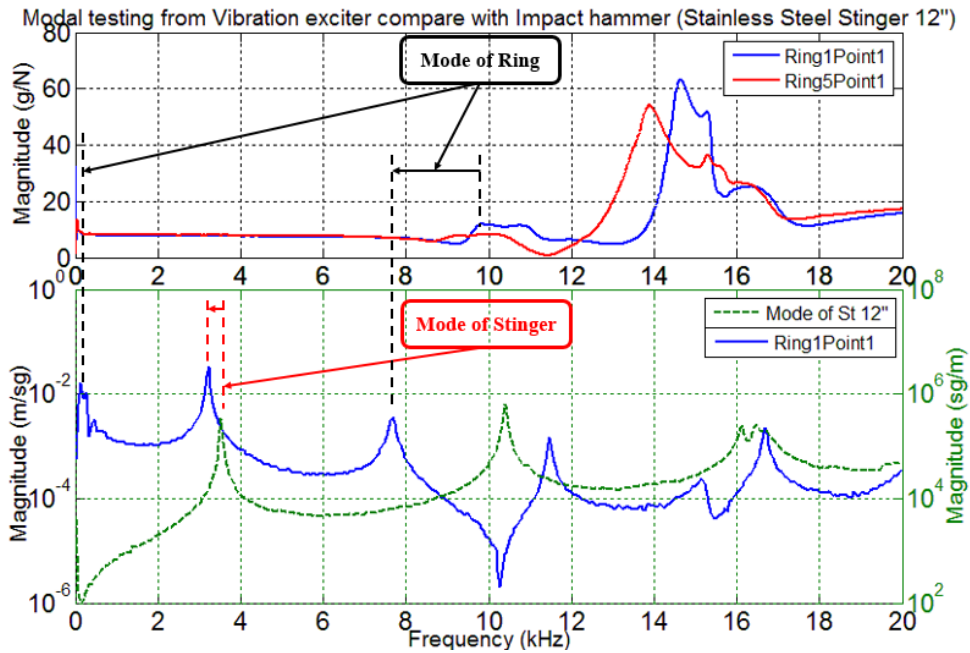
รูปที่ จ-7 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนียวนำ
 ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แทงส่งผ่าน
 การสั่นสะเทือนเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 3 นิ้ว



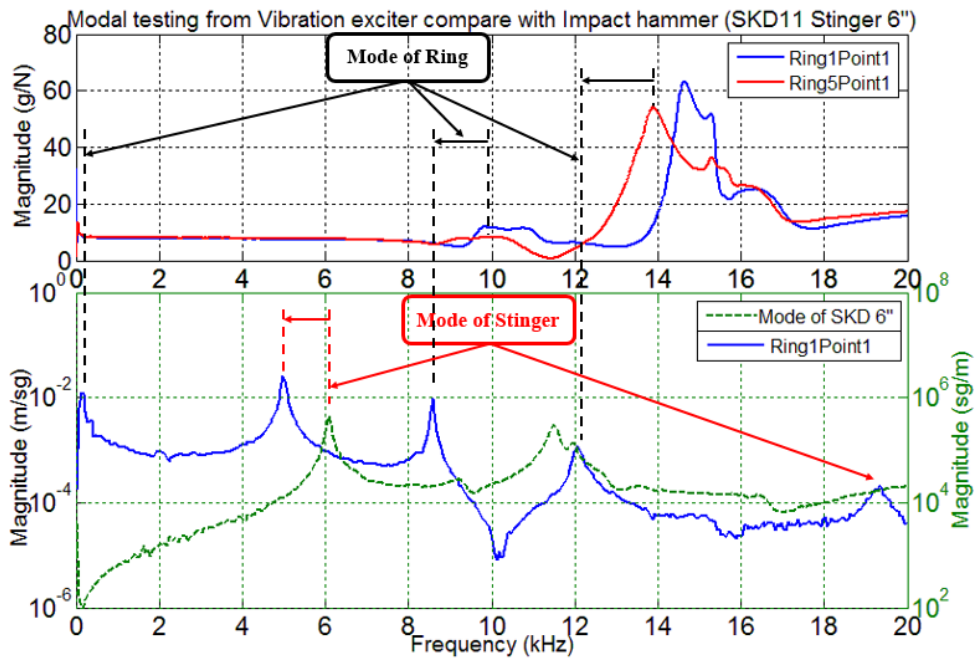
รูปที่ จ-8 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ
ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แท่งส่งผ่าน
การสั่นสะเทือนเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 6 นิ้ว



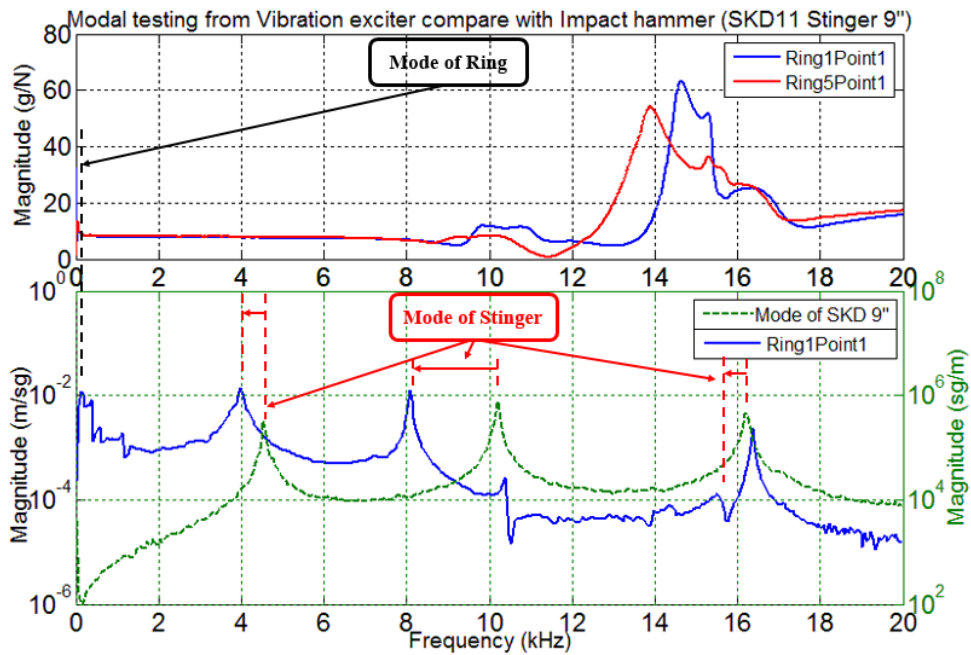
รูปที่ จ-9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ
ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แท่งส่งผ่าน
การสั่นสะเทือนเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 9 นิ้ว



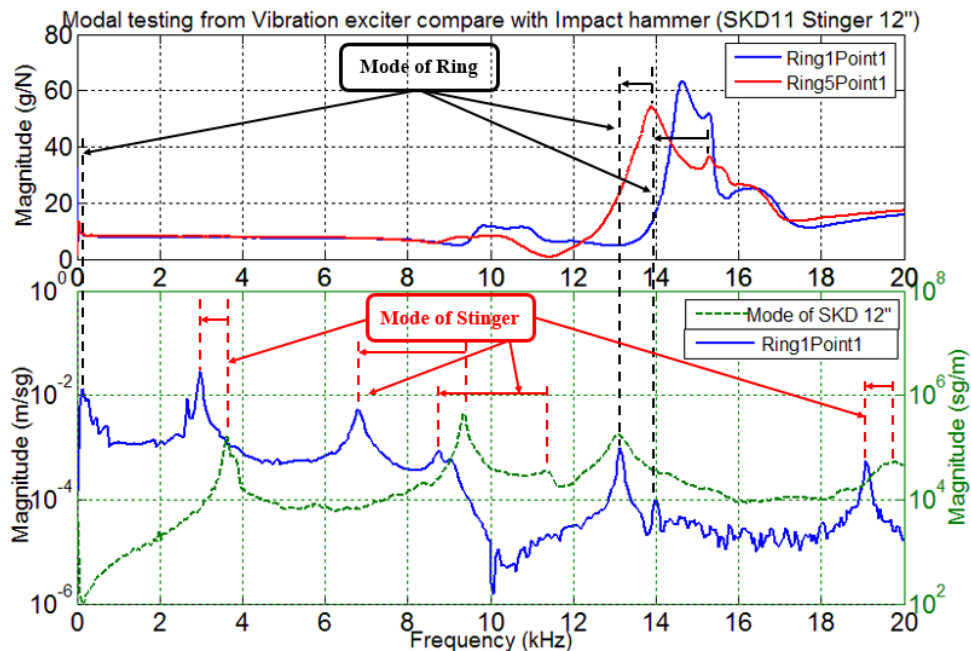
รูปที่ ๑-10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ
 ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แท่งส่งผ่าน
 การสั่นสะเทือนเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 12 นิ้ว



รูปที่ ๑-11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ
 ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แท่งส่งผ่าน
 การสั่นสะเทือนเหล็กเจียรขนาด 6 นิ้ว



รูปที่ จ-12 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ
ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แทงส่งผ่าน
การสั่นสะเทือนเหล็กเจียรขนาด 9 นิ้ว



รูปที่ จ-13 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ
ชั้นที่ 1 จุดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนเคาะและเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่ใช้แทงส่งผ่าน
การสั่นสะเทือนเหล็กเจียรขนาด 12 นิ้ว

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย กิติพงษ์ กาญจนธนาเลิศ เกิดเมื่อวันที่ 10 เมษายน พ.ศ. 2530 จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2548 และได้รับพระราชทานปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล เมื่อปี พ.ศ. 2552 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2552 โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ ดังนี้

- 1 นภดน้อย อาชวาคม, กิติพงษ์ กาญจนธนาเลิศ, ณัฐพงศ์ สหชัยวัฒนา, และ สิริวัฒน์ กวีวุฒิสิลป์, การส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้การวิเคราะห์สถิติพลังงาน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, เชียงใหม่, 4-7 พฤศจิกายน 2552
- 2 กิติพงษ์ กาญจนธนาเลิศ, และ นภดน้อย อาชวาคม, การศึกษาผลของการสวมอัดต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองของสเตเตอร์และเบสของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยวิธี Statistical Energy Analysis, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 26, เชียงราย, 24-27 ตุลาคม 2555