

การศึกษาการสันสะเทือนและเสียงของสปริงเดลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



นาย อภิรัฐ ศิลปพินิจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

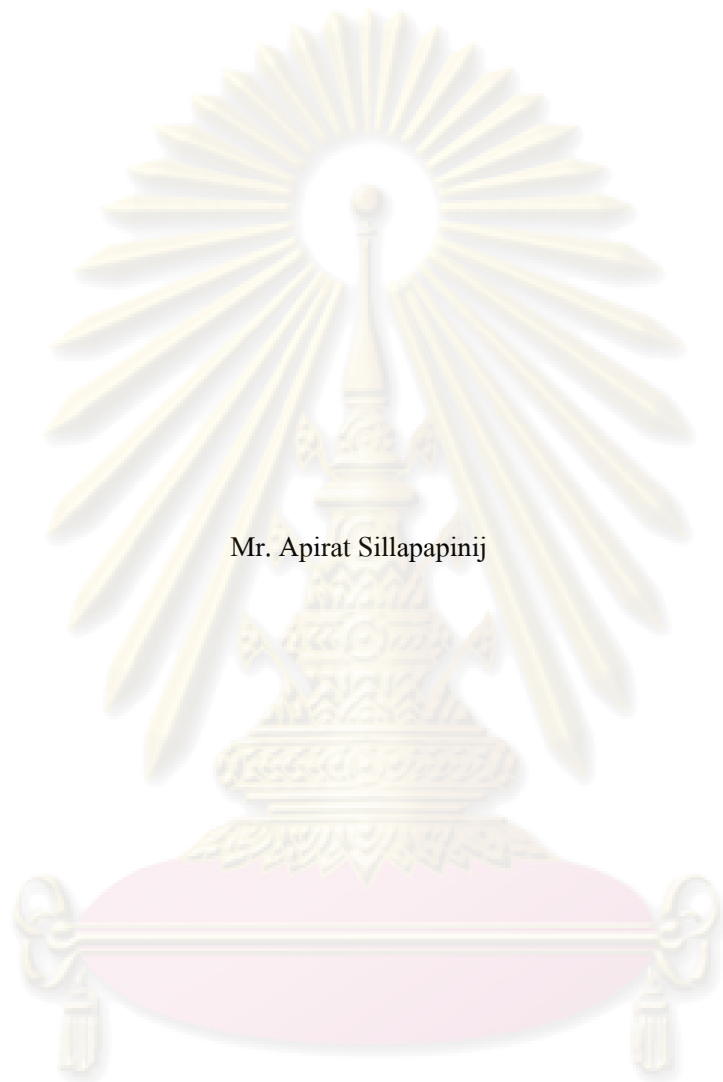
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF VIBRATION AND SOUND OF SPINDLE MOTOR FOR HARD DISK DRIVE



Mr. Apirat Sillapapinij

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการต้นสะเทือนและเสียงของสปริงเดลมอเตอร์สำหรับ
ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

โดย

นาย อภิรัฐ ศิลปพินิจ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. จูติมา จินตนาวัน

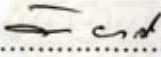
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

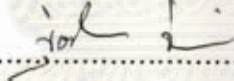
ดร. นกคณัย อาชวาคม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

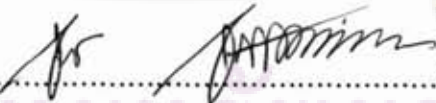

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศทวีวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ขงเจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. จูติมา จินตนาวัน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. นกคณัย อาชวาคม)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักร จันทักขณา)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อภิรัฐ ศิลปพินิจ : การศึกษาการสั่นสะเทือนและเสียงของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์โครฟี.
(STUDY OF VIBRATION AND SOUND OF SPINDLE MOTOR FOR HARD DISK DRIVE) อ.ที่
ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. จูติมา จินตนาวัน, อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. นกคณัย อาชวาคม,
93 หน้า.

งานวิจัยฉบับนี้ นำเสนองานวิจัยการศึกษาการสั่นสะเทือนและเสียงของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับ
ฮาร์ดดิสก์โครฟีที่มีขนาดของจานดิสก์ 3.5 นิ้ว เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์
ชนิด Fluid dynamic bearing เป็นผลมาจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหลัก จึงได้ออกแบบวิธีการ
ทดสอบการสั่นสะเทือนแบบ โมดอล โดยการกระตุ้นทาง ไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบปรับเปลี่ยนความถี่ให้
เหมาะสมกับมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กและใกล้เคียงกับพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริง ทั้งนี้เพื่อศึกษา
พฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากภายในมาสู่ภายนอกของ โครงสร้างมอเตอร์ เมื่อใช้ Laser doppler
vibrometer ในการวัดการสั่นสะเทือน พบว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการ
กระตุ้นได้ พบโหมดการสั่นสะเทือนที่เด่นชัดและครบถ้วนตลอดช่วงความถี่ 0-20 kHz อีกทั้งการสั่นสะเทือนที่
เกิดขึ้นยังเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในทิศทางตามแนวรัศมีและตามแนวเส้นสัมผัสวงกลม เมื่อนำ
ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนมาเปรียบเทียบกับสเปคตรัมเสียงของสปินเดิลมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็ว 7200
rpm พบว่าเสียงที่ดังเด่นชัดขึ้นมานั้นเป็นผลมาจากความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสปินเดิลมอเตอร์เข้าใกล้
ความถี่ธรรมชาติของ โครงสร้างมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงและเสียงที่ดังยิ่งขึ้น โดยเฉพาะ
ในช่วงความถี่ 14-20 kHz จึงได้ศึกษาแนวทางการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากภายในมาสู่ภายนอกเพื่อลด
การแพร่ของเสียง โดยเน้นไปที่การลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำไปสู่ฐานมอเตอร์
จากการพิจารณาแบบจำลองกลไกแรงเสียดทาน พบว่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากการสวมอัดของทั้งสองส่วนมีผลต่อการ
ส่งผ่านการสั่นสะเทือน จึงได้ทำการทดลองเปลี่ยนแรงดัน โดยการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ระหว่างวง
แหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์ จากผลการทดสอบการสั่นสะเทือนพบว่าการลดขนาด Interference fit
สามารถลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำมาสู่ฐานมอเตอร์ได้ และให้ผลดีที่สุดในช่วง
ความถี่ 7-12 kHz แต่ยังไม่พบผลของการปรับเปลี่ยน Interference fit ต่อระดับเสียงอย่างเด่นชัด สาเหตุหลักอาจมา
จากปัจจัยอื่นนอกเหนือไปจากการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐาน
มอเตอร์ซึ่งยากแก่การควบคุม

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิติศ.....อภิรัฐ ศิลปพินิจ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2551.....ลายมือชื่ออ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....น.ก.ค.น.ย. อาชวาคม.....

4970682421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: VIBRATION/ SOUND/ ELECTROMAGNETIC/ SPINDLE MOTOR

APIRAT SILLAPAPINIJ : STUDY OF VIBRATION AND SOUND OF SPINDLE MOTOR FOR HARD DISK DRIVE. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASSOC. PROF. THITIMA JINTANAWAN, Ph.D., THESIS COADVISOR : NOPDANAI AJAVAKOM, Ph.D., 93 pp.

This thesis is to study vibration and emitted sound of spindle motor for 3.5 inches hard disk drive. Since the vibration that leads to the acoustic noise of fluid-dynamic bearing spindle motor in hard disk drive is primarily caused by the electromagnetic excitation, the suitable method of modal testing for small motor is the electrical excitation from electromagnetic force by the supplied sine-swept current which simulates the real operating conditions. Once the electromagnetic excitation is applied, the vibration of motor's structure is expected to rise from the internal towards the external parts of the motor. The laser doppler vibrometer will then be used to measure this vibration. It gives clear vibration results in the frequency range of 0-20 kHz. Furthermore, the vibration of spindle motor from electromagnetic excitation occurred both from radial forces as well as tangential forces is also studied. When the frequency response functions are compared with the sound spectrum of the spindle motor while running at 7200 rpm, it is found that amplified sound peaks in the sound spectrum are generated when the frequency of the electric current supplying to the motor is near the natural frequency of the spindle motor. This is especially true at the frequency range of 14-20 kHz where the effects are even clearer as the vibration's stronger and the sound's peaks are higher. Therefore, this research attempts to search for ways, as part of the study, to reduce vibration and sound with the emphasis on reducing the vibration that is transferred from the stator coil to the base of the motor. From the analysis of the friction model, it is found that the pressure from press-fit is a main factor of vibration. The reduction in the interference fit reduces the transfer of vibration from stator coil to motor's base, especially at frequency range of 7-12 kHz. On the other hand, it is found that the relationship between the interference fit and emitted sound of the motor cannot be established because the other factors than the interference fit are difficult to control.

Department : ...Mechanical Engineering... Student's signature :*Apirat Sillapapinij*.....
 Field of study : Mechanical Engineering... Principal Advisor's signature :*Thitima Jintanawan*.....
 Academic year :2008..... Co-advisor's signature :*Nopdanai Ajavakom*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้ ถ้าไม่ได้รับความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในหลายๆด้านจาก คุณ จตุพร สีนลอยมา วิศวกรจากบริษัท NIDEC ที่ให้ความกรุณาในการเตรียมชิ้นงานสำหรับงานวิจัย รวมไปถึงคอยอำนวยความสะดวกในการทดสอบต่างๆ จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์หนักกิจ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา และ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน อาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ผู้ซึ่งให้ความกรุณาจัดทำชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ รวมไปถึงให้คำแนะนำต่างๆซึ่งช่วยให้การทดสอบลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักร จันทลักษณ์ อาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย

และวิทยานิพนธ์นี้จะประสบผลสำเร็จไปไม่ได้ ถ้าไม่ได้รับความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติมา จินตนาวัน และ ดร.นภคณัย อาชวาคม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการให้ความรู้ คำแนะนำ รวมไปถึงคอยให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และ ครอบครัว ที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีให้ผู้วิจัยเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉุ
รายการสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัยโดยย่อ.....	3
1.5 แผนการดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.7 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 โครงสร้างและการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	8
2.2 การเกิดเสียง แหล่งกำเนิดเสียง ลักษณะและการแพร่ของเสียงในสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	10
2.3 การทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า	13
2.4 การศึกษาและวิเคราะห์กลไกแรงเสียดทานและพลังงานที่สูญเสียไปที่บริเวณผิว Interference fit	15
บทที่ 3 การทดสอบแบบ โมดอล และพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่นำไปสู่เสียงรบกวนของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	23
3.1 แบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนภายในสปินเดิลมอเตอร์	23
3.2 การทดสอบแบบ โมดอลโดยการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า.....	27
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบแบบ โมดอล.....	27
3.2.2 การกระตุ้นทางกล (Mechanical excitation).....	30

3.2.3	การกระตุ้นทางไฟฟ้า (Electrical excitation)	32
3.2.4	การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า	33
3.2.5	การเลือกใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมกับมอเตอร์ขนาดเล็กในช่วงความถี่ที่ได้ยินได้	35
3.3	การวัดเสียงที่แพร่ออกจากสปินเดิลมอเตอร์ในขณะทำงาน	37
3.4	ลักษณะความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์	38
3.4.1	โหมดการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์	38
3.4.2	รูปทรงของโหมดการสั่นสะเทือน	41
3.5	การศึกษาลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมของชุดโรเตอร์	46
3.6	การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของการสั่นสะเทือนและเสียง	49
บทที่ 4	การเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ที่มีผลต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	52
4.1	การวิเคราะห์ผลของกลไกแรงเสียดทานที่บริเวณผิว Interference fit ต่อพลังงานสูญเสีย	52
4.2	การออกแบบสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	60
4.3	ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนเชิงความถี่ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit	62
บทที่ 5	บทสรุป	71
5.1	บทสรุป	71
5.2	ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	73
5.3	ข้อเสนอแนะ	73
	รายการอ้างอิง	74
	ภาคผนวก	76
	ภาคผนวก ก ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์	77
	ภาคผนวก ข การปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับเครื่องมือวัด	84
	ภาคผนวก ค การตรวจสอบตำแหน่งของมุมสัมพัทธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	90
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	93

ตารางที่ 1.1 แผนการและระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	5
ตารางที่ 3.1 โหมดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างมอเตอร์ตัวอย่าง.....	40
ตารางที่ 4.1 การแบ่งกลุ่มสปีนเคิลมอเตอร์ตัวอย่างตามการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit.....	61
ตารางที่ 4.2 ขนาด Interference fit ของสปีนเคิลมอเตอร์ตัวอย่างในแต่ละกลุ่ม	62
ตารางที่ 4.3 พลังงานของการสั่นสะเทือนที่ฐานมอเตอร์ของสปีนเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง.....	68



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของสปินเดิลมอเตอร์ประเภท FDB สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	8
รูปที่ 2.2 ลักษณะข้อแม่เหล็กและวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในสปินเดิลมอเตอร์แบบสมมาตร	9
รูปที่ 2.3 แหล่งกำเนิดเสียงจากการทำงานของมอเตอร์	10
รูปที่ 2.4 สเปกตรัมเสียงที่แพร่ออกมาจากสปินเดิลมอเตอร์ (ก) หมุนที่ความเร็วรอบปกติ (ข) ทันทีที่หยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า	12
รูปที่ 2.5 แบบจำลองทางพลศาสตร์อย่างง่ายของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์	16
รูปที่ 2.6 ลักษณะของแผ่นชิ้นงานที่ถูกยึดเข้าด้วยกัน โดยแรงดันกระจายตัวแบบคงที่	17
รูปที่ 2.7 แผนภาพของแรงภายในที่เกิดขึ้นใน Initial loading phase	18
รูปที่ 2.8 (ก) ลักษณะแรงที่กระทำกับแผ่นชิ้นงานด้านบนและแผ่นชิ้นงานด้านล่าง (ข) ความสัมพันธ์ของ Hooke's law	19
รูปที่ 2.9 แผนภาพของแรงภายในที่เกิดขึ้นใน Unloading phase	19
รูปที่ 2.10 แผนภาพของแรงภายในที่เกิดขึ้นใน Reloading phase	20
รูปที่ 2.11 ลักษณะของแรงที่กระทำภายนอกเทียบกับระยะขจัดที่เกิดขึ้น	21
รูปที่ 3.1 แผนภาพตัดแสดงส่วนประกอบภายในของสปินเดิลมอเตอร์	23
รูปที่ 3.2 แบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายของชุดโรเตอร์	24
รูปที่ 3.3 แบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์	25
รูปที่ 3.4 การส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปสู่ฐานมอเตอร์ในลักษณะของ (ก) โมเมนต์คัต (ข) แรงบิด	26
รูปที่ 3.5 วงจรไอซีเรกูเลเตอร์	28
รูปที่ 3.6 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสไฟฟ้า	29
รูปที่ 3.7 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบโดยการกระตุ้นทางกล	30
รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า	32
รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของการกระตุ้นทางกลเปรียบเทียบกับกระตุ้นทางไฟฟ้า	34
รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของทรานส์คิวเซอร์แบบวัดความเร่งเปรียบเทียบกับ LDV	36
รูปที่ 3.11 การวัดเสียงที่แพร่ออกจากสปินเดิลมอเตอร์ภายในห้องไร้เสียงสะท้อน	37
รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง	38
รูปที่ 3.13 ทิศทางการวัดการสั่นสะเทือนที่ฐานมอเตอร์และชุดโรเตอร์	41
รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือน (ก) ฐานมอเตอร์ (ข) ชุดโรเตอร์	41

รูปที่ 3.15 รูปทรงของโหมคการสันตะเทือนที่ฐานมอเตอร์ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A (ก) 2.5 kHz (ข) 9.55 kHz (ค) 10.6 kHz (ง) 15.4 และ 16.1 kHz และ (จ) 18.4 kHz.....	42
รูปที่ 3.16 รูปทรงของโหมคการสันตะเทือนที่ชุดโรเตอร์ในทิศทาง Transverse ของสปินเดิล มอเตอร์ตัวอย่าง A (ก) 2.5 kHz (ข) 9.11 kHz (ค) 15.4 kHz และ (ง) 16.1 kHz.....	44
รูปที่ 3.17 รูปทรงของโหมคการสันตะเทือนที่ชุดโรเตอร์ในทิศทางตามแนวรัศมีของสปินเดิล มอเตอร์ตัวอย่าง A (ก) 2.5 kHz (ข) 9.11 kHz (ค) 15.4 kHz และ (ง) 16.1 kHz.....	45
รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองการสันตะเทือนของโรเตอร์ในทิศทาง Transverse เทียบกับมุมของ โรเตอร์	47
รูปที่ 3.19 (ก) ลักษณะของขั้วแม่เหล็กและวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ที่โรเตอร์มุม 0 องศา (ข) ลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลม.....	48
รูปที่ 3.20 (ก) ลักษณะของขั้วแม่เหล็กและวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ที่โรเตอร์มุม 15 องศา (ข) ลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวรัศมี	49
รูปที่ 3.21 ผลตอบสนองเชิงความถี่เปรียบเทียบกับระดับกำลังเสียงที่เกิดจากการทำงาน ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A	50
รูปที่ 3.22 ผลตอบสนองเชิงความถี่เปรียบเทียบกับระดับกำลังเสียงที่เกิดจากการทำงาน ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B.....	51
รูปที่ 4.1 แบบจำลองอย่างง่ายของการสวมอัตรระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์	53
รูปที่ 4.2 แบบจำลองของการสวมอัตรระหว่างทรงกระบอกกลางและเพลลา และรองรับ แรงบิดที่มากกระทำจากภายนอก	53
รูปที่ 4.3 แผนภาพของแรงบิดภายในที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสในขั้นตอน Loading stage	55
รูปที่ 4.4 แผนภาพของแรงบิดภายในที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสในขั้นตอน Unloading stage	56
รูปที่ 4.5 แผนภาพของแรงบิดภายในที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสในขั้นตอน Reloading stage	57
รูปที่ 4.6 ลักษณะของระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นจากแรงบิดภายนอก	59
รูปที่ 4.7 บริเวณผิวที่มีการ Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์	60
รูปที่ 4.8 ลักษณะของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่มีฐานมอเตอร์ (ก) แบบที่ 1 (ข) แบบที่ 2	62
รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A1 เทียบกับ B5	63
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 เทียบกับ C1	64
รูปที่ 4.11 การแบ่งพื้นที่บนฐานมอเตอร์สำหรับการวิเคราะห์หา Spatial average velocity	66

รูปที่ 4.12 Spatial average velocity ที่ฐานมอเตอร์ a) สปีดเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง A1 เทียบกับ B5 และ b) สปีดเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 เทียบกับ C1	67
รูปที่ ก-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของการกระตุ้นทางกล	77
รูปที่ ก-2 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของการกระตุ้นทางไฟฟ้า	77
รูปที่ ก-3 สเปกตรัมของค้อนเคาะที่ใช้ในการกระตุ้นการสั่นสะเทือน	78
รูปที่ ก-4 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นการสั่นสะเทือน	78
รูปที่ ก-5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการวัดด้วยทรานส์ดีวเซอร์แบบวัดความเร็ว	79
รูปที่ ก-6 ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการวัดด้วย Laser doppler vibrometer	79
รูปที่ ก-7 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปีดเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง A	80
รูปที่ ก-8 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปีดเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง B	80
รูปที่ ก-9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปีดเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง A1 และ B5 วัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับแกนกลางของฐานมอเตอร์	81
รูปที่ ก-10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปีดเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง A1 และ B5 วัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์	81
รูปที่ ก-11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปีดเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 และ C1 วัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับแกนกลางของฐานมอเตอร์	82
รูปที่ ก-12 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปีดเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 และ C1 วัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์	82
รูปที่ ก-13 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปีดเคิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 และ C1 วัดการสั่นสะเทือนที่ฐานมอเตอร์ในช่วงความถี่ 0-25 kHz	83
รูปที่ ข-1 แสดงบริเวณควบคุมการแสดงผลของ Dynamic signal analyzer	85
รูปที่ ข-2 ภาพขยายส่วนควบคุมการแสดงผลของ Dynamic signal analyzer	86
รูปที่ ค-1 การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบตำแหน่งเชิงมุมของชุดโรเตอร์	90
รูปที่ ค-2 ตำแหน่งมุมสัมพัทธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและขั้วแม่เหล็กถาวร (ก) ตำแหน่งที่ขั้วเหนือตรงกันกับเฟสที่ถูกกระตุ้น (ข) ตำแหน่งที่ขั้วเหนือเอียงกับ เฟสที่ถูกกระตุ้น	91

รายการสัญลักษณ์

A_i	พื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใดๆ (m^2)
A_{total}	พื้นที่ผิวรวมของจุดวัดการสั่นสะเทือนทั้งหมดบนฐานมอเตอร์ (m^2)
$G_c I_c$	Torsional stiffness ของทรงกระบอกกลวง ($N\cdot m^2$)
$G_s I_s$	Torsional stiffness ของเพลลา ($N\cdot m^2$)
k	Torsional stiffness ของเพลลาเทียบกับผลรวมของ Torsional stiffness ทรงกระบอกกลวงและเพลลา
l	ความยาวของบริเวณผิวสัมผัส (m)
m	แรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาว ($N\cdot m/m$)
M	แรงบิดที่กระทำด้านนอกของทรงกระบอกกลวง ($N\cdot m$)
M_a	แอมพลิจูดของแรงบิดที่กระทำภายนอกทรงกระบอกกลวง ($N\cdot m$)
p	ความดันที่เกิดจากการสวมอัดระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพลลา (Pa)
r	ค่าคงที่ใดๆ
R	รัศมีของเพลลา (m)
v_i	ความเร็วของการสั่นสะเทือนบนพื้นผิวใดๆ (mm/s)
\hat{v}	Spatial averaged velocity (mm/s)
ϕ_1	ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1
ϕ_2	ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2
ϕ_3	ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 3
α	ค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1
μ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
ψ	พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกลไกแรงเสียดทาน (Joule)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการที่เครื่องคอมพิวเตอร์จะทำงานได้นั้น จะต้องประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักคือ หน่วยประมวลผลในรูปแบบข้อมูลไบนารี (Arithmetic-logical unit) หน่วยความจำ (Memory unit) อุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต (I/O device) และ หน่วยควบคุมการทำงาน (Control unit) ในแต่ละส่วนนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่างๆกันไปตามหน้าที่การทำงาน สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดอุปกรณ์หนึ่งในส่วนของหน่วยความจำ เพราะคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำงานตามลำพัง โดยอาศัยหน่วยประมวลผลหลักเพียงส่วนเดียวได้ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงมีบทบาทสำคัญในการทำงานตั้งแต่การเริ่มบู๊ระบบเข้าสู่การใช้งานของระบบปฏิบัติการต่างๆ การทำ Virtual memory จนถึงการจัดเก็บและการอ่านข้อมูล ในฮาร์ดดิสก์จะมีส่วนประกอบต่างๆไม่ว่าจะเป็น หัวอ่าน แขนของหัวอ่าน Stepping motor วงจรควบคุมการทำงาน ฯลฯ แต่ส่วนประกอบหลักและถือเป็นหัวใจสำคัญของฮาร์ดดิสก์นั่นก็คือ สปินเดิลมอเตอร์

สปินเดิลมอเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของจานดิสก์ โดยสปินเดิลมอเตอร์ในสมัยก่อนจะมีความเร็วรอบในการหมุนอยู่ที่ 3600 rpm ต่อมาได้มีการพัฒนาขึ้นมาเป็น 5400, 7200 และ 10000 rpm ตามลำดับ การพัฒนาให้สปินเดิลมอเตอร์หมุนเร็วขึ้น จะทำให้การทำงานของฮาร์ดดิสก์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เพราะมีผลให้เซ็กเตอร์ (Sector) ที่บรรจุข้อมูลจะถูกหมุนมาพบกับหัวอ่านเร็วขึ้น ทำให้การค้นพบและอ่านข้อมูลได้เร็วขึ้น เพราะเป็นการลดเวลาในการเข้าถึงข้อมูล (Access time) และสามารถส่งผ่านข้อมูลไปให้หน่วยประมวลผลด้วยอัตราที่สูงขึ้น ในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไปที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ (Personal computer) จะมีขนาด 3.5" และมีความเร็วรอบในการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์อยู่ที่ 7200 rpm โดยมีขนาดความจุตั้งแต่ 80 GB ไปจนถึง 1.2 TB ซึ่งองค์ประกอบที่มีความสำคัญสำหรับการออกแบบสปินเดิลมอเตอร์ให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ มีด้วยกันอยู่หลายส่วนไม่ว่าจะเป็น ขนาดของสปินเดิลมอเตอร์ การลดการใช้พลังงาน การระบายความร้อนที่เกิดจากการทำงาน ความแม่นยำในการทำงาน ลดการสั่นสะเทือน และเสียงรบกวน เป็นต้น ซึ่งการลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนนั้นเป็นปัจจัยหลักของการออกแบบสปินเดิลมอเตอร์ เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในการทำงานจะส่งผลให้เกิดการแพร่ของเสียงตามมาด้วย ในสมัยก่อนนั้นสปินเดิลมอเตอร์ใช้แบร์ริงประเภทลูกบอลโลหะซึ่งประกอบด้วยลูกบอลโลหะขนาดเล็กบรรจุอยู่ในวงแหวนโลหะที่ติดตั้งอยู่รอบเพลาของสปินเดิล

มอเตอร์ จะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนตามมา แต่ปัจจุบันได้พัฒนาเป็นแบบ Fluid dynamic bearing (FDB) โดยลูกบอลโลหะจะถูกแทนที่ด้วยของเหลวที่มีความหนืดสูง ซึ่งเป็น การช่วยลดการสัมผัสกันของ โลหะ และยังเป็นการช่วยลดเสียงรบกวนและยังยืดอายุการใช้งาน ออกไปอีกด้วย แต่การสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนนั้นยังคงมีอยู่ เนื่องจากการสั่นสะเทือนจากการ ทำงานภายในสปินเดิลมอเตอร์นั้นมีสาเหตุหลักมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic forces) ที่เกิดขึ้นระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและชุดโรเตอร์ ซึ่งวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะส่งผ่าน การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นไปที่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์และแพร่ไปสู่เสียงต่อไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการกระตุ้นที่ เหมาะสมของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ องค์ประกอบที่มีความสำคัญในการส่งผ่าน การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและพลังงานสูญเสียที่เกิดจากการส่งผ่านการ สั่นสะเทือนผ่านทาง Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของมอเตอร์ รวมไปถึงปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ไปสู่เสียงที่เกิดขึ้นจากการทำงานและแนวทางการลดเสียงของสปิน เดิลมอเตอร์โดยพิจารณาจากผลของการ Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐาน ของมอเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมกับสปินเดิลมอเตอร์สำหรับ ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนใกล้เคียงกับการ สั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการทำงานปกติ
2. ศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงรบกวน ซึ่งเป็นผล มาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการทดลองจากมอเตอร์ตัวอย่างทั่วไป เพื่อให้เข้าใจ ถึงองค์ประกอบที่มีความสำคัญต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและการแพร่ของ เสียงในช่วงความถี่ที่สามารถได้ยินคือช่วง 20 Hz-20 kHz
3. ศึกษาแนวทางการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและการแพร่ของเสียงในช่วง ความถี่ที่สามารถได้ยินคือ 20 Hz-20 kHz โดยทดลองจากลักษณะของ Interference fit แบบต่างๆระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของมอเตอร์ ภายในสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์
4. อธิบายกลไกของแรงเสียดทาน และพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นบนบริเวณผิวที่มี Interference fit แบบต่างๆระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของมอเตอร์ ภายในสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ทดสอบการสันสะเทือนแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลและการกระตุ้นทางไฟฟ้ากับสปริงเดลมอเตอร์ตัวอย่างทั่วไป เพื่อเปรียบเทียบวิธีการกระตุ้นที่ให้ผลตอบสนองการสันสะเทือนที่มีจำนวน โหมดครบถ้วนและเด่นชัดในช่วงความถี่ที่สนใจ คือช่วงความถี่ที่สามารถได้ยิน 20 Hz-20 kHz รวมไปถึงการเลือกใช้เครื่องมือวัดการสันสะเทือนที่เหมาะสมกับมอเตอร์ที่มีขนาดเล็ก และให้ผลตอบสนองการสันสะเทือนที่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่สนใจ
2. ทดสอบการสันสะเทือนแบบโมดอลด้วยวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมกับสปริงเดลมอเตอร์ตัวอย่างทั่วไป เปรียบเทียบผลตอบสนองการสันสะเทือนกับสเปคตรัมของเสียงที่เกิดจากการทำงานปกติ เพื่อศึกษาลักษณะการส่งผ่านสันสะเทือนที่เกิดขึ้นและโหมดของการสันสะเทือนที่มีผลต่อการแพร่ไปสู่เสียง รวมไปถึงการวางตำแหน่งของโรเตอร์ที่มีผลต่อลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ออกแบบและแบ่งกลุ่มสปริงเดลมอเตอร์ตัวอย่างที่มีขนาด Interference fit แตกต่างกัน ทำการทดสอบการสันสะเทือนแบบโมดอลด้วยวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสม และเปรียบเทียบผลตอบสนองการสันสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ฐานมอเตอร์ของสปริงเดลมอเตอร์ตัวอย่างแต่ละตัว เพื่อพิจารณาถึงการลดการส่งผ่านการสันสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit
4. วิเคราะห์การส่งผ่านการสันสะเทือนและพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นบนผิวที่มีการ Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของมอเตอร์ซึ่งเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ในลักษณะของแบบจำลองกลไกแรงเสียดทานอย่างง่าย โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงบิดภายในและระยะขจัดเชิงมุม

1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัยโดยย่อ

1. ศึกษาโครงสร้างของสปริงเดลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาจากรายงานการวิจัย วารสาร และหนังสือที่เกี่ยวข้อง
2. ทดสอบการสันสะเทือนแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้าของสปริงเดลมอเตอร์ตัวอย่างทั่วไปสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งการกระตุ้นทางกลทำโดยใช้ค้อนเคาะที่ตัวของสปริงเดลมอเตอร์ตัวอย่างให้เกิดการสันสะเทือน และ

การกระตุ้นทางไฟฟ้าทำโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับสปินเดิลมอเตอร์ ตัวอย่าง 1 เฟส ให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นรอบวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยโรเตอร์ไม่เคลื่อนที่ วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นและสัญญาณของแรงที่ใช้ในการเคาะหรือสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างนำมาทดสอบเชิงความถี่ เปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดขึ้นเพื่อหาวิธีการกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสม

3. ทดสอบการสั่นสะเทือนแบบ โมดอลด้วยวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมจากข้อที่ 2 กับสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างทั่วไป โดยการวัดการสั่นสะเทือนพื้นฐานของมอเตอร์ และ โรเตอร์ในทิศทาง Transverse และตามแนวรัศมี นำผลตอบสนองเชิงความถี่มาวิเคราะห์ถึงลักษณะของโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นและค่าความถี่ธรรมชาติ และเปรียบเทียบกับสเปคตรัมของเสียงที่วัดได้จากการทำงานปกติของสปินเดิลมอเตอร์ภายในห้องไร้เสียงสะท้อนในช่วงความถี่ที่สามารถได้ยินคือ 20 Hz-20 kHz พิจารณาลักษณะของโหมดที่มีผลต่อการแพร่ของเสียงอย่างเด่นชัดและลักษณะรูปทรงของโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น และทดสอบการสั่นสะเทือนแบบ โมดอลด้วยการกระตุ้นที่เหมาะสมโดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งของโรเตอร์ด้วยการหมุนครึ่งละ 5 องศา ซึ่งมีผลต่อลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนและวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดขึ้น
4. ออกแบบสปินเดิลมอเตอร์ให้มีขนาดของ Interference fit แตกต่างกัน 3 กลุ่ม และทดสอบการสั่นสะเทือนแบบ โมดอลด้วยวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสม เปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดขึ้น และทำการวัดเสียงที่เกิดขึ้นจากการทำงานภายในห้องไร้เสียงสะท้อน เปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่กับสเปคตรัมของเสียงและวิเคราะห์ลักษณะของขนาด Interference fit ที่มีผลต่อการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและการแพร่ของเสียง
5. วิเคราะห์การส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของมอเตอร์จากแบบจำลองกลไกแรงเสียดทานอย่างง่าย โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงบิดภายในและระยะขจัดเชิงมุมในการวิเคราะห์หาพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นบนบริเวณผิวสัมผัสจากการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit

1.5 แผนการดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีระยะเวลาในการดำเนินการทั้งสิ้น 18 เดือน โดยแผนการดำเนินการและระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการและระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัย	เดือนที่						
	1-4	5-6	7-10	11-12	13-14	15-16	17-18
1. การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา							
2. ศึกษาวิธีทดสอบแบบโมดูลที่เหมาะสม							
2.1 การกระตุ้นทางกล							
2.2 การกระตุ้นทางไฟฟ้า							
3. พฤติกรรมการสั่นสะเทือนและเสียง							
3.1 ทดสอบการสั่นสะเทือนและวิเคราะห์							
3.2 ศึกษาลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า							
3.3 วิเคราะห์รูปทรงโหมดการสั่นสะเทือน							
4. ทดสอบโดยเปลี่ยนขนาด Interference fit							
4.1 ทดสอบการสั่นสะเทือน							
4.2 วัดเสียงและเปรียบเทียบผล							
5. วิเคราะห์กลไกแรงเสียดทานอย่างง่าย							
6. สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์							

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เทคนิคของการทดสอบการสั่นสะเทือนที่ให้ผลตอบแทนการสั่นสะเทือนที่ใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยลักษณะของผลตอบแทนเชิงความถี่นั้นเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขของการ Interference fit ของแต่ละกลุ่มมอเตอร์ ตัวอย่างและเปรียบเทียบกับสเปคตรัมของเสียงซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในส่วนของ

การวิเคราะห์การส่งผ่านการสั่นสะเทือนผ่านกลไกแรงเสียดทาน ลักษณะของพลังงานสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแรงคั้นที่ลดลงจากการสวมอัตรระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของมอเตอร์ ส่งผลให้การส่งผ่านการสั่นสะเทือนและการแพร่ของเสียงลดลง และสามารถอธิบายโดยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ถึงความหมายเชิงกายภาพที่เกิดขึ้นจากการส่งผ่านการสั่นสะเทือนของบริเวณผิวที่มีการ Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของมอเตอร์

1.7 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยย่อ แผนการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ โครงสร้างและการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ การเกิดเสียง การแพร่ของเสียง การทดสอบการสั่นสะเทือนโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า รวมไปถึงการศึกษาการส่งผ่านการสั่นสะเทือน เพื่อให้เข้าใจถึงปัญหาและแนวทางในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้

บทที่ 3 การทดสอบแบบโมดอล และพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่นำไปสู่เสียงรบกวนของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ในบทนี้เริ่มต้นจากการศึกษาการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่าย เพื่อให้เข้าใจถึงการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น นำเสนอการทดสอบแบบโมดอลโดยวิธีการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า และลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือน รวมไปถึงเทคนิคการวัดเสียงของสปินเดิลมอเตอร์ขณะทำงาน และท้ายสุดเป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่กับสเปกตรัมเสียงเพื่อศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่นำไปสู่เสียงรบกวนของสปินเดิลมอเตอร์

บทที่ 4 การเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ที่มีผลต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและเสียงของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ในบทนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนโดยการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์การส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองกลไกแรงเสียดทานบริเวณผิวสัมผัส เมื่อเข้าใจถึงการส่งผ่านการสั่นสะเทือนแล้ว จึงดำเนินการออกแบบและแบ่งกลุ่มสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือน และท้ายสุด

เป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นของสปริงเดลมอเตอร์ตัวอย่างที่มีขนาด Interference fit แตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่ตั้งไว้

บทที่ 5 บทสรุป ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลที่ได้ดำเนินการศึกษามาตั้งแต่ต้นจนจบ และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการศึกษาต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

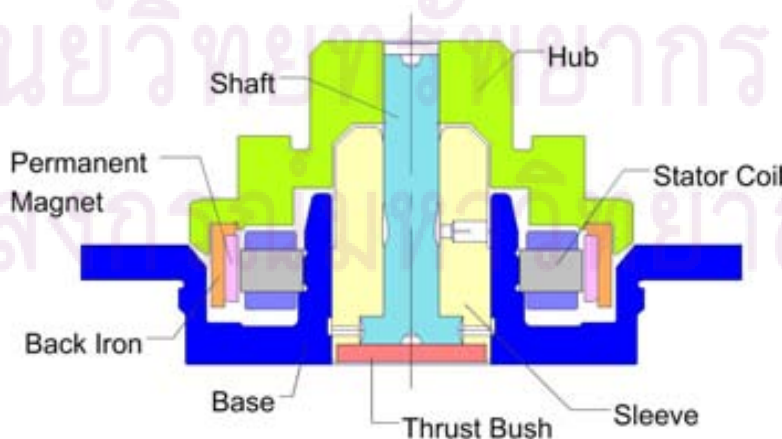
บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและการแพร่เสียงในสปีนเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ มีจุดประสงค์หลักของการศึกษาด้วยกัน 2 ส่วน คือ การศึกษาลักษณะของการสั่นสะเทือนซึ่งแพร่ไปสู่เสียง และการศึกษาวิธีการลดการสั่นสะเทือนโดยพิจารณาจาก Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของมอเตอร์ ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและการทำงานของสปีนเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการเกิดเสียงรวมถึงแหล่งกำเนิดเสียงในสปีนเดิลมอเตอร์ ส่วนที่ 3 เป็นการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า และส่วนที่ 4 เป็นการศึกษางานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์กลไกแรงเสียดทานที่ผิว Interference fit ซึ่งจะมีผลต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนต่อไป โดยหัวข้อที่ 2.1-2.3 จะเกี่ยวข้องกับจุดประสงค์หลักแรกของการศึกษา และในหัวข้อที่ 2.4 จะเกี่ยวข้องกับจุดประสงค์หลักที่สองของการศึกษาตามลำดับ

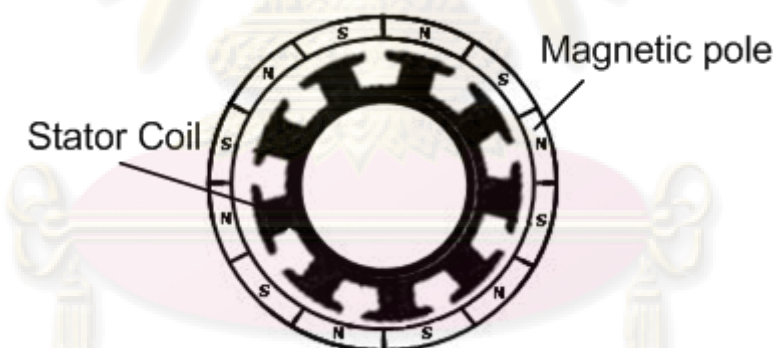
2.1 โครงสร้างและการทำงานของสปีนเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ในปัจจุบันสปีนเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ใช้ Fluid dynamic bearing (FDB) เป็นตัวลดแรงเสียดทานในการหมุนแทนการใช้แบร์ริงชนิดลูกบอลโลหะ โครงสร้างภายในของสปีนเดิลมอเตอร์ประเภท FDB ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก 4 ส่วนคือ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของสปีนเดิลมอเตอร์ประเภท FDB สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

1. ฐานของมอเตอร์ (Base) เป็นชิ้นส่วนที่ยึดกับตัวเรือนของฮาร์ดดิสก์ และชิ้นส่วนอื่นของมอเตอร์จะถูกติดตั้งเข้ากับฐานของมอเตอร์
2. Fluid dynamic bearing (FDB) ทำหน้าที่เป็นตัวลดแรงเสียดทานในการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ซึ่งประกอบไปด้วย เพลา (Shaft) ปลอกแบร์ริง (Sleeve) และ Thrust bush ที่ตัวของปลอกแบร์ริงจะมีรูที่ใช้ในการหยอดของเหลวที่มีความหนืดสูง โดยของเหลวนี้อำหน้าที่เป็นตัวหล่อเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานและการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น
3. โรเตอร์ (Rotor) ทำหน้าที่หมุนจานดิสก์ไปพร้อมกับเพลาของสปินเดิลมอเตอร์ โรเตอร์ ประกอบด้วย แกนหมุนจานดิสก์ (Hub) แม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) และ Back iron โรเตอร์ถูกประกอบเข้ากับเพลาโดยการกดอัด (Press-fit) และถูกยึดติดไว้ด้วยวัสดุประเภทอีพ็อกซี่
4. วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (Stator coil) ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเหนี่ยวนำให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะประกอบเข้ากับฐานของมอเตอร์โดยการกดอัด (Press-fit) และถูกยึดไว้ด้วยกาว



รูปที่ 2.2 ลักษณะขั้วแม่เหล็กและวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในสปินเดิลมอเตอร์แบบสมมาตร [1]

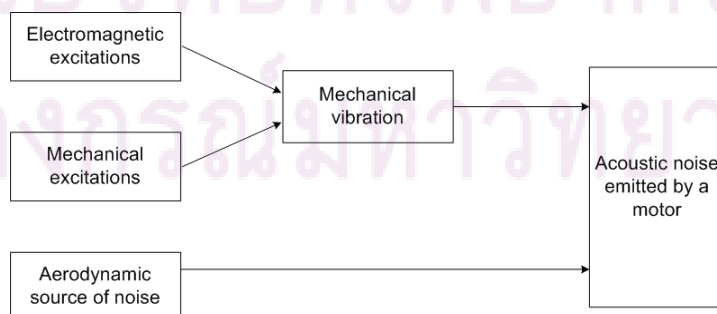
ในส่วนการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ เนื่องจากสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ที่นำมาศึกษาเป็นมอเตอร์ประเภท Permanent magnet synchronous motor แบบสมมาตรซึ่งมีจำนวนของขั้วแม่เหล็กบนแม่เหล็กถาวรทั้งหมด 12 ขั้ว (Poles) และจำนวนของช่องว่างในวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ 9 ช่อง (Slots) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การทำงานเริ่มจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ตัวขับ (Driver) และตัวขับจะจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำแบบสลับเฟสกันไปเรียงตามเฟส ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไหลผ่านรอบๆ ขดลวดเหนี่ยวนำ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะถูกเหนี่ยวนำด้วยแม่เหล็กถาวรที่ยึดติดอยู่

กับโรเตอร์ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำกับขั้วของแม่เหล็กถาวรและวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ถ้าทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสวนทางกับทิศทางของสนามแม่เหล็กถาวรหรือมีขั้วของแม่เหล็กตรงกัน ก็จะเกิดการผลักออกจากกันแต่ถ้ามีทิศทางเดียวกันหรือมีขั้วของแม่เหล็กต่างกัน ก็จะดูดเข้าหากัน เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำนั้นถูกยึดติดอยู่กับฐานของมอเตอร์ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงผลักดันให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของโครงสร้างและการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [2] พบว่าส่วนประกอบที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของโครงสร้างมอเตอร์และแพร่เป็นเสียงนั้นมาจากการสั่นสะเทือนของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและ โรเตอร์เป็นหลัก เนื่องจากทั้งสองส่วนนี้รองรับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำโดยตรง โรเตอร์จะส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปสู่แบร์ริงและฐานของมอเตอร์ ซึ่งช่วยกระจายพลังงานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนไปได้ แต่การสั่นสะเทือนที่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะส่งผ่านไปสู่ฐานของมอเตอร์โดยตรง อาจเป็นสาเหตุสำคัญของการแพร่ไปสู่เสียง ซึ่งจะนำไปสู่การศึกษาการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของมอเตอร์ต่อไป

2.2 การเกิดเสียง แหล่งกำเนิดเสียง ลักษณะและการแพร่ของเสียงในสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในการทำงานของฮาร์ดดิสก์นั้น จะมีเสียงรบกวนเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเสียงที่เกิดขึ้นนี้มาจากส่วนที่เคลื่อนที่อยู่ภายในฮาร์ดดิสก์ ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านหรือการหมุนของแผ่นดิสก์ สาเหตุของการเกิดเสียงที่สำคัญส่วนหนึ่งมาจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยแหล่งกำเนิดเสียงจากการทำงานของมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์นั้นมาจาก 3 แหล่งกำเนิดด้วยกัน คือ การกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic excitations) การกระตุ้นทางกล (Mechanical excitations) และแหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic source) [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



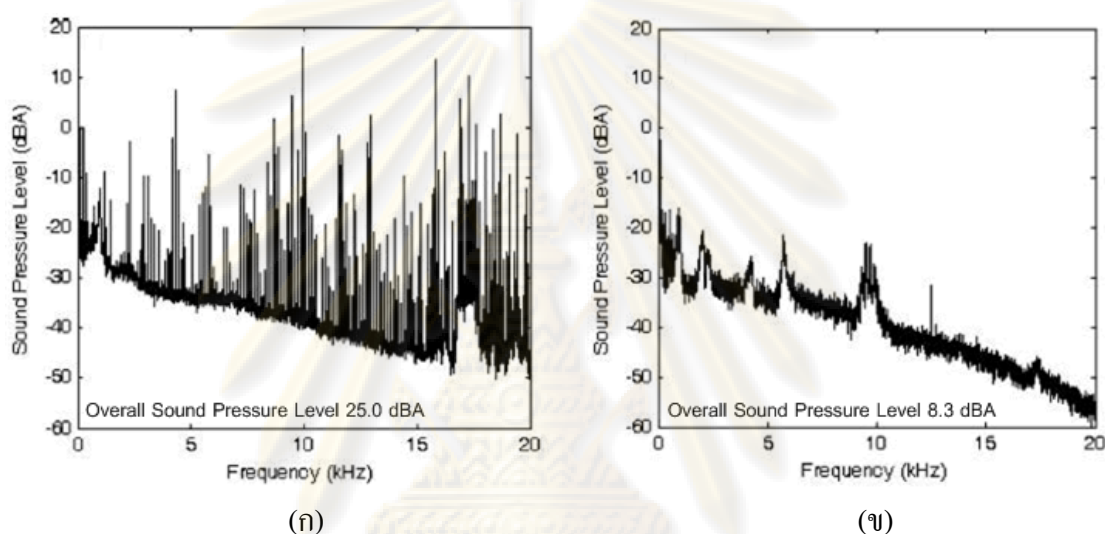
รูปที่ 2.3 แหล่งกำเนิดเสียงจากการทำงานของมอเตอร์ [3]

การกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับโรเตอร์และวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ซึ่งจะประกอบไปด้วย Unbalanced magnetic pull (UMP), Tangential forces และ Axial forces [4] การเปลี่ยนแปลงของแรงเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดการหมุนที่ไม่ราบเรียบของโรเตอร์ และการเสีรูปของโรเตอร์และวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งทั้งหมดทำให้เกิดเสียงขึ้นในขณะที่มอเตอร์ทำงาน โดยจะเรียกเสียงนี้ว่า Electromagnetic noise โดย Bi et al. [4] พบว่า UMP และ Axial forces มีสาเหตุมาจากโครงสร้างและการประกอบของมอเตอร์ ในส่วนของเสียงที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นทางกล อาจจะมาจากการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนทางกล ไม่ว่าจะเป็นแบร์ริงหรือโรเตอร์ เนื่องจากเกิดความบกพร่องของชิ้นส่วนหรือการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานของโรงงาน เช่น โรเตอร์ที่ผลิตออกมาไม่มีความสมดุล เมื่อนำมาใช้งานจะทำให้เกิดการหมุนที่ไม่สมดุล เป็นผลให้เกิดแรงเหวี่ยงหรือ Unbalanced forces เกิดขึ้นกระทำกับตัวแบร์ริงเป็นผลให้เกิดการสั่นสะเทือนและเสียงตามมา และสุดท้ายแหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์จะมาจากอากาศที่ไหลเวียนอยู่ภายในและภายนอกของมอเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์นั้นมีความเร็วรอบในการหมุนที่สูงถึง 7200 rpm อากาศที่ไหลเวียนอยู่ภายในและภายนอกจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเช่นกัน ส่งผลให้เกิดเสียงขึ้น

จากการพิจารณาถึงลักษณะ โครงสร้างและส่วนประกอบของสปินเดิลมอเตอร์ ในปัจจุบันแบร์ริงของสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไปได้ถูกเปลี่ยนจากชนิดที่เป็นลูกบอลโลหะมาเป็น FDB โดย Bi et al. [4] ได้ทำการทดสอบการแพร่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ FDB เปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่ใช้แบร์ริงชนิดลูกบอลโลหะ โดยการใช้ตัวขับแบบ Brushless direct current เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับสปินเดิลมอเตอร์ในการหมุนที่ความเร็วรอบ 5400 rpm พบว่าสเปกตรัมเสียงของมอเตอร์ประเภท FDB ในช่วงความถี่ 0-16 kHz จะแตกต่างกับสเปกตรัมเสียงของมอเตอร์ประเภทที่ใช้แบร์ริงแบบลูกบอลโลหะอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือค่าระดับเสียงอยู่ที่ 22.1 dB/20 μ Pa สำหรับมอเตอร์ประเภท FDB และที่ 46.5 dB/20 μ Pa สำหรับมอเตอร์ประเภทลูกบอลโลหะ ดังนั้นการเปลี่ยนมาใช้งานแบร์ริงประเภท FDB จะทำให้เสียงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงทางกลลดลงมาก นอกจากนี้เนื่องจากสปินเดิลมอเตอร์นั้นมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆและไม่มีใบพัดเพื่อช่วยระบายความร้อน ดังนั้นแหล่งกำเนิดเสียงทางอากาศพลศาสตร์จึงมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดเสียงอื่นๆ

Ajavakom et al. [5] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ประเภท FDB สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เพื่อให้เข้าใจถึงแหล่งกำเนิดหลักของเสียงที่เกิดขึ้นจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี ซึ่งในการทดสอบจะใช้สปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ชนิดเส้นผ่านศูนย์กลางดิสก์ 3.5” ที่มีจำนวนของขั้วแม่เหล็กและช่องว่างในวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเท่ากับ 12 และ 9 ตามลำดับ หมุนที่ความเร็ว

7200 rpm โดยในกรณีนี้ 1 นี้ทำการวัดเสียงเมื่อสปีนเดิลมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 7200 rpm ซึ่งเสียงที่วัดได้นั้นจะมาจากแหล่งกำเนิดเสียงทั้ง 3 แหล่งดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ในกรณีนี้ 2 ทดสอบโดยให้สปีนเดิลมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบปกติ 7200 rpm และวัดเสียงทันทีที่หยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวขับ แหล่งกำเนิดเสียงจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจึงลดลงเกือบทั้งหมดในกรณีนี้ ดังนั้นแหล่งกำเนิดหลักจึงมาจากการกระตุ้นทางกลและแหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์ โดยผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมเสียงที่แพร่ออกมาจากสปีนเดิลมอเตอร์ (ก) หมุนที่ความเร็วรอบปกติ (ข) ทันทีที่หยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า [4]

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าสเปกตรัมเสียงของทั้งสองกรณีแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือในกรณีแรก จะมีระดับความดันเสียงรวมอยู่ที่ 25.0 dBA และในกรณีที่สองระดับความดันเสียงรวมอยู่ที่ 8.3 dBA ซึ่งแตกต่างกันถึง 16.7 dBA และในกรณีแรกจะเห็นว่าในช่วงความถี่สูงจะมีลักษณะสเปกตรัมเสียงปรากฏเป็นยอดแหลมชันอยู่อย่างหนาแน่น นั้นหมายความว่า การกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดหลักของการเกิดเสียงและมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดเสียงในช่วงความถี่สูง ในช่วง 15-20 kHz

สำหรับการศึกษาเสียงที่เกิดขึ้นจากการทำงานของมอเตอร์ประเภทอื่นๆ โดย Wang [6] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับแบบ 3 เฟส พบว่าการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนมีสาเหตุมาจากแหล่งกำเนิด 3 แหล่งเช่นเดียวกับเสียงที่เกิดจากสปีนเดิลมอเตอร์ นั่นคือ แหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์ แหล่งกำเนิดทางกล และแหล่งกำเนิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปกติแล้วแหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์และทางกลสำหรับมอเตอร์

เหนียวแบบ 3 เฟสจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อระดับเสียงโดยรวมก็ต่อเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบสูง ส่วนแหล่งกำเนิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหนียวในมอเตอร์ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดเสียงที่เด่นชัดที่สุดในการทำงานของมอเตอร์ขณะที่มีความเร็วรอบต่ำและยังคงเป็นแหล่งกำเนิดหลักของเสียงในการทำงานที่ความเร็วรอบสูงอีกเช่นกัน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงการเกิดเสียงและแหล่งกำเนิดเสียงนี้ ทำให้ทราบว่า การกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นที่วงแหวนขดลวดเหนียวและโรเตอร์ และการสั่นสะเทือนนี้จะแพร่ไปสู่เสียงต่อไปซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดหลักของเสียงที่เกิดขึ้นจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ จากความเข้าใจดังกล่าวจะนำไปสู่การศึกษาการทดสอบการสั่นสะเทือนโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า เพื่อศึกษาถึงเสียงที่แพร่มาจากการส่งผ่านการสั่นสะเทือนของวงแหวนขดลวดเหนียวซึ่งเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการที่เหมาะสมต่อไป

2.3 การทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า

การทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์สามารถกระตุ้นให้โครงสร้างเกิดการสั่นสะเทือนได้หลายวิธี คือ การกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงนั้นมีสาเหตุหลักมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในมอเตอร์ ดังนั้นการทดสอบการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงของโครงสร้างมอเตอร์โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าจึงน่าจะเหมาะสมที่สุด เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยวิธีนี้จะมีแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมือนกับการทำงานจริงของมอเตอร์ การกระตุ้นทางไฟฟ้านี้มีเทคนิคที่แตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการกระตุ้น และมีผู้ศึกษามาสรุปได้ดังนี้

Colby, Mottier และ Miller [7] ได้ศึกษาถึงโหมดของการสั่นสะเทือนและเสียงที่เกิดขึ้นใน Switched reluctance motor (SRM) โดยมอเตอร์ประเภทนี้เป็นแบบ 4 เฟส มีขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์และวงแหวนขดลวดเหนียว 6 ขั้วและ 8 ขั้วตามลำดับ ในการทดลองวัดการสั่นสะเทือนจะใช้การกระตุ้นทางไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือน เป็นการกระตุ้นแบบโรเตอร์ไม่เคลื่อนที่ โดยการใช้ตัวขับจ่ายแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบสัญญาณพัลส์ (Pulse) ในช่วงเวลา 5 ms ให้มอเตอร์เพียงหนึ่งเฟส เป็นเหตุให้เกิดกระแสไฟฟ้าในรูปแบบสัญญาณพัลส์แบบสามเหลี่ยม (Triangular pulse) ที่ Pulse repetition frequency 30 Hz ในการทดสอบจะปรับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ให้ตรงกันกับขั้วแม่เหล็กของวงแหวนขดลวดเหนียวที่ทำการจ่ายสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นจะเกิดแรงสูงสุดในทิศทาง Radial และไม่มีผลของแรงบิด (Torque) มาเกี่ยวข้อง ในการทดสอบ ผู้วิจัยวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับวงแหวนขดลวดเหนียวโดยใช้ทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่งติดตั้งที่บริเวณด้านหลังของขดลวดเหนียวของเฟสที่ทำการจ่ายสัญญาณไฟฟ้า และทำมุม 45 องศา จาก

เฟสที่จ่ายสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำผลการวัดการสั่นสะเทือนที่ได้มาใช้ในการพิจารณาถึงลักษณะของ โหมดต่างๆที่เกิดขึ้น จากการทดสอบ เมื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่พบลักษณะของเรโซแนนซ์ปรากฏที่ความถี่ 1.6 และ 8.7 kHz ตามลำดับ

การวัดการสั่นสะเทือนเพื่อหาตำแหน่งของความถี่ธรรมชาติโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า รูปแบบสัญญาณพัลส์ในการกระตุ้น จะต้องเลือกแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าและช่วงเวลาที่ใช้ในการจ่ายสัญญาณพัลส์ให้สอดคล้องกัน การเลือกแอมพลิจูดที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลให้พลังงานที่เกิดจากการกระตุ้นการสั่นสะเทือนส่งไปไม่ถึงในช่วงความถี่สูงเป็นเหตุให้ไม่พบความถี่ธรรมชาติ ในช่วงความถี่นี้ หรือทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการจ่ายสัญญาณพัลส์อาจไม่เพียงพอต่อการเข้าสู่ของสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ อีกทั้งตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่งนั้นยังมีความสำคัญเนื่องจากบางตำแหน่งอาจจะให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ไม่ชัดเจน ซึ่งจะทำให้ไม่พบความถี่ธรรมชาติในบางตำแหน่งของการวัด แต่อย่างไรก็ตามค่าความถี่ธรรมชาติของ โครงสร้างมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจะยังคงมีค่าเดิมโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เนื่องจากการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยวิธีที่ผ่านมาเป็นการกระตุ้น โดยการจ่ายสัญญาณพัลส์ ด้วยความถี่คงที่เพื่อศึกษาตำแหน่งการเกิดความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ซึ่งไม่ใช่การกระตุ้นการสั่นสะเทือนเพื่อก่อให้เกิดเสียงแพร่ร่อออกมาจากมอเตอร์ โดย Cameron, Lang และ Umans [8] ได้ศึกษาถึงแหล่งกำเนิดและการลดเสียงใน Doubly salient variable-reluctance motor (VRM) ซึ่งพบว่าแหล่งกำเนิดเสียงที่เป็นไปได้ นั้นแพร่ร่อมาจากการสั่นสะเทือนของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเป็นหลัก อันเนื่องมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและโรเตอร์ การเกิด Torque ripple และการเกิด UMP เป็นต้น Cameron, Lang และ Umans จึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือน โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ 4 เฟส มีขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์และวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ 6 และ 8 ขั้วตามลำดับ ผู้ศึกษากระตุ้น โครงสร้างโดยใช้ตัวขับในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสัญญาณฟันเลื่อยแบบเอียง (Bias sawtooth) จากอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้กับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเพียงหนึ่งเฟส โรเตอร์จึงไม่หมุน โดยที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายมีค่าอยู่ระหว่าง 1.75-2.00 A และช่วงความถี่ที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 100 Hz ถึง 15 kHz อินเวอร์เตอร์จะแปรผันค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นไปตามความถี่เพื่อเป็นการรักษาค่าสูงสุดและต่ำสุดของกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ในการทดสอบ ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์นั้นจะถูกปรับให้ตรงกับเฟสที่ถูกกระตุ้นเพื่อไม่ให้เกิดแรงบิดกระทำกับโรเตอร์ เพราะฉะนั้นเสียงที่แพร่ร่อออกมาจากการสั่นสะเทือนจึงไม่มีผลของ Torque ripple เข้ามาเกี่ยวข้อง

การวัดการสั่นสะเทือนของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะใช้ Accelerometer ในการวัด โดยติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆกันรอบ VRM ทั้งหมด 2 ตัว ซึ่งพบว่าการสั่นสะเทือนสูงสุดจะเกิดขึ้นที่วง

แหวนขดลวดเหนียวนำ อันเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างโรเตอร์และวงแหวนขดลวดเหนียวนำในทิศทาง Radial และความถี่ธรรมชาติที่พบนั้นจะมีค่าตรงกันหมดสำหรับทุกตำแหน่งการวัดบนตัวเรือนของมอเตอร์ และเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของเสียงที่วัดได้จากการกระตุ้นนี้ พบว่าความถี่ในสเปกตรัมของเสียงที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์นั้นจะมียอดแหลมที่เด่นชัด ซึ่งหมายความว่าเสียงที่แพร่ออกจากมอเตอร์นั้นมีสาเหตุหลักมาจากแรงแม่เหล็กที่กระตุ้นให้วงแหวนขดลวดเหนียวนำเกิดการสั่นสะเทือนและสัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนในทิศทาง Radial โดยที่การเกิด Torque ripple นั้นไม่มีผลต่อเสียงที่แพร่ออกจากมอเตอร์ประเภทนี้

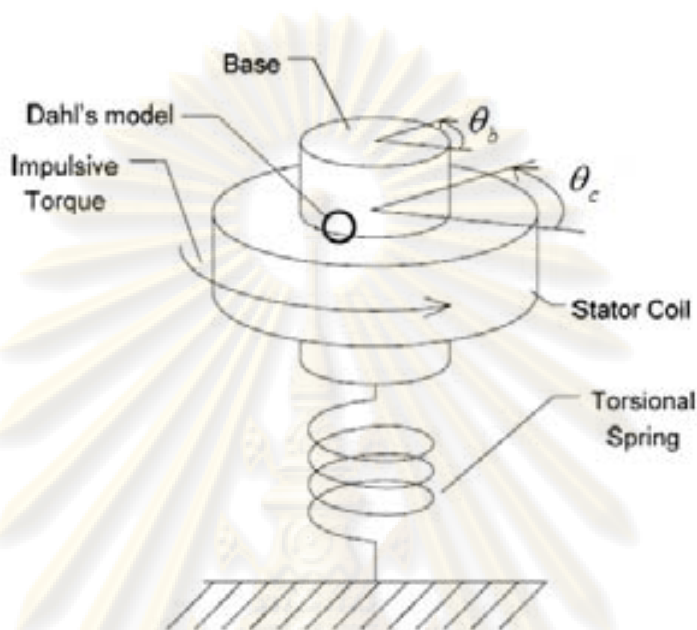
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การทดสอบการสั่นสะเทือน โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าจะเหมาะสมสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ นอกจากจะสามารถใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์แล้ว การสั่นสะเทือนหลักยังเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยตรงจากการกระตุ้น กระทำระหว่างโรเตอร์และวงแหวนขดลวดเหนียวนำ ซึ่งคล้ายกับลักษณะการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการแพร่เสียงที่เกิดขึ้นจริงจากการทำงานของมอเตอร์ แต่เทคนิคการวัดและการหาค่าตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมรวมถึงลักษณะสัญญาณที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อให้ได้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ดีที่สุดสำหรับมอเตอร์ศึกษานาเล็กที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์นั้น จำเป็นจะต้องพิจารณาให้เหมาะสมต่อไป

2.4 การศึกษาและวิเคราะห์กลไกแรงเสียดทานและพลังงานที่สูญเสียไปที่บริเวณผิว Interference fit

การศึกษาและทบทวนวรรณกรรมวิจัย เรื่องกลไกแรงเสียดทานและพลังงานที่สูญเสียที่ผิว Interference fit นั้นจะใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ถึงการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนียวนำไปสู่ฐานของมอเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยค่าความแน่นแบบกดอัด ลักษณะความแน่นที่ผิวขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบ และการเปลี่ยนแปลงความแน่นอาจเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของวงแหวนขดลวดเหนียวนำ หรือวงแหวนแม่เหล็กถาวรและ Back iron ความไม่ตรงกระบอกแบบสมบูรณ์ ลักษณะของความไม่สมมาตรทำให้เกิดความไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอกระทำต่อวงแหวนขดลวดเหนียวนำ [9] ส่วนความเข้าใจในเรื่องผลของค่าความแน่นต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและเสียงในสปีนเดิลมอเตอร์ จะสามารถลดเสียงที่เกิดขึ้นได้เมื่อกำหนดค่าความแน่นที่เหมาะสม

Jintanawan et al. [10] ได้วิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์อย่างง่ายของวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของมอเตอร์ ซึ่งเป็นแบบจำลองรวมมวล (Lumped mass model) มีการเคลื่อนที่แบบ 2 องศาอิสระ แบบจำลองประกอบด้วยวงแหวนขดลวดเหนียวนำซึ่งกำหนดให้เป็นก้อนมวล

รองรับแรงบิดแบบอิมพัลส์ และฐานของมอเตอร์ซึ่งกำหนดให้เป็นก้อนมวลเช่นกันและถูกยึดเข้ากับพื้นด้วยสปริงแบบรับแรงบิด ดังแสดงในรูปที่ 2.5

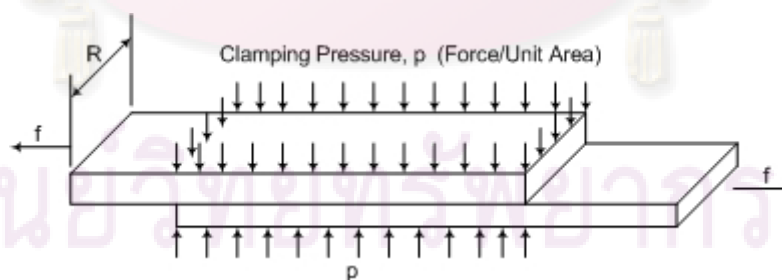


รูปที่ 2.5 แบบจำลองทางพลศาสตร์อย่างง่ายของวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์ [9]

การประกอบกันของวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของมอเตอร์จะถูกกดอัดเข้าด้วยกัน จะส่งผลให้เกิด Interference fit ที่บริเวณผิวสัมผัสของทั้งสอง เมื่อแรงบิดแบบอิมพัลส์กระทำกับวงแหวนขดลวดเหนียวนำ จะทำให้วงแหวนขดลวดเหนียวนำเกิดการเคลื่อนที่เชิงมุมและส่งผ่านแรงบิดแบบอิมพัลส์นี้ผ่านทาง Interference fit ซึ่งจะเกิดแรงเสียดทานขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสนี้ และส่งผ่านแรงบิดไปยังฐานของมอเตอร์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เชิงมุมสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่เชิงมุมของวงแหวนขดลวดเหนียวนำ เนื่องจากการเคลื่อนที่เชิงมุมสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นการเคลื่อนที่เลื่อนไถลแบบจุลภาค (Micro-slip) ในแบบจำลองดังกล่าวจึงใช้แบบจำลองของ Dahl's model [11] เพื่ออธิบายกลไกแรงเสียดทานและการเคลื่อนที่ดังกล่าวที่ผิวสัมผัส จากนั้นได้หาคำตอบของสมการการเคลื่อนที่ที่อธิบายแบบจำลองทางพลศาสตร์นี้โดยวิธีเชิงตัวเลข โดยแรงดันที่เกิดจากความแน่นในการประกอบชิ้นงานทั้งสองขึ้นอยู่กับลักษณะของ Interference fit กล่าวคือ หากผลต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของทั้งสองมีค่ามากก็จะส่งผลให้แรงดันที่เกิดจากความแน่นในการประกอบสูงขึ้นแต่ถ้าผลต่างมีค่าน้อย แรงดันที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อแรงดันมีค่ามาก การส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนียวนำไปสู่ฐานของมอเตอร์จะดีกว่าในกรณีที่แรงดันน้อยๆ ส่งผลให้เกิดลักษณะของการสั่นสะเทือนที่ฐานของมอเตอร์

ที่มากกว่าโดยสังเกตได้จากผลตอบสนองเชิงเวลาในกรณีที่แรงคั้นมีค่ามาก จะมีแอมพลิจูดที่สูงกว่าและเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ได้ช้ากว่า และเมื่อนำแรงเสียดทานที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับระยะขจัดเชิงมุมสัมผัส จะพบความสัมพันธ์ในลักษณะของวงแหวนฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) โดยพื้นที่ภายในวงแหวนปิดนี้บ่งบอกถึงการสูญเสียของพลังงานต่อหนึ่งวัฏจักรที่เกิดขึ้นจากความหน่วงของแรงเสียดทาน พบว่าการที่ Interference fit มีค่าน้อยหรือมีค่าความคั้นน้อย จะส่งผลให้มีการเกิด Pre-sliding ที่ดีหรือมีระยะขจัดเชิงมุมสัมผัสที่มากขึ้น และมีการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากความหน่วงของแรงเสียดทานที่มากกว่า จึงทำให้พลังงานที่ส่งผ่านไปพื้นฐานของมอเตอร์ลดลงและการสั่นสะเทือนก็จะลดลงตามไปด้วย

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้อธิบายกลไกแรงเสียดทานและการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในผิวสัมผัสแบบ Interference fit แต่สปริงเดลมอเตอร์นั้นมีโครงสร้างที่ซับซ้อน การพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์ให้สามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์ของการเกิด Pre-sliding ระหว่างผิวสัมผัสดังกล่าวได้อย่างถูกต้องนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในการอธิบายกลไกแรงเสียดทานและการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานของระบบที่มีความสลับซับซ้อนและมีลักษณะต่อเนื่อง (Continuous system) จะเริ่มจากการศึกษาของ Metherell และ Diller [12] โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงภายในและระยะขจัด (Internal force – displacement relation) ที่ผิวสัมผัสของแผ่นชิ้นงานที่ทาบทอกัน (Lap joint) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เพื่อนำไปสู่การพิจารณาหาพลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานต่อไป โดยแผ่นชิ้นงานสองแผ่นประกบกันและถูกกดให้ติดกันด้วยแรงคั้นกระจายตัวแบบคงที่ และมีแรงกระทำที่ปลายแผ่นชิ้นงานของทั้งสองแผ่นในแนว Axial ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่บริเวณผิวสัมผัสของทั้งสองแผ่น

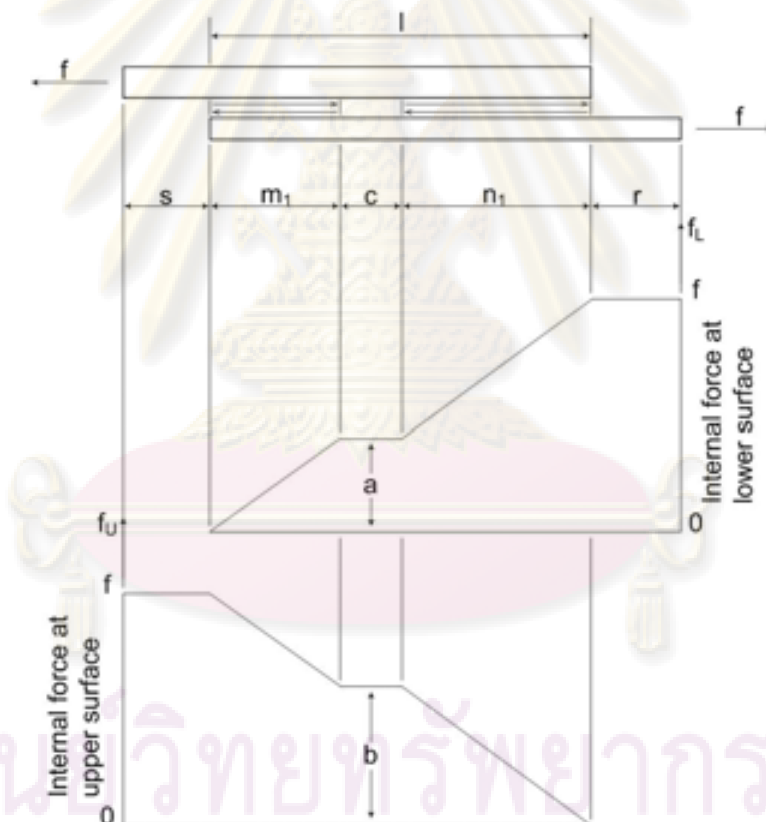


รูปที่ 2.6 ลักษณะของแผ่นชิ้นงานที่ถูกยึดเข้าด้วยกัน โดยแรงคั้นกระจายตัวแบบคงที่ [12]

Metherell และ Diller ได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ 1. Initial loading phase 2. Unloading phase และ 3. Reloading phase

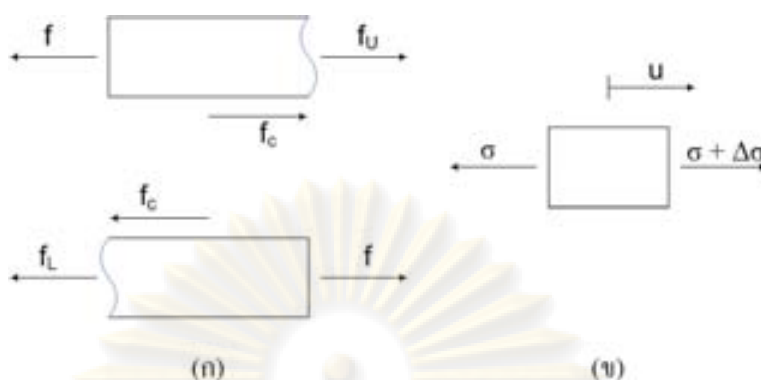
1. Initial loading phase

ในขั้นตอนนี้แรงภายนอก f ที่กระทำที่ปลายของทั้งสองด้านของแผ่นชิ้นงานจะเพิ่มจากศูนย์จนถึงค่าสูงสุด ในที่นี้กำหนดให้เป็น F_1 ทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสของทั้งสอง โดยรูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพแรงภายในที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงาน จะพบว่าแรงภายในของแต่ละแผ่นจะลดลงเป็นสัดส่วนของกันและกัน นั่นหมายความว่าในแต่ละช่วงของบริเวณผิวสัมผัส ผลรวมของแรงภายในของชิ้นงานทั้งสองแผ่นในแต่ละช่วงจะเท่ากับแรง f ที่กระทำจากภายนอก ซึ่งบริเวณผิวสัมผัสนี้สามารถแบ่งออกได้ 2 ช่วงคือ ช่วงที่เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัสนั่นคือช่วงระยะ m_1 และ n_1 และช่วงที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัสนั่นคือช่วงระยะ c



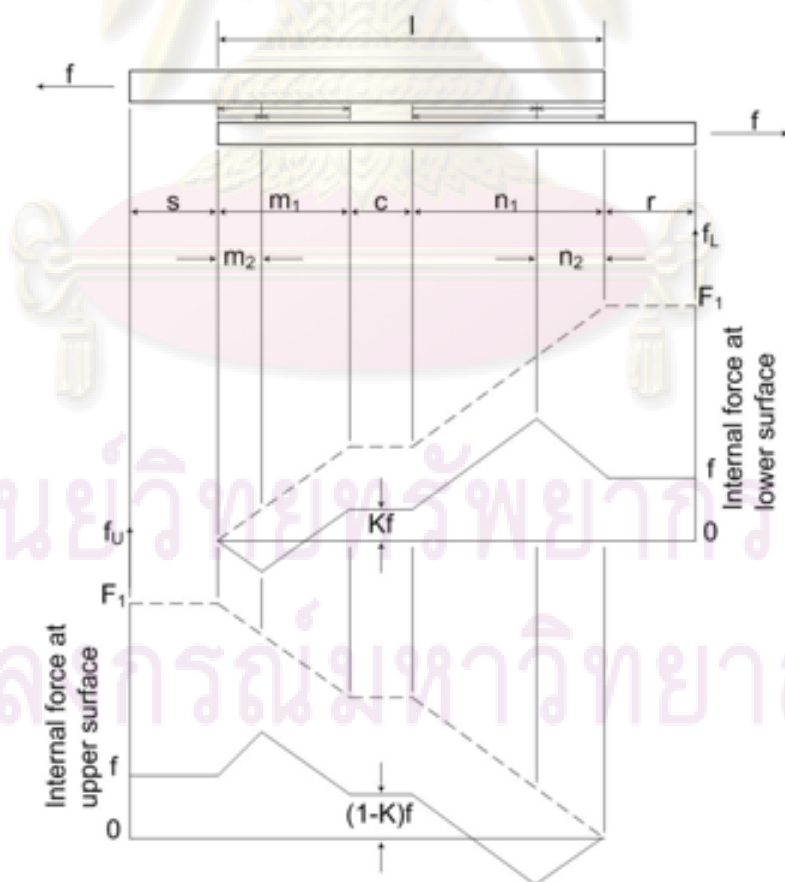
รูปที่ 2.7 แผนภาพของแรงภายในที่เกิดขึ้นใน Initial loading phase [12]

การวิเคราะห์หาแรงภายในที่เกิดขึ้นพิจารณาได้จากสมดุลแรงและความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะขจัด ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Hooke's law ดังแสดงในรูปที่ 2.8

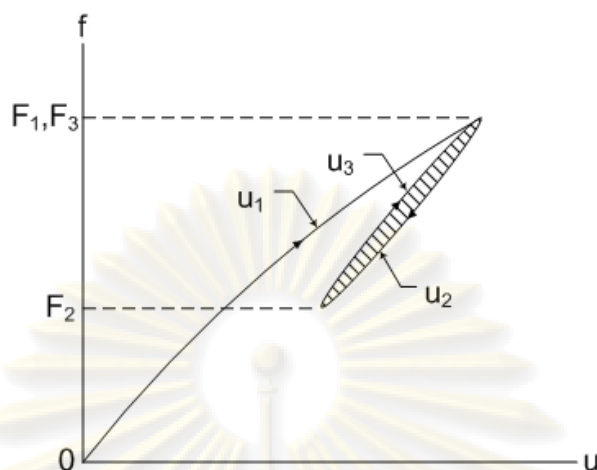


รูปที่ 2.8 (ก) ลักษณะแรงที่กระทำกับแผ่นชิ้นงานด้านบนและแผ่นชิ้นงานด้านล่าง (ข)
 ความสัมพันธ์ของ Hooke's law

จากรูปที่ 2.8 แสดงการสมดุลแรงที่เกิดขึ้นกระทำกับชิ้นงานในแต่ละแผ่น โดยที่ f_U และ f_L คือแรงภายในของแผ่นชิ้นงานด้านบนและด้านล่างตามลำดับ ส่วน f_c คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัส จากสมดุลแรงทำให้พิจารณาแรงภายในที่เกิดขึ้นได้ในทุกช่วงของแผ่นชิ้นงานและหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดและแรง f ได้



รูปที่ 2.9 แผนภาพของแรงภายในที่เกิดขึ้นใน Unloading phase [12]



รูปที่ 2.11 ลักษณะของแรงที่กระทำภายนอกเทียบกับระยะขจัดที่เกิดขึ้น [12]

เมื่อนำสมการความสัมพันธ์ของระยะขจัดและแรง f ที่กระทำภายนอกมาพล็อตจะได้กราฟเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 พบว่ากราฟที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงและระยะขจัดจะมีลักษณะเป็นวงแหวนปิด เรียกว่า วงแหวนฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ซึ่งพื้นที่ภายในวงแหวนคือปริมาณของการสูญเสียพลังงานจากกลไกแรงเสียดทาน โดยพลังงานที่สูญเสียในหนึ่งวัฏจักรสามารถคำนวณได้จากพื้นที่วงแหวนปิด และเมื่อวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ใน [12] พบว่าพลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับขนาดของแรงดันที่ใช้ในการยึดแผ่นชิ้นงานสองแผ่นเข้าด้วยกันในรูปที่ 2.6 ซึ่งปริมาณของพลังงานสูญเสียในหนึ่งวัฏจักรจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการส่งผ่านการสั่นสะเทือน กล่าวคือเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวสัมผัสก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย พลังงานสูญเสียจากกลไกแรงเสียดทานก็จะลดลง ทำให้การส่งผ่านการสั่นสะเทือนมากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวในกรณีแรงเสียดทานในชิ้นงานแบบทาบต่อกันสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jintanawan et al. [10]

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สรุปได้ว่าเสียงที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์นั้น มีแหล่งกำเนิดเสียงหลักมาจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากในช่วงความถี่สูง [5] และก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนที่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำส่งผ่านไปที่ฐานของมอเตอร์ การส่งผ่านการสั่นสะเทือนนี้กำหนดด้วยค่า Interference fit ที่เกิดจากการกดอัด (Press-fit) ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของมอเตอร์และกลไกแรงเสียดทาน พลังงานการสั่นสะเทือนจะลดลงโดยสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อนผ่านทางกลไกแรงเสียดทานที่บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งช่วยให้การส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปสู่ผิวภายนอกลดลงได้ แต่เนื่องจากสปินเดิลมอเตอร์นั้นมีโครงสร้างที่ค่อนข้างซับซ้อนและการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางพลศาสตร์เป็นไปได้ยาก เพราะฉะนั้นการเลือกใช้

กลไกแรงเสียดทานให้เหมาะสมและการทำนายพฤติกรรมการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้ ถูกต้องแม่นยำจึงทำได้ยาก ดังนั้นขอบเขตของวิทยานิพนธ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและเสียงจะจำกัดที่การหาความสัมพันธ์ของแรงและระยะขจัดที่เหมาะสมกับ โครงสร้างจริงของส่วนประกอบวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานของมอเตอร์ เพื่อนำไป พิจารณาศึกษาผลของ Interference fit ที่มีต่อพลังงานสูญเสียและการส่งผ่านการสั่นสะเทือนในเชิง คุณภาพเท่านั้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

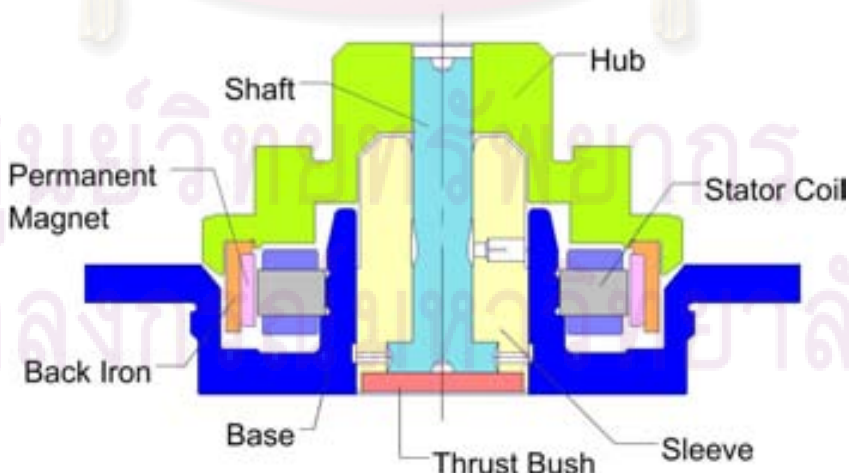
บทที่ 3

การทดสอบแบบโมดูล และพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่นำไปสู่เสียงรบกวนของสปีนเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ในบทนี้จะเริ่มต้นด้วยการนำเสนอแบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายเพื่อให้เข้าใจถึงการส่งผ่านการสั่นสะเทือนภายในสปีนเดิลมอเตอร์ ความเข้าใจดังกล่าวจะนำไปสู่การออกแบบการทดสอบการสั่นสะเทือนที่นำไปสู่เสียงของสปีนเดิลมอเตอร์ที่เหมาะสม ประเด็นหลักในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบแบบโมดูลด้วยวิธีการกระตุ้นแบบต่างๆ และเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการกระตุ้นที่ต่างกัน เพื่อเสนอแนะวิธีการทดสอบที่เหมาะสม นอกจากนี้จะนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ลักษณะทิศทางของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น รวมไปถึงนำเสนอการวัดเสียงที่แพร่ออกมาจากการทำงานปกติของสปีนเดิลมอเตอร์ เพื่อใช้ศึกษาเปรียบเทียบสเปกตรัมของสัญญาณเสียงกับผลตอบสนองการสั่นสะเทือน และลักษณะของโหมดการสั่นสะเทือนต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดเสียง

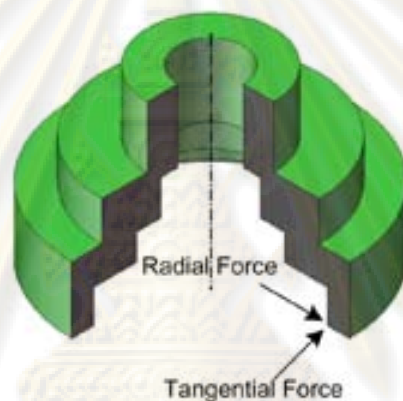
3.1 แบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนภายในสปีนเดิลมอเตอร์

จากการศึกษาโครงสร้างและการทำงานของสปีนเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยแผนภาพตัดส่วนประกอบภายในของสปีนเดิลมอเตอร์แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพตัดแสดงส่วนประกอบภายในของสปีนเดิลมอเตอร์

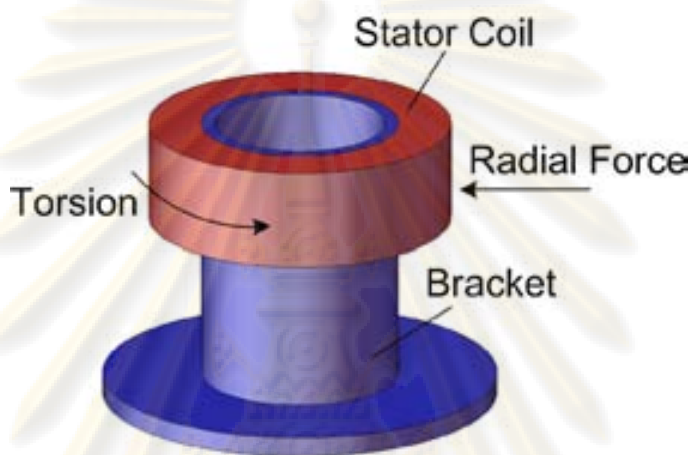
พบว่าการสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์เป็นผลมาจากการสั่นสะเทือนของวงแหวนขดลวดเหนียวนำและ โรเตอร์เป็นหลัก เนื่องจากทั้งสองส่วนรองรับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบวงแหวนขดลวดเหนียวนำโดยตรง ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนียวนำไปสู่ฐานมอเตอร์และการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ จะใช้แบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำกับฐานมอเตอร์และชุดโรเตอร์ในการอธิบายถึงแรงภายในที่ส่งผ่านมาสู่พื้นผิวภายนอกของมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวโครงสร้างด้านนอก และเหนียวนำให้เกิดการแพร่ของเสียงต่อไป



รูปที่ 3.2 แบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายของชุดโรเตอร์

แบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายของชุดโรเตอร์แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงวางซ้อนกัน 3 ชั้น โดยชั้นบนสุดเป็นชั้นที่ถูกยึดเข้ากับเพลลาของ FDB ด้วยวัสดุประเภทอีพ็อกซี สำหรับชั้นกลางออกแบบไว้เพื่อรองรับจานดิสก์ซึ่งใช้ในการบรรจุข้อมูลต่างๆ และในชั้นล่างสุดเป็นชั้นที่ถูกยึดติดเข้ากับแม่เหล็กถาวร ซึ่งจะเหนียวนำกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบวงแหวนขดลวดเหนียวนำเพื่อให้ชุดโรเตอร์หมุน การสั่นสะเทือนของชุดโรเตอร์เริ่มขึ้นเมื่อตัวขับ (Driver) จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสปินเดิลมอเตอร์เพื่อใช้สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เกิดขึ้นรอบวงแหวนขดลวดเหนียวนำ ที่ชั้นล่างสุดของชุดโรเตอร์จะรองรับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งแรงแม่เหล็กไฟฟ้านี้เกิดขึ้นทั้งในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมและแนวรัศมี โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมเป็นแรงที่ทำให้เกิดแรงบิด (Torsion) ผลักดันให้ชุดโรเตอร์เคลื่อนที่ และแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวรัศมีที่กระทำกับชั้นล่างสุดของชุดโรเตอร์ เป็นแรงที่ทำให้ชุดโรเตอร์เกิดโมเมนต์ดัด (Bending moment) เนื่องจากชั้นบนสุดถูกยึดไว้ด้วยเพลลาของ FDB ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นที่พื้นผิวของชุดโรเตอร์ทั้งในทิศทาง

Transverse และตามแนวรัศมี และแพร่ไปสู่เสียงต่อไป ดังนั้นการวัดการสั่นสะเทือนของชุดโรเตอร์ในทิศทาง Transverse และตามแนวรัศมี จึงเหมาะสมสำหรับการนำผลตอบสนองการสั่นสะเทือนไปศึกษาถึงลักษณะความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นสะเทือนของชุดโรเตอร์ต่อไป สำหรับการสั่นสะเทือนสูงสุดของชุดโรเตอร์นั้นจะเกิดขึ้นที่ชั้นล่างสุด เนื่องจากเป็นชั้นที่รองรับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเสียรูปของโครงสร้างมากที่สุดอีกด้วย

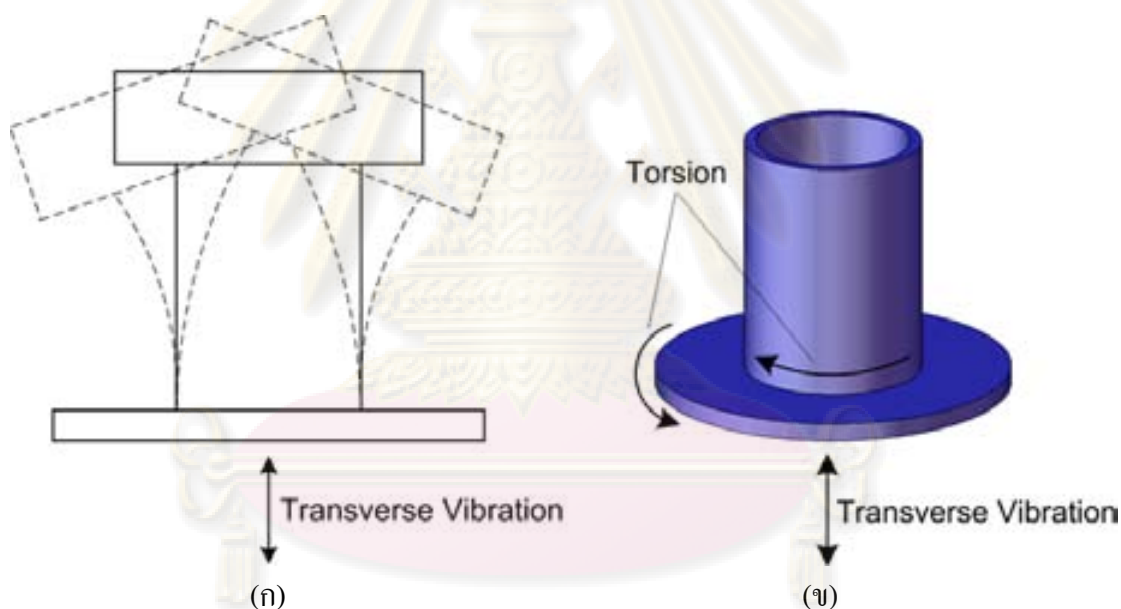


รูปที่ 3.3 แบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์

ในส่วนของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปสู่ฐานมอเตอร์ สามารถพิจารณาการส่งผ่านการสั่นสะเทือนนี้ด้วยแบบจำลองเชิงกายภาพอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยกำหนดให้วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำนั้นมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง และฐานมอเตอร์นั้นเป็นทรงกระบอกกลวงที่มีลักษณะเป็นเปลือกบาง (Thick shell) ยึดติดกับฐานซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมบางๆ ที่มีรูเจาะภายในเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทรงกระบอกกลวง วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำถูกประกอบเข้ากับฐานมอเตอร์โดยการกดอัด ทำให้เกิด Interference fit ที่บริเวณผิวสัมผัสของทั้งสอง ในขณะที่เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสปินเดิลมอเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เกิดขึ้นรอบวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ส่งผลให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำกับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำทั้งในทิศทางแนวรัศมีและแนวเส้นสัมผัสวงกลม โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมเป็นแรงที่ทำให้เกิดแรงบิดกระทำกับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ

แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวรัศมีดังในรูปที่ 3.3 นั้นส่งผ่านไปยังฐานมอเตอร์โดยตรงและเป็นแรงที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดกระทำกับฐานมอเตอร์ ซึ่งส่งผลให้การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่พื้นผิวด้านนอกของฐานมอเตอร์ในทิศทาง Transverse ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) ในส่วน

ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมที่เกิดขึ้นรอบวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ จะส่งผ่านไปยังฐานมอเตอร์ผ่านบริเวณผิวสัมผัสที่มีการ Interference fit เกิดขึ้นในลักษณะของ แรงบิดดังในรูปที่ 3.3 และส่งผ่านแรงบิดไปที่ฐานด้านล่าง และถูกต้านด้วยแรงบิดภายนอกที่เกิดขึ้น จากการต้านการเคลื่อนที่ของฐานมอเตอร์ เป็นผลให้เกิดปรากฏการณ์ของ Torsional buckling [13] ส่งผลให้พื้นผิวด้านนอกของฐานมอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนในทิศทาง Transverse แสดงในรูปที่ 3.4 (ข) เนื่องจากที่ฐานมอเตอร์นั้นมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมบาง การสั่นสะเทือนที่พื้นผิวของฐาน มอเตอร์จากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองทิศทางนี้จะมีลักษณะการเคลื่อนตัวแบบคลื่น ซึ่งจะเหนี่ยวนำ ให้เกิดการแพร่ของเสียงออกจากฐานมอเตอร์ต่อไป ดังนั้นการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นใน ทิศทาง Transverse จึงเหมาะสมกับการศึกษาลักษณะความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นสะเทือนที่ ฐานมอเตอร์ และยังรวมไปถึงการแพร่ของเสียงอีกด้วย



รูปที่ 3.4 การส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปสู่ฐานมอเตอร์ในลักษณะของ (ก) โมเมนต์ตัด (ข) แรงบิด

จากการวิเคราะห์การส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆของสปีนเดลมอเตอร์ ดังที่ได้กล่าวมานั้น พบว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นหลัก ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่นำไปสู่การแพร่ของเสียง จะต้องมีการ ออกแบบการทดสอบการสั่นสะเทือนให้ใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริง เพื่อที่จะสามารถ ทำนายพฤติกรรมของการเกิดเสียงในสปีนเดลมอเตอร์ได้ถูกต้อง โดยในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการ ออกแบบการทดสอบสั่นสะเทือนแบบ โมดอลด้วยวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมกับสปีนเดลมอเตอร์ สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

3.2 การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า

การทดสอบแบบ โมดอล คือการทดสอบการสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่มีการสั่นมาจากการกระตุ้นด้วยภาระที่นอกเหนือไปจากสภาวะการทำงานปกติ โดยสามารถควบคุมเงื่อนไขที่ต้องการศึกษาให้มีความใกล้เคียงตามทฤษฎีและรายละเอียดต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของโครงสร้างขึ้นทดสอบจะอยู่ในรูปของผลตอบสนองการสั่นสะเทือนเชิงความถี่หรือเชิงเวลา สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ การกระตุ้นให้โครงสร้างเกิดการสั่นสะเทือนนั้นทำได้หลายวิธี แต่ในที่นี้จะนำเสนอวิธีที่กระทำได้ง่ายและสะดวก และเห็นผลตอบสนองการสั่นสะเทือนได้อย่างชัดเจน คือ การกระตุ้นทางกล (Mechanical excitation) และการกระตุ้นทางไฟฟ้า (Electrical excitation)

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบแบบ โมดอล

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบแบบโมดอล โดยการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า ประกอบไปด้วย

1. Laser doppler vibrometer (LDV) คือ ทรานส์ดิวเซอร์ประเภทเลเซอร์ที่สามารถตรวจจับการสั่นสะเทือนในช่วงเวลาที่บริเวณพื้นผิวของ โครงสร้าง ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดนี้มาจากแก๊สฮีเลียม นีออน ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 633 nm และทำงานที่ความถี่ประมาณ 4.7×10^{14} kHz กำลังของแสงเลเซอร์น้อยกว่า 1 mW สามารถวัดการสั่นสะเทือนได้ในรูปสัญญาณแบบระยะขจัดและแบบความเร็ว ในที่นี้จะเลือกใช้การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร็ว โดยช่วงของการวัดขึ้นอยู่กับค่า Resolution ที่เลือกใช้ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1-50 mm/s/V และช่วงความถี่ของการวัดตั้งแต่ 0-350 kHz ความเร็วที่สามารถวัดได้มีค่าตั้งแต่ 0.01-0.5 m/s

2. ทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่ง (Accelerometer) ที่นำมาใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนในรูปแบบของความเร่งเป็นของ B&K DeltaTron รุ่น 4397A ซึ่งมีค่า Sensitivity เท่ากับ 9.63 mV/g โดยช่วงความถี่สำหรับการวัดการสั่นสะเทือนจะอยู่ที่ 1 Hz-25 kHz มีค่า Mounting resonance frequency และ Transverse resonance frequency เท่ากับ 53 kHz และ 17 kHz ตามลำดับ

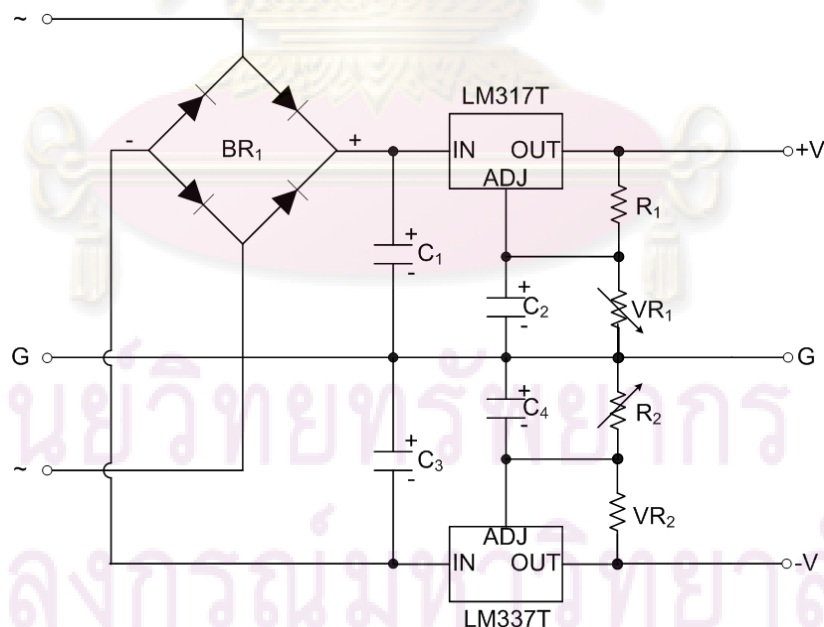
3. โพรบวัดกระแสไฟฟ้า (Current probe) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสปินเดิลมอเตอร์ บริเวณด้านปลายของโพรบมีลักษณะเป็นห่วง ใช้สำหรับคล้องสายไฟที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โครงสร้างภายในของห่วงเป็นคอยล์ซึ่งได้รับการเหนี่ยวนำจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่มีรูปคลื่นเหมือนกับกระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัด โพรบวัดกระแสไฟฟ้าที่นำมาใช้นี้เป็นของ LEM รุ่น PR 30 โดยที่ค่า Sensitivity สำหรับการแปลง

แรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 100 mV/A และช่วงของกระแสที่สามารถวัดได้อยู่ระหว่าง -30 A ถึง 30 A วัดได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่มีความถี่สูงสุดถึง 100 kHz

4. ค้อนเคาะและเครื่องขยายสัญญาณ (Impact hammer and signal conditioner) เป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการกระตุ้นให้โครงสร้างเกิดการสั่นสะเทือน ค้อนเคาะเป็นของ PCB Piezotronics รุ่น 086D80 มีค่า Sensitivity เท่ากับ 21.9 mV/N ช่วงของการวัดอยู่ระหว่าง -220 N ถึง 220 N และช่วงความถี่ของการวัดสูงสุดมีค่าไม่เกิน 20 kHz ในส่วนของเครื่องขยายสัญญาณที่ใช้เป็นรุ่น 482A21 จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการกระตุ้นให้กับค้อนเคาะที่ 25-27 V และมีกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 2-20 mA อัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 1 ต่อ 1

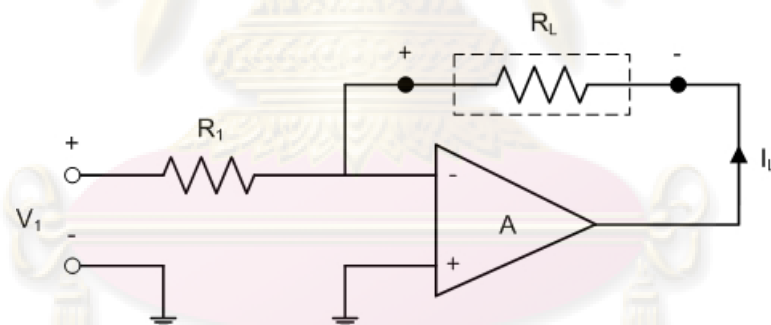
5. ชุดขยายสัญญาณ (Power amplifier) เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับมาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณเป็นกระแสไฟฟ้าและจ่ายไฟที่มีแรงดันคงที่เพื่อรักษาระดับของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นให้กับสปินเดิลมอเตอร์ให้คงที่ด้วยเช่นกัน โดยชุดขยายสัญญาณนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

- หม้อแปลงไฟฟ้า ทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายขนาด 220 V ให้อยู่ในระดับที่ต้องการใช้งาน ซึ่งในชุดขยายสัญญาณนี้จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 3 A และแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ที่ 31 V เพื่อจ่ายให้กับวงจรไอซีเรกูเลเตอร์



รูปที่ 3.5 วงจรไอซีเรกูเลเตอร์

- วงจรไอซีเรกูเลเตอร์ ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าให้คงที่ เพื่อจ่ายให้กับวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสไฟฟ้าต่อไป ซึ่งวงจรไอซีเรกูเลเตอร์นี้จะประกอบไปด้วย วงจรแรงดันบวกและวงจรแรงดันลบสามารถปรับค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยวงจรแรงดันบวกใช้ไอซีเรกูเลเตอร์รหัส LM317T ซึ่งใช้สำหรับย่านแรงดันอินพุตไม่เกิน 40 V มีแรงดันเอาต์พุตปรับค่าได้ตั้งแต่ 1.25-30 V และกระแสเอาต์พุตเท่ากับ 1 A โดยแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านไดโอดบริดจ์จะถูกแปลงจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงและผ่านคาปาซิเตอร์ C_1 ทำหน้าที่กรองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้เรียบ จากนั้นก็เข้าขา IN ของไอซีเรกูเลเตอร์และได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามแรงดันของไอซีเรกูเลเตอร์ที่เลือกใช้ สำหรับวงจรแรงดันลบใช้ไอซีเรกูเลเตอร์รหัส LM337T ซึ่งใช้สำหรับย่านแรงดันอินพุตไม่เกิน -38 V มีแรงดันเอาต์พุตปรับค่าได้ตั้งแต่ -1.2 V ถึง -37 V และกระแสเอาต์พุตเท่ากับ 1.5 A หลักการทำงานเหมือนกับวงจรแรงดันบวกซึ่งแรงดันเอาต์พุตของทั้งสองจะส่งต่อไปยังวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสไฟฟ้าต่อไป



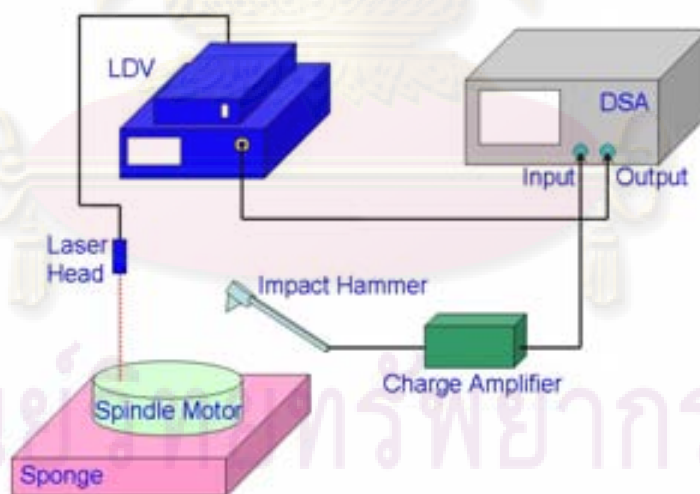
รูปที่ 3.6 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสไฟฟ้า

- วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสไฟฟ้า ในวงจรนี้จะรับแรงดันไฟฟ้าที่มาจากวงจรไอซีเรกูเลเตอร์และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า มาแปลงให้เป็นกระแสไฟฟ้าที่มีสัญญาณคงที่เพื่อจ่ายให้กับสปินเดิลมอเตอร์ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นวงจรหลักของการแปลงแรงดันเป็นกระแสไฟฟ้า และจะมีส่วนประกอบอื่นๆเพื่อช่วยให้วงจรมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น โดยค่าความต้านทาน R_1 ที่ใช้ในวงจรนี้จะมีค่าเท่ากับ 5Ω และออปแอมป์ที่ใช้จะเป็นรหัส STK4028 II ซึ่งอัตราส่วนของการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1:5

6. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณทางพลศาสตร์ (Dynamic signal analyser, DSA) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณจากอินพุตและเอาต์พุตนำมาประมวลผลด้วยวิธีการของ Fast fourier transform และแสดงผลตอบสนองที่ได้จากการวัด สามารถแสดงผลได้หลายรูปแบบ เช่น ผลตอบสนองเชิงความถี่ ผลตอบสนองเชิงเวลา เป็นต้น DSA ที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้เป็นของ Agilent รุ่น 35670A โดยช่วงความถี่ของการวิเคราะห์สัญญาณจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 Hz-51.2 kHz สำหรับการใช้งาน 2 ช่องสัญญาณ และความละเอียดของผลการวัดจะขึ้นอยู่กับค่า Resolution ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 100-1600 lines

7. ฟองน้ำ (Sponge) ในการทดสอบนี้จะใช้ฟองน้ำเป็นตัวรองรับสปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งฟองน้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับแบบอิสระ ในเงื่อนไขนี้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์จะแสดงให้เห็นโหมดวัตถุแข็งเกร็งของโครงสร้างแต่เพียงอย่างเดียว จะไม่มีโหมดของโต๊ะสำหรับการวัดการสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยฟองน้ำที่ใช้ในการทดสอบควรจะมีคุณสมบัตินุ่ม ไม่ควรแข็งมากนัก เพราะจะทำให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนมีผลตอบสนองของฟองน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

3.2.2 การกระตุ้นทางกล (Mechanical excitation)



รูปที่ 3.7 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบโดยการกระตุ้นทางกล

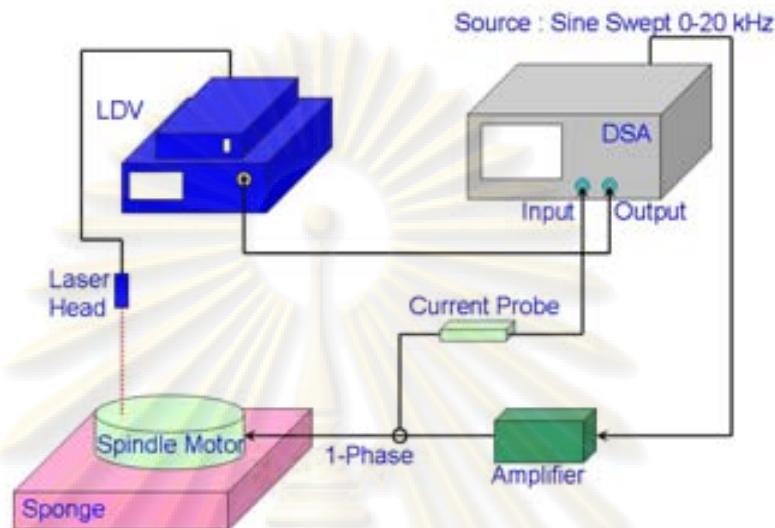
การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะนี้จะใช้ LDV เป็นเครื่องมือหลักในการวัดการสั่นสะเทือน การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเป็นดังรูปที่ 3.7 การทดสอบเริ่มจากการกระตุ้นโครงสร้างให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยค้อนเคาะ ซึ่งเป็นการจ่ายแรงกระทำกับ

โครงสร้างโดยตรง สัญญาณของแรงที่เกิดจากการเคาะวัดได้จากทรานส์ดิวเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณหน้าสัมผัสของค้อนเคาะและส่งสัญญาณไปที่เครื่องขยายสัญญาณ แปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าและส่งไปยัง DSA ซึ่งก็คืออินพุตของระบบ ในส่วนของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นของสปริงเดลิโมเตอร์สามารถวัดได้โดยแสงเลเซอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของสปริงเดลิโมเตอร์ การสั่นของพื้นผิวนี้อาจทำให้แสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับไปยังหัวเซ็นเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงระยะโฟกัสเกิดขึ้น และเซ็นเซอร์จะวัดการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งสัญญาณไปที่ Vibrometer controller เพื่อแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบระยะจัดหรือแบบความเร็ว เพื่อส่งต่อไปยัง DSA ในรูปของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งก็คือเอาต์พุตของระบบ และ DSA ทำการประมวลผลเพื่อหาผลตอบสนองการสั่นสะเทือนต่อไป

ข้อควรระวังในการทดสอบเพื่อให้ได้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ดีที่สุดนั้น การติดตั้งอุปกรณ์การวัดและการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องมือวัด เช่น ช่วงความถี่ของการวัด ระดับสัญญาณของอินพุตและเอาต์พุต ฯลฯ ให้เหมาะสมกับการวัดมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมกับสัญญาณจะทำให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนมีสัญญาณรบกวนเยอะและอาจทำให้ไม่พบโหมดของการสั่นสะเทือนที่สำคัญได้ การปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับ LDV และ DSA จะแสดงในภาคผนวก ข และสำหรับการเคาะในแต่ละครั้ง ไม่ควรออกแรงมากเกินไปเพราะจะทำให้มอเตอร์ทดสอบเกิดการขยับตัวส่งผลให้ตำแหน่งที่ทำการวัดคลาดเคลื่อน ทำให้แถบสัญญาณไฟที่แสดงอยู่บนเครื่อง Differential fiber optical sensor (DFOS) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชุด LDV จะลดต่ำลง และผลการวัดจะเกิด Overload ดังนั้นควรเคาะให้มีลักษณะเป็นการจุ่มพัลส์ให้กับระบบ ซึ่งจะทำให้ผลการวัดออกมาดี ไม่มีสัญญาณรบกวน และไม่ควรถูกเคาะใกล้กับตำแหน่งที่ทำการวัดมากนัก เพราะทำให้สัญญาณที่วัดได้ผิดเพี้ยน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3 การกระตุ้นทางไฟฟ้า (Electrical excitation)



รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า

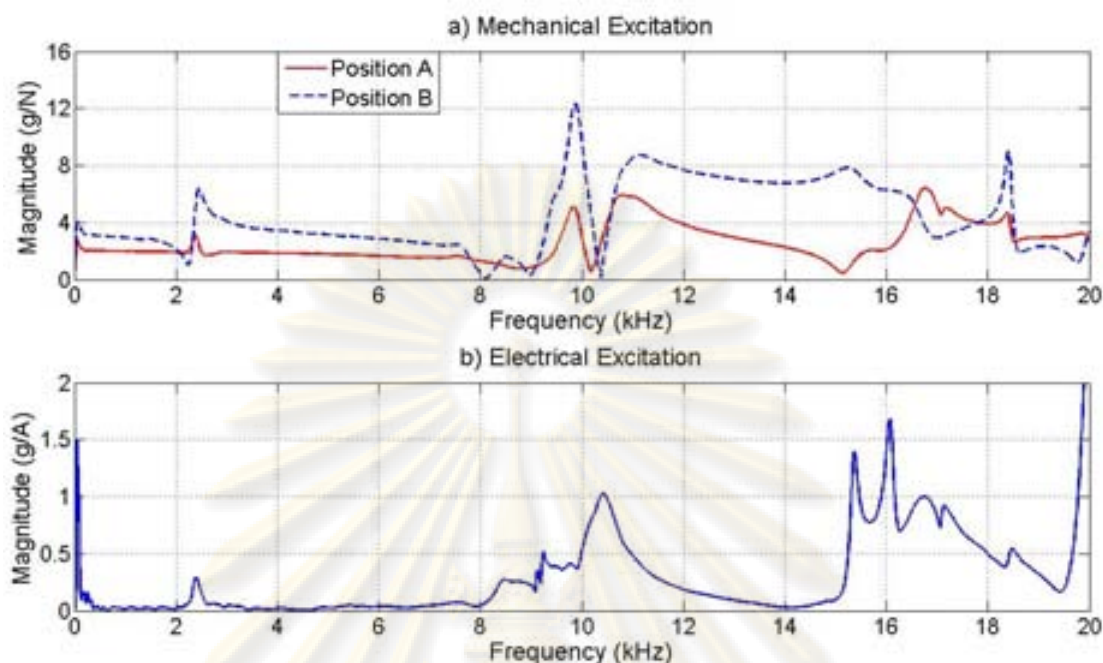
การทดสอบแบบ โมดอลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้ LDV ในการวัดการสั่นสะเทือน การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเป็นดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจะแตกต่างกับการกระตุ้นทางกล โดยจะมีโพรบวัดกระแสและชุดขยายสัญญาณมาแทนที่ค้อนเคาะและเครื่องขยายสัญญาณ ในการทดลองนี้ DSA ทำหน้าที่ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกทำหน้าที่ประมวลผลจากสัญญาณที่ได้รับจากการวัด และส่วนที่สองทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบคลื่นไซน์ซอซอดลแบบปรับเปลี่ยนความถี่ให้กับสปินเดิลมอเตอร์ในช่วงความถี่ 0-20 kHz การทดลองเริ่มจาก DSA จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดขยายสัญญาณซึ่งทำหน้าที่รักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าให้คงที่และราบเรียบโดยอาศัยวงจรโอซีเรกูเลเตอร์ และส่งแรงดันไฟฟ้าไปยังวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ออกจากชุดขยายสัญญาณนี้จะจ่ายให้กับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำของสปินเดิลมอเตอร์เพียงหนึ่งเฟส โรเตอร์จะไม่หมุนเนื่องจากไม่มีแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เพียงพอในการผลักดันให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ ทำการวัดกระแสไฟฟ้าก่อนเข้าสู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำโดยโพรบวัดกระแสไฟฟ้า สัญญาณที่วัดออกมาจะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าและส่งไปยัง DSA ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตของระบบที่ใช้ในการกระตุ้นการสั่นสะเทือน เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เกิดขึ้นรอบๆวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งในแนว Radial และ Tangential จะเป็นตัวกระตุ้นให้วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและโรเตอร์เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ส่วนประกอบภายใน

ของสปินเดิลมอเตอร์จะส่งผ่านมาสู่พื้นผิวด้านนอกของโครงสร้างมอเตอร์ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้โดยแสงเลเซอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของสปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกันกับการวัดการสั่นสะเทือนด้วยการกระตุ้นทางกล สัญญาณที่ได้จาก LDV จะส่งไปยังช่องสัญญาณที่ 2 ของ DSA ซึ่งเป็นเอาต์พุตของระบบและทำการประมวลผลตอบสนองการสั่นสะเทือนต่อไป

ในการติดตั้งและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการวัดการสั่นสะเทือนของ LDV จะเหมือนกับ การกระตุ้นทางกลทุกประการ แต่การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ DSA จะแตกต่างกัน ซึ่งรายละเอียดจะแสดงในภาคผนวก ข ข้อควรระวังสำหรับการทดสอบแบบ โมดอลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าคือ ต้องพิจารณาระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นให้ให้เหมาะสม เนื่องจากถ้าจ่าย กระแสไฟฟ้าในระดับที่สูงเกินกว่าอัตราสูงสุดที่สามารถรับได้ของมอเตอร์ จะส่งผลให้วงแหวน ขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการอิ่มตัวและมีสถานะเป็นแม่เหล็กถาวรได้ ดังนั้นในการทดสอบจะทำการ จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสปินเดิลมอเตอร์ไม่เกิน 50% ของอัตราสูงสุดที่มอเตอร์สามารถรับได้ จาก การนำเสนอวิธีการกระตุ้นการสั่นสะเทือนที่ผ่านมาจะเห็นว่า การทดสอบการสั่นสะเทือนโดยการ กระตุ้นทาง ไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็ก ไฟฟ้านั้นมีการทดสอบค่อนข้างสะดวกกว่าการกระตุ้นทางกล ด้วยค้อนเคาะ เนื่องจากไม่ต้องใช้ค้อนเคาะเพื่อให้ได้ลักษณะของการจ่ายอิมพัลส์ให้กับระบบ แต่ ข้อเสียคือใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานในการทดสอบแต่ละครั้ง ซึ่งระยะเวลาจะขึ้นอยู่กับ การเลือกค่า ความละเอียดของผลการทดสอบที่ได้จากการวัดนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองการ สั่นสะเทือน

3.2.4 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า

สำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นทางกลเปรียบเทียบกับ การกระตุ้น ทางไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.9 เป็นผลตอบสนองการสั่นสะเทือนพื้นฐานของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง ที่ใช้สำหรับฮาร์ดดิสก์ที่มีขนาดของจานดิสก์ 3.5" หมุนที่ความเร็วรอบ 7200 rpm มีจำนวนของ ขั้วแม่เหล็กและช่องว่างของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเท่ากับ 12 และ 9 ตามลำดับ เป็นสปินเดิล มอเตอร์แบบสมมาตร ทำการวัดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเดียวกันด้วยทรานส์ดิวเซอร์แบบวัด ความเร่ง โดยที่ตำแหน่ง A คือตำแหน่งที่ใช้ค้อนเคาะ ใกล้กับบริเวณแกนกลางของฐานมอเตอร์ และ ตำแหน่ง B คือตำแหน่งที่ใช้ค้อนเคาะใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์ โหมดการสั่นสะเทือน สามารถระบุได้ทีความถี่ที่มีขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดปรากฏ ซึ่งมอเตอร์ที่นำมาทดสอบพบว่ามี โหมดการสั่นสะเทือนจำนวนมากในช่วงความถี่ที่ได้ยินและบางโหมดปรากฏใกล้กันและ ไม่ สามารถแยกได้ชัดเจน



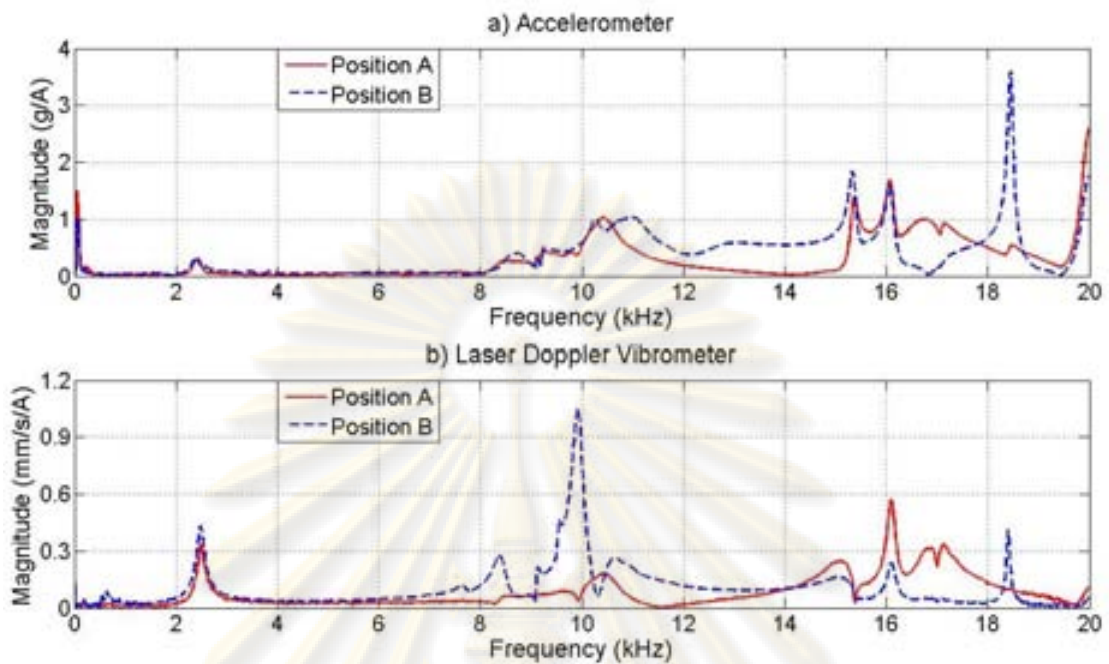
รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของการกระตุ้นทางกลเปรียบเทียบกับกระตุ้นทางไฟฟ้า

จากผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปที่ 3.9 ลักษณะของโหนดการสั่นสะเทือนที่พบจะสังเกตได้จากบริเวณที่มียอดแหลมปรากฏขึ้นในผลตอบสนองเชิงความถี่ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับมุมเฟสที่ได้จากผลตอบสนองเชิงความถี่เช่นกัน ซึ่งตำแหน่งที่มีโหนดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นนั้นมุมเฟสจะมีการเปลี่ยนเฟส 180 องศา สำหรับการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนกับมุมเฟสที่ได้จากผลตอบสนองเชิงความถี่และสเปกตรัมของแรงที่ใช้ในการกระตุ้นทั้งสองแบบนี้แสดงในภาคผนวก ก จากการสังเกตผลตอบสนองเชิงความถี่ของการกระตุ้นทางกล พบว่าการกระตุ้นทางกลโดยใช้ค้อนเคาะที่ตำแหน่งต่างกัน ในช่วงความถี่ 2-12 kHz จะพบลักษณะของโหนดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่จะไม่พบบางโหนดอย่างชัดเจนในช่วงความถี่ 15-20 kHz หากเคาะบริเวณขอบนอกของฐาน สำหรับการกระตุ้นทางกลโดยใช้ค้อนเคาะนั้น ลักษณะโหนดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างมอเตอร์ที่ปรากฏจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการเคาะเป็นสำคัญ กล่าวคือ การเคาะที่บริเวณใกล้กับแกนกลางของฐานมอเตอร์จะให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโหนดการสั่นสะเทือนปรากฏชัดเจนกว่าเมื่อเทียบกับการเคาะที่ขอบนอก ในส่วนของการกระตุ้นทางไฟฟ้าจะเห็นว่าในช่วงความถี่ต่ำ จะพบโหนดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 2.4 kHz ซึ่งตรงกับโหนดที่พบจากการกระตุ้นทางกล และในช่วงความถี่ 7-12 kHz ก็ยังคงพบโหนดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในบริเวณเดียวกันหลายโหนด และในช่วงความถี่ 15-20 kHz จะพบโหนดการสั่นสะเทือนหลายโหนดได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกระตุ้นทางกล และเมื่อเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่พบจากการวัดการสั่นสะเทือนที่ฐานมอเตอร์จากการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า ใน

ส่วนของการกระตุ้นทางกลจะเห็นว่าในช่วงความถี่ 7-20 kHz จะไม่พบโหมดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 7.7, 9.55, 15.06 และ 16.1 kHz อย่างชัดเจนเหมือนกรณีการกระตุ้นทางไฟฟ้า และค่าความถี่ธรรมชาติในบางโหมดอาจจะมีการเลื่อนตำแหน่งไปบ้างเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการกระตุ้นทางไฟฟ้า เพราะฉะนั้นการทดสอบการสั่นสะเทือน โดยวิธีการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจึงน่าจะเหมาะสมกับสปีนเดลมอเตอร์มากกว่าการทดสอบโดยการกระตุ้นทางกล เนื่องจากให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เด่นชัดและจำนวนโหมดที่พบมีความสมบูรณ์มากกว่าการกระตุ้นทางกล การกระตุ้นทางไฟฟ้ายังมีข้อดีคือสามารถควบคุมแรงแม่เหล็กได้คงที่ผ่านการจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนซ้ำรูปแบบเดิมทุกครั้งที่ทำกรทดสอบ นอกจากนี้ลักษณะแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการจ่ายกระแสเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กยังมีลักษณะคล้ายคลึงกับปรากฏการณ์การเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอเตอร์ทำงาน กล่าวคือแรงดังกล่าวกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนบริเวณแกนขดลวดและโรเตอร์ภายในมอเตอร์ และการสั่นสะเทือนจะส่งผ่านมาสู่ผิวนอกผ่านโครงสร้างมอเตอร์ และแพร่ไปสู่เสียงในที่สุด ซึ่งจะต่างจากการกระตุ้นทางกลที่เป็นการกระตุ้นการสั่นสะเทือนที่ภายนอกโดยตรง ดังนั้นการกระตุ้นทางไฟฟ้าจึงน่าจะเหมาะสมสำหรับการนำไปศึกษาการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงต่อไป

3.2.5 การเลือกใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมกับมอเตอร์ขนาดเล็กในช่วงความถี่ที่ได้ยินได้

การทดสอบแบบโมดอลด้วยวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกันดังที่ได้กล่าวมานั้น พบว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเลือกวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมจะส่งผลให้ผลตอบสนองเชิงความถี่มีลักษณะของโหมดที่มียอดแหลมอย่างเด่นชัด และพบจำนวนโหมดของการสั่นสะเทือนครบถ้วนในช่วงความถี่ที่สนใจ แต่จากการศึกษาพบว่ายังมีส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากอีกเช่นกัน นั่นคือการเลือกใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน เนื่องจากการเลือกใช้เครื่องมือวัดที่ไม่เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่ต้องการศึกษา จะส่งผลให้ลักษณะของโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นไม่เด่นชัดเท่าที่ควร ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ถูกต้องและแม่นยำในช่วงความถี่ 0-20 kHz จึงมีการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่จากการใช้เครื่องมือวัดที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.10 สำหรับการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนกับมูมเฟสที่ได้จากผลตอบสนองเชิงความถี่นั้นจะแสดงในภาคผนวก ก



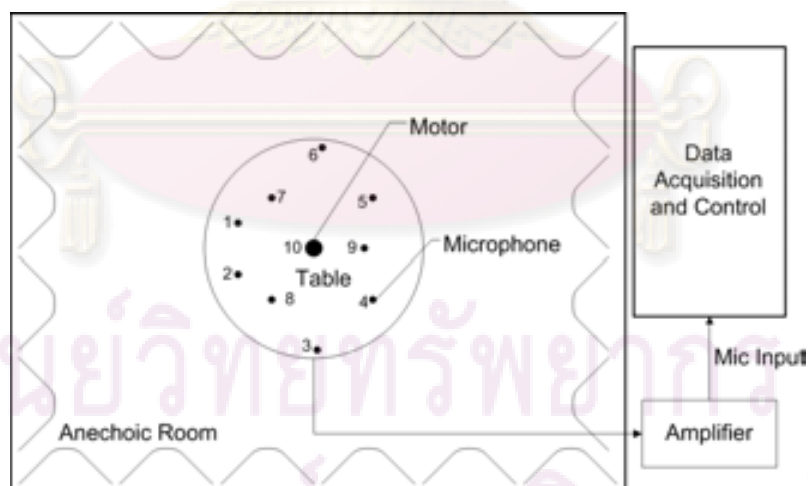
รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่งเปรียบเทียบกับ LDV

จากรูปที่ 3.10 เป็นผลมาจากการทดสอบสปีดโมเตอร์ตัวอย่างโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า โดยที่เครื่องมือที่ใช้ในการวัดคือทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่งและ LDV ผลตอบสนองดังกล่าวมาจากการวัดการสั่นสะเทือนที่ฐานมอเตอร์เปรียบเทียบกันสองตำแหน่ง โดยที่ตำแหน่ง A และ B เป็นตำแหน่งที่วัดการสั่นสะเทือนที่ใกล้กับแกนกลางและที่ใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์ตามลำดับ จากรูปที่ 3.10 พบว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนด้วยทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่งและ LDV จะให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโหมดการสั่นสะเทือนปรากฏได้ครบถ้วนในช่วงความถี่ 0-20 kHz ใดไม่ต่างกัน แต่เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์นั้นเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและชุดโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นกับทั้งสองส่วน และจะส่งผ่านไปสู่ฐานมอเตอร์และโรเตอร์ที่ผิวนอกของมอเตอร์และแพร่ไปสู่เสียงต่อไป การศึกษาการแพร่ของเสียงจึงต้องพิจารณาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นทั้งที่ฐานมอเตอร์ในทิศทาง Transverse และที่ชุดโรเตอร์ในทิศทาง Transverse และในทิศทางตามแนวรัศมี ซึ่งลักษณะการสั่นสะเทือนดังกล่าวจะมีผลต่อการแพร่เสียงมากกว่าการสั่นสะเทือนในแนวอื่นๆ เมื่อพิจารณาประเด็นของการวัดการสั่นสะเทือนในหลายทิศทางและหลายตำแหน่งบนโครงสร้างมอเตอร์จะพบว่า LDV สามารถวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์ได้ทุกตำแหน่งและทิศทาง โดยที่เครื่องมือวัดไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานโดยตรง ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่ง เนื่องจากมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับสปีดโมเตอร์ที่มีขนาดเล็กและจะต้องติดตั้งบนตัวชิ้นงานโดยตรง ทำให้ไม่สามารถวัดการสั่นสะเทือนของชิ้นงาน

ในบริเวณที่มีรูปทรงสลับซับซ้อนได้ ดังนั้นการเลือกใช้ LDV จึงเหมาะสมกับการวัดการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์ในช่วงความถี่ 0-20 kHz

3.3 การวัดเสียงที่แพร่ออกจากสปินเดิลมอเตอร์ในขณะทำงาน

ในการศึกษาการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการแพร่ของเสียง จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่กับสเปกตรัมเสียงที่ได้จากการวัดในขณะที่มีมอเตอร์หมุน ซึ่งการวัดเสียงที่นิยมใช้ในทางวิทยาศาสตร์นั้นมีสองแบบคือ วิธีการวัดโดยตรง และวิธีการวัดแบบสัมผัส ซึ่งวิธีการวัดโดยตรงจะเป็นการวัดหาค่าระดับของเสียงที่หาได้จากค่าที่วัดทางกายภาพโดยตรง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ช่วงเวลา ฯลฯ เป็นต้น ส่วนวิธีการวัดแบบสัมผัสนั้นจะเป็นการวัดค่าต่างๆ โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับค่าของแหล่งกำเนิดเสียงอ้างอิงที่มีระดับกำลังของเสียงตามที่กำหนดให้ ในการศึกษาจะเน้นไปที่วิธีการวัดแบบสัมผัส โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่ 4 ตัว คือ ระดับความดันเสียง (Sound pressure level) ระดับความเร็วเสียง (Sound velocity level) ระดับความเข้มเสียง (Sound intensity level) และระดับกำลังเสียง (Sound power level) ซึ่งค่าระดับความดันเสียงและระดับกำลังเสียงนี้เป็นพารามิเตอร์หลักที่นำมาใช้ในการพิจารณาถึงเสียงที่แพร่ออกจากสปินเดิลมอเตอร์



รูปที่ 3.11 การวัดเสียงที่แพร่ออกจากสปินเดิลมอเตอร์ภายในห้องไร้เสียงสะท้อน

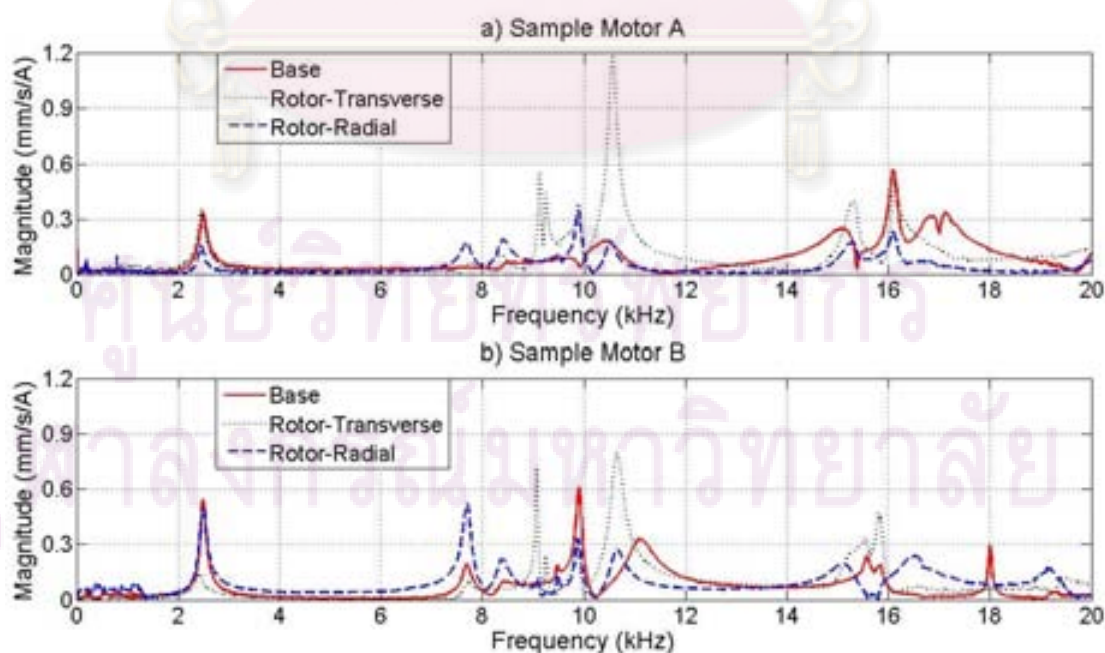
การวัดเสียงที่แพร่ออกจากสปินเดิลมอเตอร์ในขณะที่มีมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 7200 rpm ทำโดยให้สปินเดิลมอเตอร์วางบนจตุรกรงรับซึ่งมีลักษณะเป็นเชือกสองเส้นพาดทับกันตั้งอยู่บนโต๊ะภายในห้องไร้เสียงสะท้อน (Anechoic room) มอเตอร์จะถูกขับด้วยแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายมาจากตัวขับ

(Driver) เพื่อรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ วัดเสียงที่แพร่กระจายจากการหมุนของมอเตอร์ด้วยไมโครโฟนที่ตั้งอยู่ในแต่ละตำแหน่งตามลักษณะของครึ่งทรงกลม เรียกการวัดนี้ว่า Hemispherical measurement [14] โดยที่ไมโครโฟนทุกตัวมีระยะห่างจากปลายของไมโครโฟนถึงพื้นผิวของมอเตอร์เป็นระยะทางเท่ากันทุกตัวคือ 0.3 m ทั้งหมด 10 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.11 สัญญาณเสียงที่วัดได้จากไมโครโฟนแต่ละตัวจะส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) และสัญญาณหลังจากการขยายจะส่งต่อไปยัง Data acquisition and control ซึ่งในส่วนนี้จะทำการประมวลผลและคำนวณค่าต่างๆที่ได้จากการวัด เช่น ค่าระดับกำลังเสียง ค่าระดับความดันเสียง เป็นต้น จากรูปที่ 3.11 ในแต่ละตำแหน่งของไมโครโฟนนั้นเป็นไปตามพิกัด X, Y, Z โดยรายละเอียดของการวัดเสียงเพิ่มเติมศึกษาได้จากมาตรฐาน ISO 3745

3.4 ลักษณะความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์

3.4.1 โหมดการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองการสั่นสะเทือนจากการทดลองของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง 2 ตัว คือ มอเตอร์ตัวอย่าง A และ B เป็นมอเตอร์ที่มีลักษณะรูปร่างเหมือนกัน ซึ่งใช้ในฮาร์ดดิสก์ที่มีขนาดของจานดิสก์ 3.5" ทั่วไป หมุนที่ความเร็วรอบ 7200 rpm



รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง

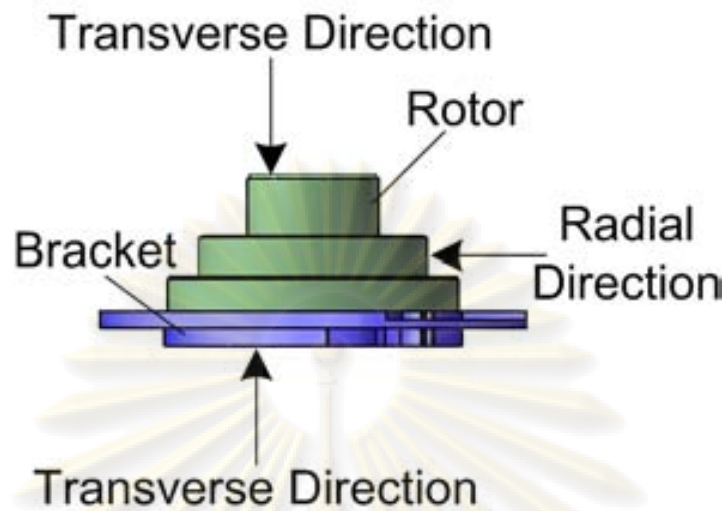
สปินเดิลมอเตอร์ที่นำมาทดสอบนี้มีจำนวนของขั้วแม่เหล็กและช่องว่างของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเท่ากับ 12 และ 9 ตามลำดับซึ่งเป็นสปินเดิลมอเตอร์ที่มีจำนวนของขั้วแม่เหล็กและช่องว่างของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำแบบสมมาตร ทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยการกระตุ้นทางไฟฟ้า โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 500 mV แบบปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 0-20 kHz ให้กับสปินเดิลมอเตอร์ 1 เฟสและใช้ LDV ในการวัดการสั่นสะเทือน จากรูปที่ 3.12 เป็นการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่พื้นฐานมอเตอร์และชุดโรเตอร์ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างทั้ง 2 ตัว พบว่าตำแหน่งที่มียอดแหลมเกิดขึ้นนั้นคือ โหมดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างมอเตอร์ ซึ่งยอดแหลมนี้มีอยู่อย่างหนาแน่นในช่วงความถี่ตั้งแต่ 7 kHz เป็นต้นไป โหมดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ตัวอย่างทั้งสองตัวที่พบในผลตอบสนองเชิงความถี่ทุกตำแหน่งและทุกทิศทางของการวัดแสดงในตารางที่ 3.1 สามารถแบ่งกลุ่มของโหมดการสั่นสะเทือนออกได้เป็น 3 กลุ่ม โดยในกลุ่มที่ 1 มีโหมดการสั่นสะเทือนเพียงโหมดเดียวนั้นคือที่ 2.5 kHz จะเห็นยอดแหลมอย่างเด่นชัดจากผลตอบสนองเชิงความถี่ในทุกทิศทางการวัดของมอเตอร์ตัวอย่างทั้ง 2 ตัว ส่วนกลุ่มที่ 2 อยู่ในช่วงความถี่ 7-12 kHz โดยในกลุ่มนี้พบว่ามียอดแหลมอยู่อย่างหนาแน่นและเด่นชัดที่สุด และกลุ่มสุดท้ายอยู่ในช่วงความถี่ 14-20 kHz ในกลุ่มนี้ยอดแหลมที่พบอาจจะไม่เด่นชัดนัก แต่ก็พบจำนวนโหมดมากพอสมควร สำหรับการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนกับมุมเฟสของผลตอบสนองเชิงความถี่ของมอเตอร์ตัวอย่างทั้งสองตัวนั้นจะแสดงในภาคผนวก ก

จากรูปที่ 3.1 เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งและทิศทางการวัดของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละตัวจำนวนโหมดที่พบในการวัดพื้นฐานมอเตอร์นั้นจะมากที่สุดสำหรับมอเตอร์ตัวอย่าง A และในช่วงความถี่สูงคือ 16.9, 17.2 และ 18.4 kHz นั้นไม่พบในการวัดที่โรเตอร์ทั้งสองทิศทาง การสั่นสะเทือนสูงสุดจะเกิดในช่วงความถี่ของกลุ่มที่ 2 ซึ่งเกิดขึ้นที่ชุดโรเตอร์ในทิศทาง Transverse และโหมดการสั่นสะเทือนสำหรับชุดโรเตอร์นั้นพบที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันเกือบทั้งหมดของการวัดทั้งสองทิศทาง มีเพียงบางโหมดที่ไม่ตรงกันแต่ยอดแหลมที่เกิดขึ้นนั้นไม่เด่นชัดมากนัก นั้นแสดงให้เห็นว่าการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ชุดโรเตอร์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์นั้นสามารถวัดการสั่นสะเทือนได้ทุกทิศทางแต่แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะไม่เท่ากัน ในส่วนของมอเตอร์ตัวอย่าง B นั้น ผลการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับมอเตอร์ตัวอย่าง A คือเกิดการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ชุดโรเตอร์ในทิศทาง Transverse ในช่วงความถี่ของกลุ่มที่ 2 แต่ตำแหน่งของโหมดการสั่นสะเทือนนั้นจะแตกต่างกับมอเตอร์ตัวอย่าง A เล็กน้อยในช่วงความถี่สูง ในส่วนที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดจากมอเตอร์ตัวอย่าง A คือ จะพบโหมดการสั่นสะเทือนที่ 19.2 kHz ทั้งการวัดที่ชุดโรเตอร์และฐานมอเตอร์ในทุกทิศทาง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากส่วนประกอบของโครงสร้างภายในและการประกอบมอเตอร์ เป็นประเด็นที่ต้องดำเนินการศึกษาต่อไปซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 4

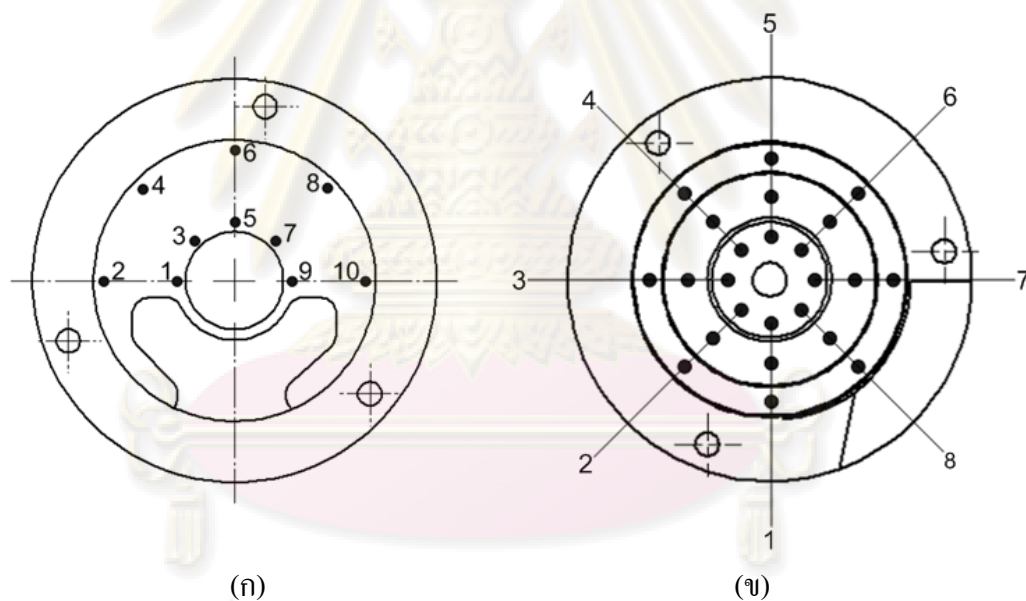
ตารางที่ 3.1 โหมดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างมอเตอร์ตัวอย่าง

Mode	Natural Frequency (kHz)					
	Sample Motor A			Sample Motor B		
	Base	Rotor		Base	Rotor	
		Transverse	Radial		Transverse	Radial
1	2.5*	2.5*	2.5*	2.5*	2.5*	2.5*
2	7.7	7.7	7.7	7.7	-	7.7
3	8.4	8.4	8.4	-	8.4	8.4
4	-	9.11*	9.11*	9.1	9.1*	9.1*
5	-	9.24	9.24	9.26*	9.26	9.26
6	9.55*	-	9.55	9.46	-	9.46
7	9.9	9.9	9.9*	-	-	9.8
8	10.6*	10.6	10.6	9.91	9.91	-
9	15.06	-	-	10.0	-	-
10	-	15.2	-	-	10.6*	10.6
11	15.4*	15.4*	15.4*	11.1*	-	-
12	16.1*	16.1*	16.1*	-	15.2	15.2
13	16.9	-	-	15.6*	15.6*	15.6*
14	17.2	-	-	15.9	15.9	15.9
15	18.4*	-	-	-	-	16.6
16	-	-	-	18.0*	-	-
17	-	-	-	19.2	19.2	19.2

*โหมดการสั่นสะเทือนที่มีขนาดแอมพลิจูดเด่นชัด



รูปที่ 3.13 ทิศทางการวัดการสั่นสะเทือนที่ฐานมอเตอร์และชุดโรเตอร์

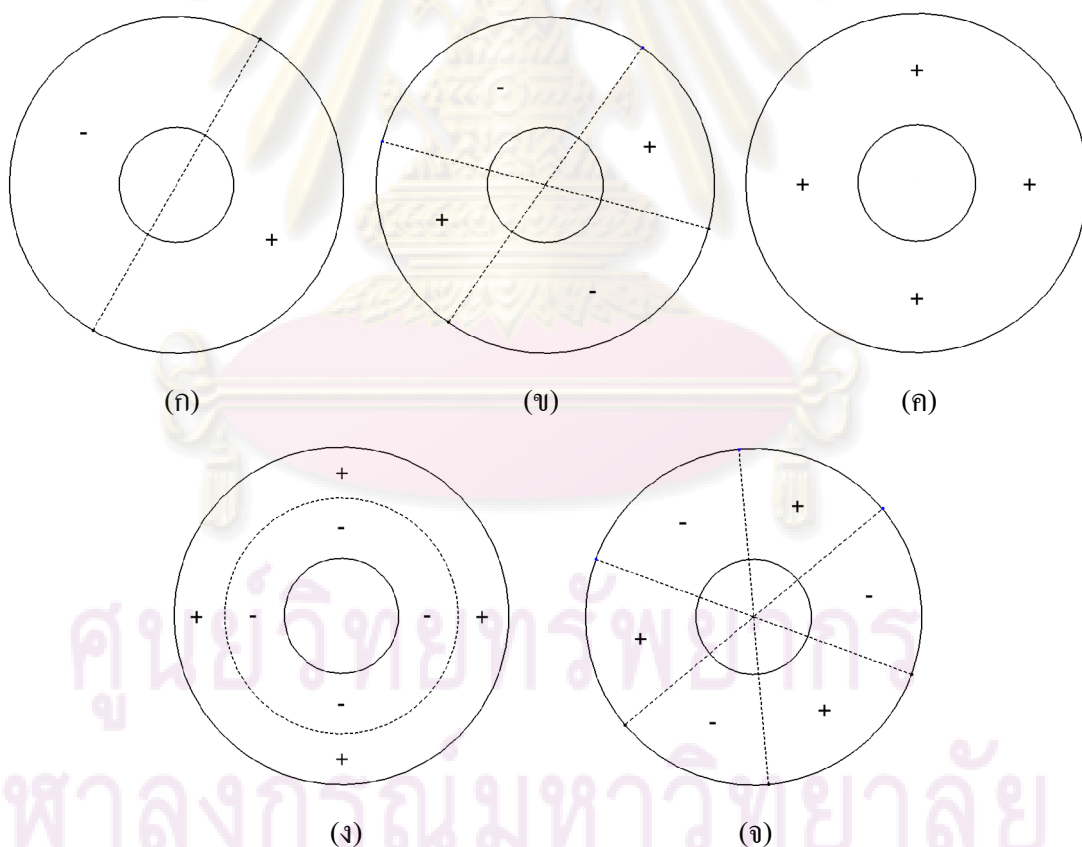


รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือน (ก) ฐานมอเตอร์ (ข) ชุดโรเตอร์

3.4.2 รูปทรงของโหมดการสั่นสะเทือน

สำหรับรูปทรงของโหมดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A และ B สามารถวิเคราะห์หาได้โดยใช้วิธีการ Circle fitted [15] ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์จากผลตอบสนองการสั่นสะเทือนเชิงความถี่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน การหาผลตอบสนองการสั่นสะเทือนเชิงความถี่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์รูปทรงของโหมดการ

สันสะเทือน ทำโดยใช้การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้ากับสปินเดิลมอเตอร์ ตัวอย่าง A และ B วัดการสันสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ฐานมอเตอร์และชุดโรเตอร์ทั้งในทิศทาง Transverse และตามแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 3.13 สำหรับการวัดการสันสะเทือนที่ฐานมอเตอร์ จะทำการวัดในทิศทาง Transverse เพียงครึ่งบนของฐานมอเตอร์ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.14 (ก) เนื่องจากที่บริเวณครึ่งล่างของฐานมอเตอร์ส่วนใหญ่เป็นบริเวณที่พื้นผิวไม่สามารถสะท้อนแสง เลเซอร์ที่ส่งมาจากหัวเซ็นเซอร์ของ LDV จึงไม่สามารถวัดการสันสะเทือนที่บริเวณพื้นผิวนี้ได้ ดังนั้นจึงแบ่งจุดวัดการสันสะเทือนออกเป็น 10 จุด ที่บริเวณใกล้กับแกนกลางและใกล้กับขอบนอก ของฐานมอเตอร์ตามลำดับ ในส่วนของการวัดการสันสะเทือนที่ชุดโรเตอร์ เนื่องจากรูปทรงของชุด โรเตอร์มีลักษณะเป็นขั้นบันไดทั้งหมด 3 ชั้น เพื่อรองรับจานดิสก์ที่ใช้สำหรับบรรจุข้อมูลต่างๆ ดังนั้นจะแบ่งจุดวัดการสันสะเทือนในแต่ละชั้นออกเป็นชั้นละ 8 จุด แสดงในรูปที่ 3.14 (ข) ทำการ วัดการสันสะเทือนในทิศทาง Transverse และตามแนวรัศมี ตามลำดับ

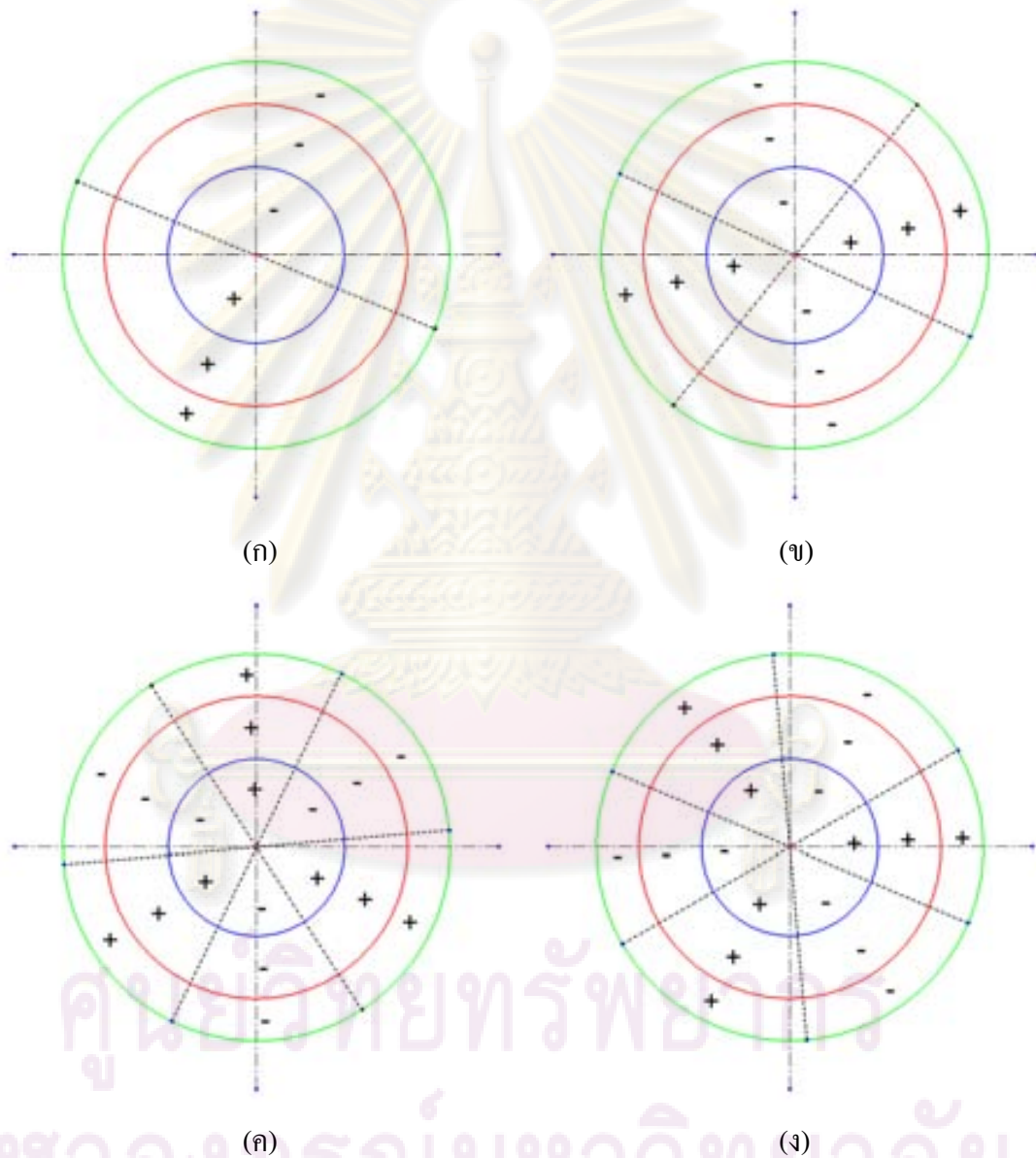


รูปที่ 3.15 รูปทรงของโหมดการสันสะเทือนที่ฐานมอเตอร์ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A
 (ก) 2.5 kHz (ข) 9.55 kHz (ค) 10.6 kHz (ง) 15.4 และ 16.1 kHz และ (จ) 18.4 kHz

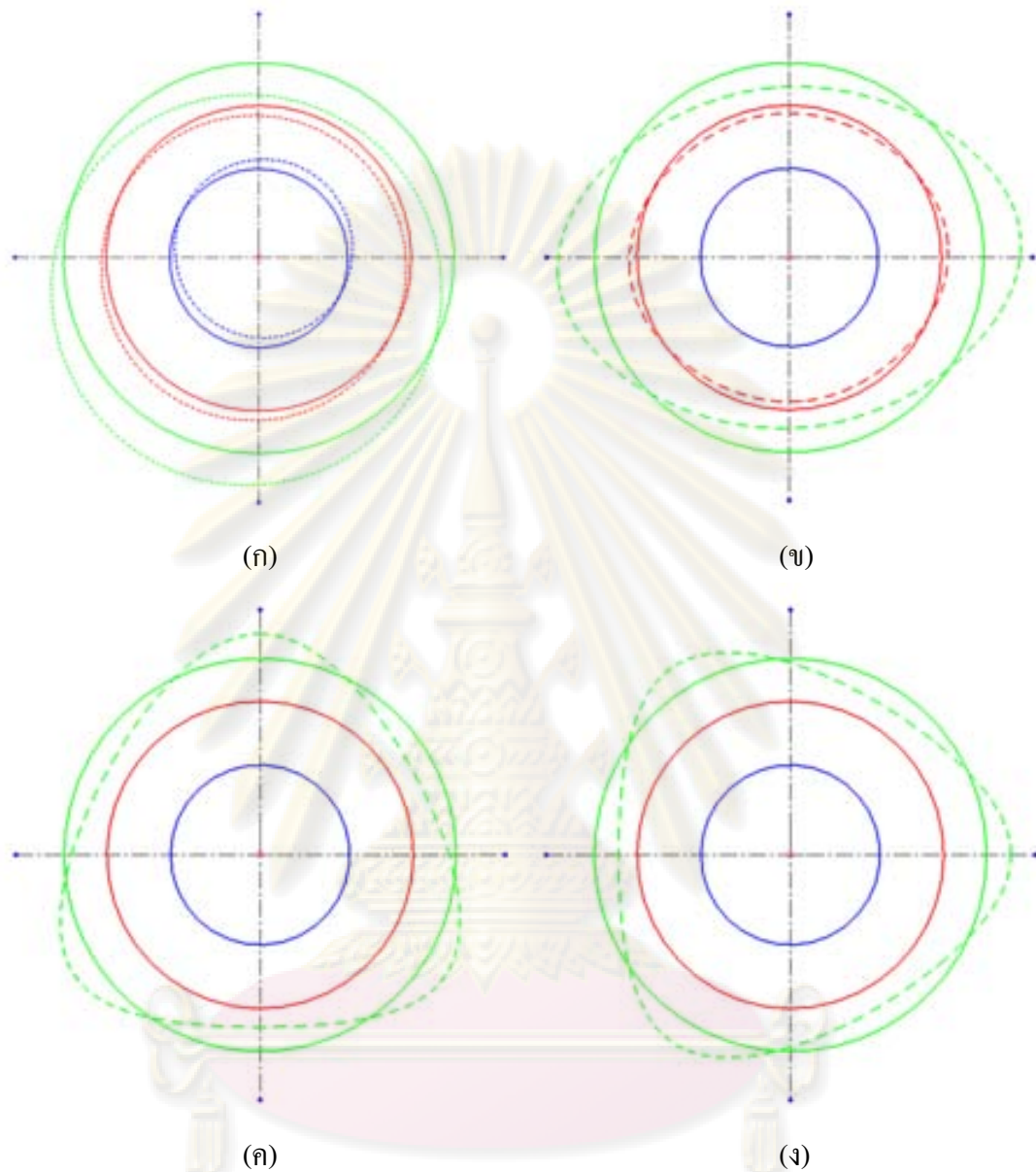
การวิเคราะห์รูปทรงของ โหมดการสั่นสะเทือนพื้นฐานของมอเตอร์ของสปินเดิลมอเตอร์ ตัวอย่าง A จะเลือกพิจารณาเฉพาะโหมดการสั่นสะเทือนที่ 2.5, 9.55, 10.6, 15.4, 16.1 และ 18.4 kHz ซึ่งเป็นโหมดการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะเป็นยอดแหลมเด่นชัดกว่าโหมดอื่นๆ สามารถแบ่งกลุ่มของโหมดการสั่นสะเทือนที่พบในผลตอบสนองเชิงความถี่ได้ออกเป็น 2 กลุ่ม กล่าวคือ กลุ่มที่ 1 คือกลุ่มที่มียอดแหลมอย่างเด่นชัดในผลตอบสนองเชิงความถี่ที่บริเวณใกล้กับแกนกลาง และใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์ โดยกลุ่มนี้จะมีโหมดการสั่นสะเทือน 2.5, 10.6, 15.4 และ 16.1 kHz ตามลำดับ กลุ่มที่ 2 คือกลุ่มที่มียอดแหลมอย่างเด่นชัดที่บริเวณใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์ นั่นคือโหมดการสั่นสะเทือน 9.55 และ 18.4 kHz โหมดการสั่นสะเทือนที่เลือกมาพิจารณานั้น พบว่าทุกโหมดเป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการเสีรูป (Deformable mode) ของโครงสร้างทั้งสิ้น ในรูปที่ 3.15 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ฐานมอเตอร์ โหมดการสั่นสะเทือนต่างๆ โดยเส้นประที่อยู่บนฐานมอเตอร์ในแต่ละรูปนั่นคือเส้น Nodal line ซึ่งเป็นเส้นที่ตัดผ่านจุดโหนด (Node) ทุกจุดบนฐานมอเตอร์ โดยที่จุดโหนดคือจุดที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของพื้นผิวเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาที่โหมดการสั่นสะเทือน 2.5, 9.55 และ 18.4 kHz จะพบเส้น Nodal line มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ตัดผ่านจุดศูนย์กลางของฐานมอเตอร์ โดยในแต่ละโหมดจะมีเส้น Nodal line เท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ที่โหมดการสั่นสะเทือน 10.6 kHz จะไม่พบเส้น Nodal line เกิดขึ้นที่ฐานมอเตอร์ ซึ่งหมายความว่าลักษณะการสั่นสะเทือนของพื้นผิวที่บริเวณใกล้กับแกนกลางและใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์เกิดการยกตัวขึ้นและลงพร้อมๆ กันในทิศทางเดียวกัน สำหรับโหมดการสั่นสะเทือนที่ 15.4 และ 16.1 kHz พบว่ามีลักษณะการสั่นสะเทือนที่เหมือนกัน นั่นคือมีเส้น Nodal line เป็นวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันกับฐานมอเตอร์เพียง 1 เส้น แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนตัวลงของพื้นผิวบริเวณที่ใกล้กับแกนกลางของฐานมอเตอร์ ซึ่งสวนทางกับการเคลื่อนตัวขึ้นของพื้นผิวบริเวณที่ใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์

สำหรับการวิเคราะห์รูปทรงของโหมดการสั่นสะเทือนที่ชุดโรเตอร์ของสปินเดิลมอเตอร์ ตัวอย่าง A จะแบ่งการวิเคราะห์ตามทิศทางของการวัดการสั่นสะเทือนออกเป็น 2 ทิศทาง โดยทิศทางที่ 1 คือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในทิศทาง Transverse และทิศทางที่ 2 คือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวรัศมี โดยเลือกพิจารณาเฉพาะโหมดการสั่นสะเทือนที่มียอดแหลมเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดและพบตรงกันที่ผลตอบสนองเชิงความถี่ในทุกระดับชั้นของการวัดการสั่นสะเทือน ทั้งสองทิศทาง นั่นคือโหมดการสั่นสะเทือน 2.5, 9.11, 15.4 และ 16.1 kHz ตามลำดับ พบว่าทุกโหมดเป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการเสีรูปของโครงสร้างมอเตอร์ทั้งสิ้น รูปทรงของโหมดการสั่นสะเทือนในทิศทาง Transverse แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.16 โดยเส้นสีน้ำเงิน สีแดง และสีเขียว ที่มีลักษณะเป็นเส้นเต็มคือเส้นแบ่งระดับชั้นของชุดโรเตอร์ จะพบเส้น Nodal line มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ตัดผ่านจุดศูนย์กลางของชุดโรเตอร์ในทุกโหมดการสั่นสะเทือน โดยที่โหมดการ

คลื่นสะเทือน 2.5, 9.11, 15.4 และ 16.1 kHz จะมีเส้น Nodal line เกิดขึ้นบนชุดโรเตอร์เท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ที่โหมด 15.4 และ 16.1 kHz จะมีเส้น Nodal line เกิดขึ้นบนชุดโรเตอร์เท่ากันแต่ต่างตำแหน่งกัน นั่นหมายถึงทั้ง 2 โหมดนี้มีรูปแบบการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นคล้ายกัน แต่การเคลื่อนตัวขึ้นและลงของพื้นผิวเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างกัน



รูปที่ 3.16 รูปทรงของโหมดการสั่นสะเทือนที่ชุดโรเตอร์ในทิศทาง Transverse ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A (ก) 2.5 kHz (ข) 9.11 kHz (ค) 15.4 kHz และ (ง) 16.1 kHz



รูปที่ 3.17 รูปทรงของโหมคการสันสะท้อนที่ชุดโรเตอร์ในทิศทางตามแนวรัศมีของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A (ก) 2.5 kHz (ข) 9.11 kHz (ค) 15.4 kHz และ (ง) 16.1 kHz

จากรูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นรูปทรงของโหมคการสันสะท้อนในทิศทางตามแนวรัศมีของชุดโรเตอร์ที่เกิดขึ้น ณ โหมคต่างๆของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A โดยเส้นสีน้ำเงิน สีแดง และ สีเขียว ที่มีลักษณะเป็นเส้นเต็ม คือเส้นแบ่งระดับชั้นของชุดโรเตอร์ ส่วนเส้นประคือเส้นที่เกิดจากการเสียรูปของโครงสร้างในแต่ละโหมคการสันสะท้อนของชุดโรเตอร์ ที่โหมคการสันสะท้อน 2.5 kHz แสดงในรูปที่ 3.17 (ก) พบว่าทุกระดับชั้นของชุดโรเตอร์เกิดการเคลื่อนตัวในทิศทางตามแนวรัศมี โดยที่ชั้นบนสุดของชุดโรเตอร์จะมีทิศทางการเคลื่อนตัวสวนทางกับชั้นกลางและชั้น

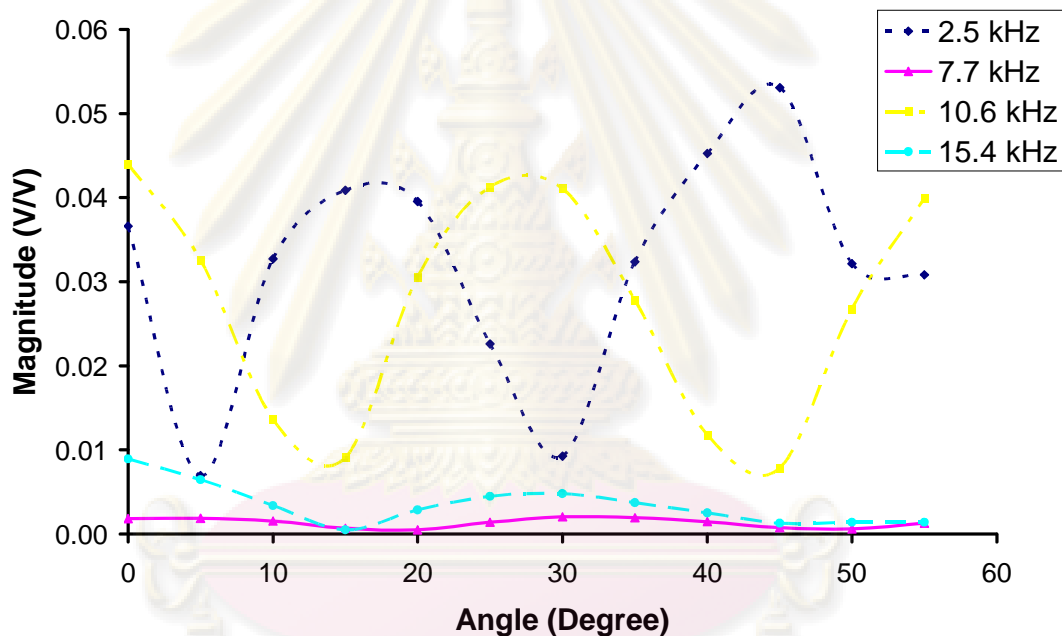
ล่างสุด ตามลำดับ นั้นหมายความว่าที่โหมคการสันสะเทือนนี้จะมีเส้น Nodal line ที่มีลักษณะเป็นวงกลมเกิดขึ้นระหว่างชั้นบนสุดและชั้นกลางของชุดโรเตอร์ สำหรับโหมคการสันสะเทือน 9.11 kHz แสดงในรูปที่ 3.17 (ข) จะพบการเสีรูปของชุดโรเตอร์เกิดขึ้นที่ชั้นกลางและชั้นล่างสุด มีลักษณะเป็นวงรี ซึ่งมีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวด้านข้างเข้าและออกในทิศทางเดียวกัน โดยที่ชั้นบนสุดของชุดโรเตอร์ไม่มีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวด้านข้างเกิดขึ้น ในส่วนของโหมคการสันสะเทือน 15.4 และ 16.4 kHz แสดงในรูปที่ 3.17 (ค) และ (ง) นั้นมีรูปทรงของการสันสะเทือนคล้ายกัน นั่นคือเกิดการเสีรูปที่ชั้นล่างสุดของชุดโรเตอร์เพียงชั้นเดียว ซึ่งมีลักษณะคล้ายรูปสามเหลี่ยม และไม่มีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวด้านข้างในส่วนของชั้นบนสุดและชั้นกลาง แต่การเสีรูปที่ชั้นล่างสุดของชุดโรเตอร์นั้นพบว่าเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างกัน

จากการวิเคราะห์รูปทรงของ โหมคการสันสะเทือนที่ฐานมอเตอร์ของสปินเดิลมอเตอร์ ตัวอย่าง A พบว่าการสันสะเทือนสูงสุดในช่วงความถี่ 14-20 kHz จะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับแกนกลางของฐานมอเตอร์ เนื่องจากบริเวณนี้อยู่ใกล้กับวงแหวนขดลวดเหนียวนำ ซึ่งรองรับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบวงแหวนขดลวดเหนียวนำโดยตรง และส่งผ่านไปสู่ฐานมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดการสันสะเทือนที่พื้นผิวด้านนอกต่อไป ในช่วงความถี่นี้ที่โหมคการสันสะเทือน 15.4 และ 16.1 kHz เป็นโหมคที่ทำให้ฐานมอเตอร์เกิดการเสีรูปมากที่สุด และมีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวแบบคลื่นจากภายในสู่ภายนอกตามแนวรัศมี สำหรับลักษณะการสันสะเทือนของชุดโรเตอร์ พบว่ามีการสันสะเทือนสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณชั้นล่างสุดของชุดโรเตอร์ เนื่องจากเป็นบริเวณที่ถูกยึดติดเข้ากับแม่เหล็กถาวร ซึ่งรองรับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบวงแหวนขดลวดเหนียวนำโดยตรง จึงทำให้เกิดการเสีรูปของชุดโรเตอร์ที่บริเวณนี้มากที่สุด ดังนั้นการเสีรูปของพื้นผิวที่ฐานมอเตอร์และที่ชุดโรเตอร์จะเหนียวนำไปเกิดการการสันสะเทือนและการแพร่ของเสียงเกิดขึ้น ซึ่งจะมีการศึกษาในส่วนของเสียงที่แพร่ออกจากการสันสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ในหัวข้อที่ 3.6 การวิเคราะห์รูปทรงของโหมคการสันสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B พบว่ามีลักษณะการสันสะเทือนเป็นไปในทิศทางเดียวกับโหมคการสันสะเทือนที่พบในตำแหน่งใกล้กันของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A จึงไม่นำมาแสดงให้เห็นในส่วนนี้

3.5 การศึกษาลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมของชุดโรเตอร์

จากการศึกษาถึงผลตอบสนองการสันสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ที่เกิดจากการกระตุ้นทางไฟฟ้า ผลตอบสนองที่ได้ไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงแหวนขดลวดเหนียวนำ ตำแหน่งและทิศทางที่ใช้ในการวัดการสันสะเทือนเท่านั้น แต่พบว่ายังมี

ความสัมพันธ์กับมุมสัมพันธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวและชุดโรเตอร์อีกด้วย ซึ่งจากการทดสอบหาผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ผ่านมา ตำแหน่งของชุดโรเตอร์จะกำหนดให้อยู่ที่เดิมตลอดเวลา ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ถ้าทำการทดลองโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้ากับสปินเดิลมอเตอร์โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในคลื่นรูปไซน์ชอยคอด ที่ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์และวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นด้วย LDV ในขณะที่หมุนชุดโรเตอร์ช้าๆ ด้วยมือ จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมของชุดโรเตอร์ต่อผลการสั่นสะเทือนได้ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้ถึงทิศทางของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนในตำแหน่งต่างๆ ของโรเตอร์ จากการกระตุ้นที่ความถี่ใดๆ ได้อีกด้วย

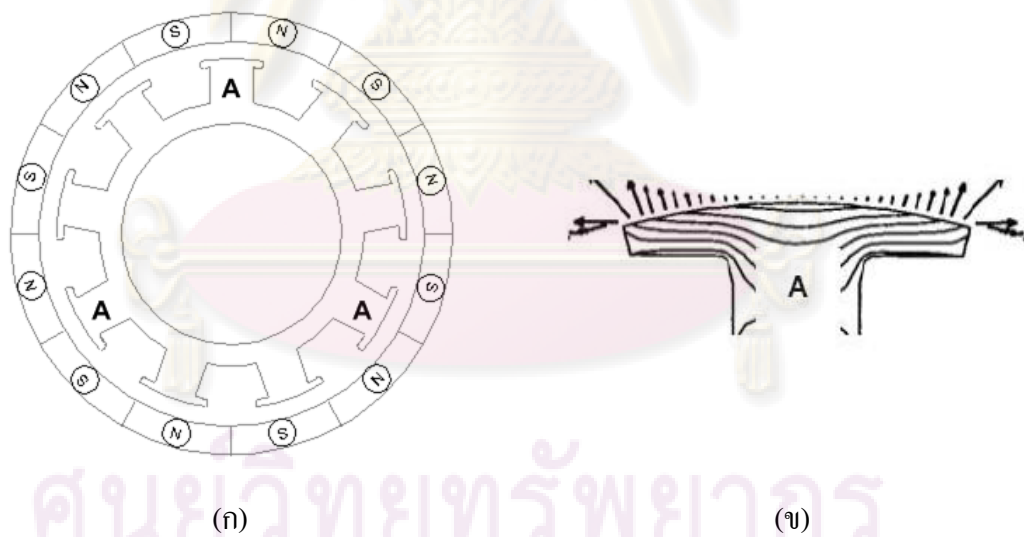


รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของโรเตอร์ในทิศทาง Transverse เทียบกับมุมของโรเตอร์

ในการทดสอบนี้จะทำการกระตุ้นทางไฟฟ้าเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ธรรมชาติดังต่อไปนี้คือ 2.5, 7.7, 10.6 และ 15.4 kHz ตามลำดับ และหมุนชุดโรเตอร์ครั้งละ 5 องศา ตั้งแต่ 0 ถึง 55 องศา ของการวัดในแต่ละความถี่ วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นของชุดโรเตอร์ในทิศทาง Transverse ใกล้กับจุดศูนย์กลางของชุดโรเตอร์ โดยผลตอบสนองการสั่นสะเทือนเปรียบเทียบกับมุมที่เปลี่ยนไปของชุดโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ที่ตำแหน่ง 0 องศา จะตรงกับตำแหน่งที่ขั้วแม่เหล็กเอียงกับช่องว่างของวงแหวนขดลวดเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ก) ที่ตำแหน่ง “A” แสดงให้เห็นถึงเฟสที่ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้า เนื่องจากสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์ที่มีการหมุนแบบสมมาตร และ

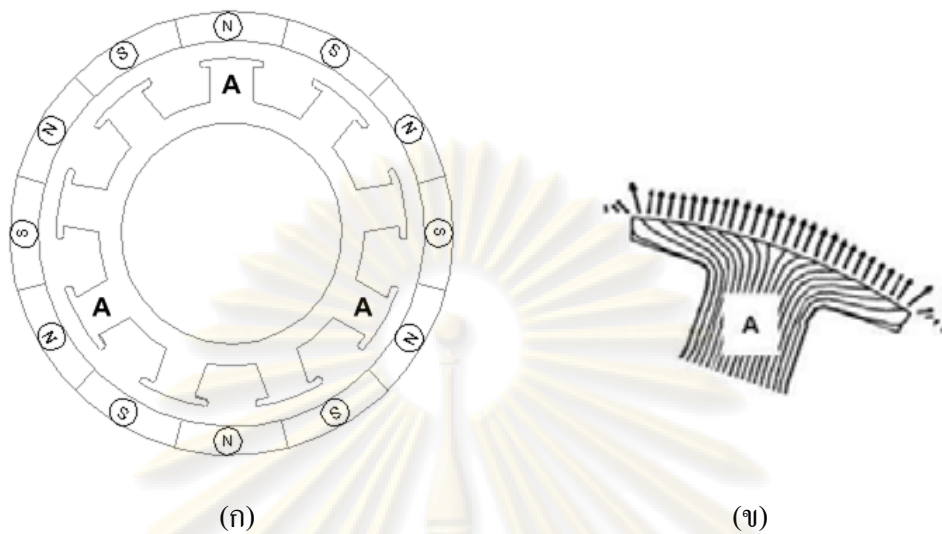
ในทางทฤษฎี ทุก 30 องศา ของการหมุนชุด โรเตอร์จะให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนในรูปแบบเดิม

จากรูปที่ 3.18 พบว่าทุกค่าความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้น จะให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ซ้ำรูปแบบเดิม นั่นคือค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนจะซ้ำกันสำหรับมุมที่เพิ่มขึ้นทุก 30 องศา ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี แต่เนื่องจากสปินเดิลมอเตอร์นั้นมีขนาดเล็ก การหมุนชุดโรเตอร์ให้ได้ครั้งละ 5 องศา พอได้นั้นทำได้ยาก จึงส่งผลให้ขนาดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนมีค่าแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย และพบว่าโรเตอร์ที่ตำแหน่ง 0 และ 30 องศา เป็นตำแหน่งที่แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนมีค่าสูงสุดสำหรับความถี่ธรรมชาติที่ 7.7, 10.6 และ 15.4 kHz และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งของโรเตอร์ 15 และ 45 องศา นั้นหมายความว่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนสูงสุดสำหรับความถี่ธรรมชาติที่ 7.7, 10.6 และ 15.4 kHz เกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของชุดโรเตอร์และเฟสที่ถูกกระตุ้นของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการเอียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ก) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวเส้นสัมผัสวงกลมกระทำกับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและชุดโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ข)



รูปที่ 3.19 (ก) ลักษณะของขั้วแม่เหล็กและวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ที่โรเตอร์มุม 0 องศา (ข)

ลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลม [1]



รูปที่ 3.20 (ก) ลักษณะของขั้วแม่เหล็กและวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ที่โรเตอร์มุม 15 องศา (ข) ลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวรัศมี [1]

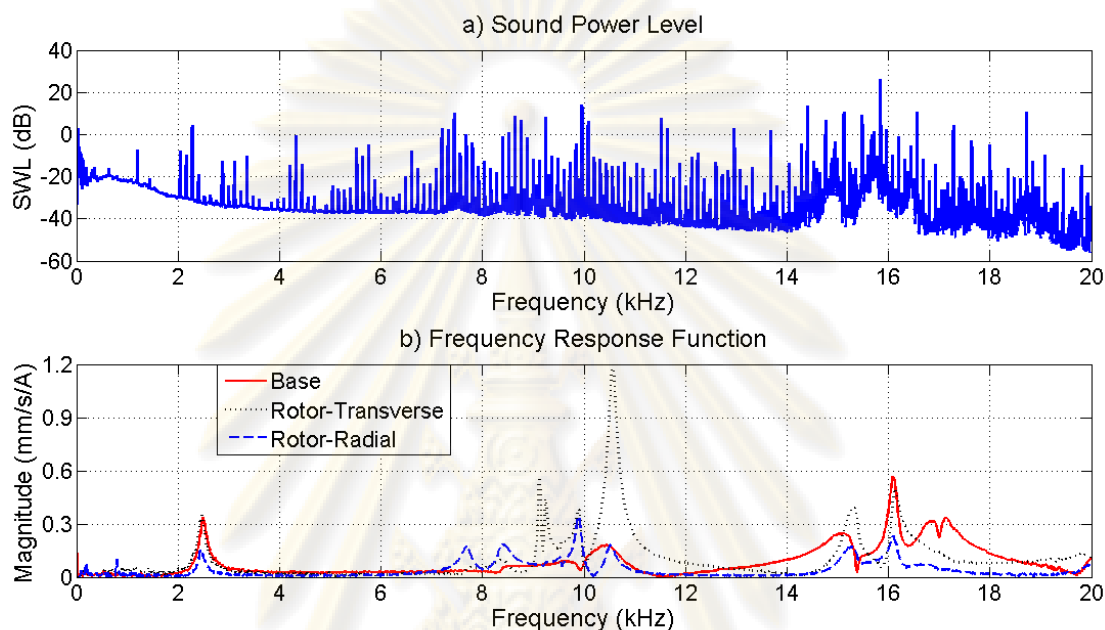
ในทางกลับกัน ที่โรเตอร์ตำแหน่ง 15 และ 45 องศา แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนสูงสุด จะเกิดขึ้นที่ความถี่ธรรมชาติ 2.5 kHz และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งของโรเตอร์ 0 และ 30 องศา โดยเฟส ที่ถูกกระตุ้นของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำจะอยู่ในแนวเดียวกันกับขั้วแม่เหล็กของขูดโรเตอร์ ดัง แสดงในรูปที่ 3.20 (ก) ดังนั้นแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนจึงเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าใน ทิศทางตามแนวรัศมี กระทำกับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและขูดโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.20 (ข)

จากรูปแบบของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.18 สรุปได้ว่าแหล่งกำเนิดของ การสั่นสะเทือนสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและขูดโรเตอร์นั้น เป็นผลมาจาก แรงแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในทิศทางตามแนวรัศมีและตามแนวเส้นสัมผัสวงกลม แต่เนื่องจากการศึกษา การส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำไปสู่ฐานมอเตอร์นั้น แรงแม่เหล็กใน ทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมเป็นแรงที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานในลักษณะของแรงบิดที่บริเวณ ผิวสัมผัสของการ Interference fit จึงเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างมากในการศึกษาการ ส่งผ่านการสั่นสะเทือน โดยจะมีการศึกษาอย่างละเอียดในเรื่องของการปรับตำแหน่งของโรเตอร์ที่ มีผลต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนต่อไป

3.6 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของการสั่นสะเทือนและเสียง

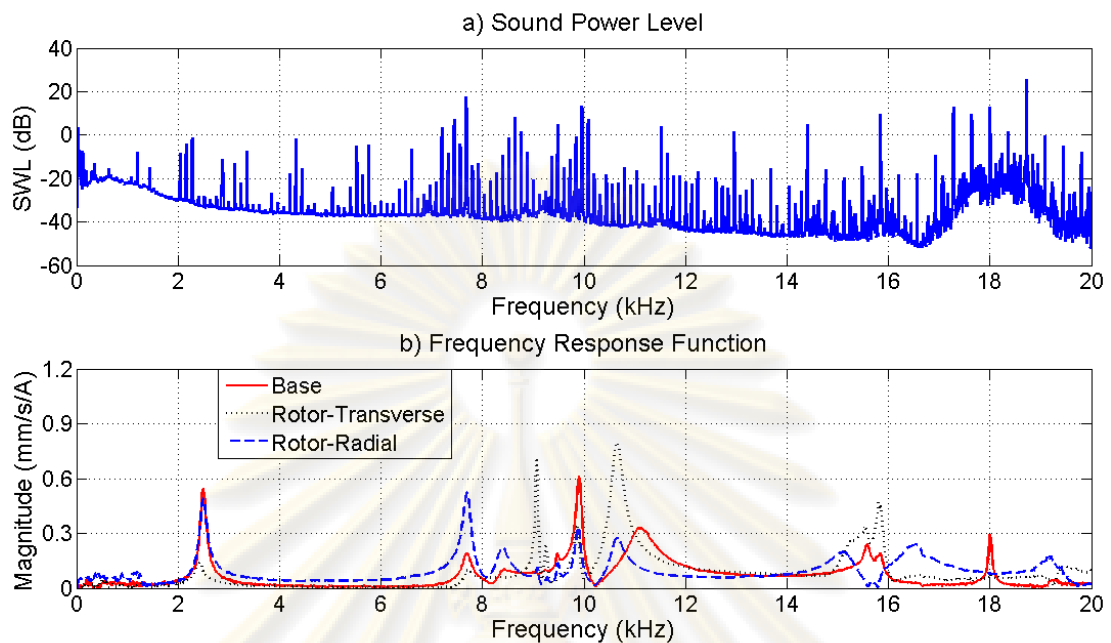
ในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่กับสเปกตรัมเสียง เพื่อศึกษาถึง ลักษณะของโหมดการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการแพร่ของเสียงที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่สามารถได้

ยีนได้ กล่าวคือในช่วงความถี่ 20 Hz-20 kHz ในรูปที่ 3.21 เป็นผลของการวัดเสียงที่เกิดขึ้นจากการทำงานที่ความเร็วรอบ 7200 rpm ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A ในรูปแบบของระดับกำลังเสียงเปรียบเทียบกับผลตอบสนองเชิงความถี่จากการกระตุ้นทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.21 ผลตอบสนองเชิงความถี่เปรียบเทียบกับระดับกำลังเสียงที่เกิดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A

จากรูปที่ 3.21 ค่าระดับกำลังเสียงรวมตลอดช่วงความถี่ที่คำนวณได้เท่ากับ 29.58 dB แต่ค่าระดับกำลังเสียงรวมของห้องวัดเสียงมีค่าเท่ากับ 10.48 dB ดังนั้นค่าระดับกำลังเสียงที่แพร่อกจากสปินเดิลมอเตอร์มีค่าถึง 19.1 dB และจากการสังเกตพบว่ามียอดแหลมเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ความถี่ 2.28 kHz ในช่วงความถี่ 7.2-7.8, 9.8-10.08 kHz และพบยอดภูเขาเกิดขึ้นในช่วงความถี่ 14.6-16.5 kHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองเชิงความถี่ พบว่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ที่เกิดขึ้นนั้น ใกล้เคียงกันกับยอดแหลมที่พบในสเปกตรัมของเสียง ซึ่งหมายความว่าเมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ จะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงและมีเสียงแพร่ออกมาจากสปินเดิลมอเตอร์ดังขึ้นอีกด้วย โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 14.6-16.5 kHz พบว่าแอมพลิจูดของเสียงนั้นสูงขึ้นกว่าช่วงความถี่อื่นอย่างชัดเจน แต่เนื่องจากผลตอบสนองการสั่นสะเทือนนี้วัดในขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง ดังนั้นความถี่ธรรมชาติของสปินเดิลมอเตอร์อาจมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงในขณะที่มอเตอร์ทำงาน และอาจมีค่าตรงกับยอดแหลมที่เกิดขึ้นในสเปกตรัมเสียงก็เป็นได้



รูปที่ 3.22 ผลตอบสนองเชิงความถี่เปรียบเทียบกับระดับกำลังเสียงที่เกิดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B

ส่วนผลตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับสเปกตรัมของเสียงที่วัดจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B แสดงในรูปที่ 3.22 ค่าระดับกำลังเสียงรวมที่คำนวณได้เท่ากับ 29.52 dB มีค่าใกล้เคียงกับมอเตอร์ตัวอย่าง A และจากการสังเกตสเปกตรัมของเสียงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับมอเตอร์ตัวอย่าง A ในช่วงความถี่ต่ำแต่ในช่วงความถี่สูงคือ 16.9-19.2 kHz พบยอดภูเขาเกิดขึ้นและมีแอมพลิจูดของเสียงสูงกว่าในช่วงความถี่อื่น อาจเป็นผลมาจากความถี่ธรรมชาติในช่วงความถี่ของกลุ่มที่ 3 คือที่ 18 และ 19.2 kHz ส่งผลให้เกิดยอดภูเขาในสเปกตรัมเสียงที่เด่นชัดในช่วงนี้ ซึ่งพบลักษณะเดียวกันในสเปกตรัมเสียงของมอเตอร์ตัวอย่าง A ที่ความถี่ธรรมชาติ 15.4 และ 16.1 kHz อาจกล่าวได้ว่าการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงที่แพร่ออกมาจากมอเตอร์มากที่สุดจึงอยู่ในช่วงความถี่สูงของกลุ่มที่ 3 นั่นคือช่วงความถี่ 14-20 kHz

ในการที่จะสามารถชี้ชัดไปได้ว่าการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงที่แพร่ออกมาจากมอเตอร์มีอิทธิพลอย่างมากในช่วงความถี่สูงคือ 14-20 kHz เป็นผลมาจากสาเหตุใดนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากสปินเดิลมอเตอร์ยังมีอีกหลายองค์ประกอบที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนและแพร่ไปสู่เสียง แต่ก็ยังเป็นปัญหาที่สำคัญของการลดเสียงและน่าสนใจที่จะดำเนินการศึกษาต่อไป

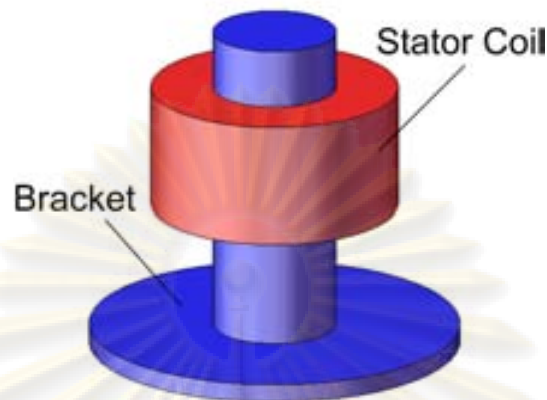
บทที่ 4

การเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ที่มีผลต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์ที่มีผลต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ มีขั้นตอนการศึกษาทั้งหมด 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือน โดยการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit จากแบบจำลองกลไกแรงเสียดทานที่บริเวณผิว Interference fit เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะของพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นผ่านกลไกแรงเสียดทาน ในขั้นตอนที่ 2 เป็นการออกแบบขนาด Interference fit และแบ่งกลุ่มสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนตามขนาด Interference fit เพื่อศึกษาทดลองการลดการสั่นสะเทือน โดยการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit และในขั้นตอนที่ 3 ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการทดสอบการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างในแต่ละกลุ่ม เพื่อยืนยันความถูกต้องของแนวทางการลดการสั่นสะเทือน โดยการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ต่อไป

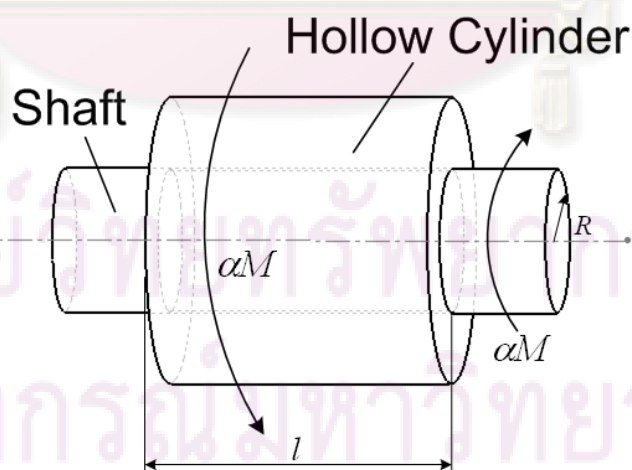
4.1 การวิเคราะห์ผลของกลไกแรงเสียดทานที่บริเวณผิว Interference fit ต่อพลังงานสูญเสีย

การศึกษาแนวทางการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนียวนำไปสู่ฐานมอเตอร์โดยการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit จำเป็นที่จะต้องมีความเข้าใจในปรากฏการณ์ของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น จากการศึกษาในหัวข้อที่ 2.4 ในส่วนของการอธิบายกลไกแรงเสียดทานและการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานของแผ่นชิ้นงานที่ทาบบต่อกัน ซึ่งถูกยึดติดกันด้วยแรงดันกระจายตัวแบบคงที่ โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงภายในและระยะขจัด (Internal force and displacement relation) พบว่าพลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานที่บริเวณผิวสัมผัส จะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันเป็นหลัก กล่าวคือ เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น แรงเสียดทานที่บริเวณสัมผัสก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้พลังงานสูญเสียจากกลไกแรงเสียดทานลดลง ทำให้สามารถส่งผ่านการสั่นสะเทือนได้มากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อแรงดันลดลง แรงเสียดทานที่บริเวณผิวสัมผัสก็จะลดลง ส่งผลให้พลังงานสูญเสียที่บริเวณผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนลงได้ จากความเข้าใจนี้จึงได้นำความสัมพันธ์ของแรงภายในและระยะขจัด มาปรับใช้ให้เหมาะสมกับการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์ต่อไป



รูปที่ 4.1 แบบจำลองอย่างง่ายของการสวมอัดระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์

ในการศึกษาี้ จะพิจารณาการสวมอัดระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์ให้อยู่ในรูปของแบบจำลองอย่างง่าย ดังในรูปที่ 4.1 กำหนดให้วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง ถูกสวมอัดเข้ากับฐานมอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นเพลายาวยึดติดกับแผ่นวงกลมบาง บริเวณผิวสัมผัสของทั้งสองชิ้นที่มีการสวมอัดกันนั้นเป็นแบบ Interference fit ซึ่งการเพิ่มขนาด Interference fit นั้น เป็นการกำหนดค่าความแน่นหรือแรงดันที่ทำให้แรงเสียดทานที่บริเวณผิว Interference fit นั้นสูงขึ้น ดังนั้นแรงดันจึงเป็นตัวแปรหลักในการพิจารณาหาพลังงานสูญเสียที่บริเวณผิวสัมผัสที่เกิดแรงเสียดทาน



รูปที่ 4.2 แบบจำลองของการสวมอัดระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพลานำ และรองรับแรงบิดที่มาจากภายนอก

ในรูปที่ 4.2 เป็นแบบจำลองของการสวมอัตรระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพลลา ซึ่งเป็นการจำลองมาจากรูปทรงของวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์ จะเห็นว่าที่ทรงกระบอกกลวงมีแรงบิดขนาด αM กระทำจากภายนอก แรงบิดนี้จะส่งผ่านไปที่บริเวณผิวที่มีการ Interference fit และที่เพลลาจะมีแรงบิดขนาดเท่ากันคอยต้านเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของทั้งสองส่วนเกิดขึ้น ส่งผลให้มีแรงเสียดทานในลักษณะของแรงบิดเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสของทั้งสองส่วนตลอดช่วงความยาวของทรงกระบอกกลวง l แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดระยะขจัดเชิงมุม (Angular displacement) ที่บริเวณปลายด้านนอกผิวสัมผัสของทั้งสองด้าน ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีของแผ่นชิ้นงานทาบต่อกัน สำหรับแรงเสียดทานในลักษณะของแรงบิดต่อหน่วยความยาว (Torsional friction per unit length) ที่เกิดขึ้นบนบริเวณผิวสัมผัสของทั้งสองชิ้นงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-1)

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

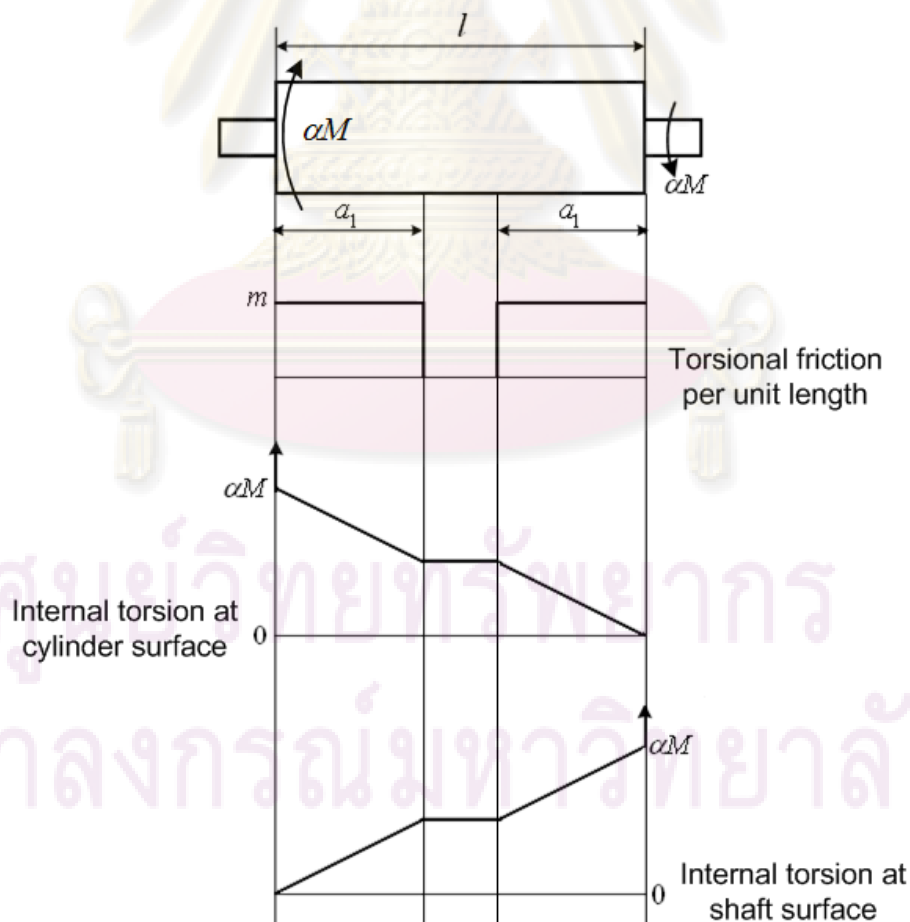
โดย	m	คือ	แรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาว (N-m/m)
	μ	คือ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
	p	คือ	ความดันที่เกิดจากการสวมอัตรระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพลลา (Pa)
	R	คือ	รัศมีของเพลลา (m)

ดังนั้นในการวิเคราะห์หาพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกลไกแรงเสียดทาน จะใช้ความสัมพันธ์ของแรงบิดภายในและระยะขจัดเชิงมุม [16] โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดที่กระทำด้านนอกของทรงกระบอกกลวงทั้งหมด 3 ขั้นตอน นั่นคือ 1. Loading stage 2. Unloading stage และ 3. Reloading stage ซึ่งปริมาณของพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากแรงบิดที่ทำการกระทำหนึ่งวัฏจักร จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากทรงกระบอกกลวงไปสู่เพลลา เปรียบได้กับพฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนียวนำไปสู่ฐานมอเตอร์ โดยแรงบิดที่กระทำจากด้านนอกและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดภายในในแต่ละขั้นตอน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. Loading stage

ในขั้นตอนนี้ แรงบิด αM เริ่มกระทำที่ด้านนอกของทรงกระบอกกลวง โดยที่ α มีค่าเพิ่มจาก 0 ไปจนถึง 1 และมีแรงบิดขนาดเท่ากันส่งมาจากเพลลาเพื่อต้านการหมุนของระบบ ทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ผิวสัมผัสของทั้งสองส่วน แผนภาพของแรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาวและแรงบิดภายในที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงความยาวของทรงกระบอกกลวงและเพลลา แสดง

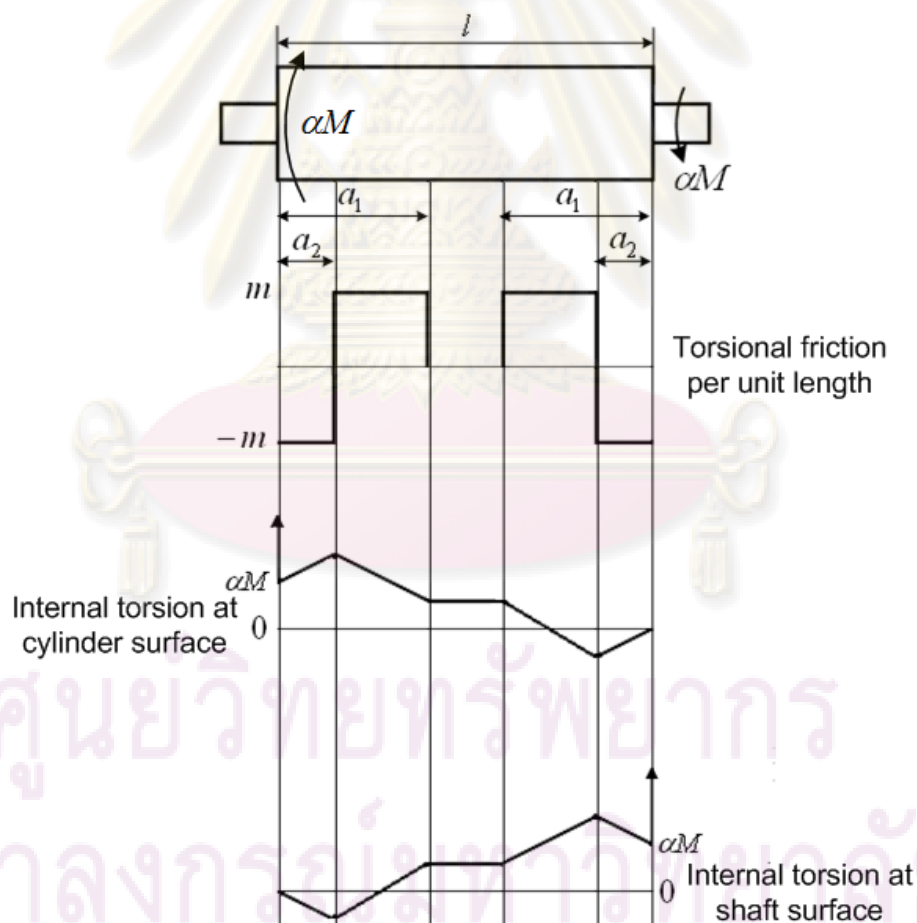
ในรูปที่ 4.3 จากแผนภาพของแรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาวจะพบว่า มีแรงเสียดทานแบบแรงบิดเกิดขึ้นที่บริเวณปลายด้านนอกของผิวสัมผัสทั้งสองด้าน ซึ่งแรงเสียดทานนี้เป็นแรงที่ทำให้เกิดระยะขจัดเชิงมุมขึ้นบริเวณปลายด้านนอกของผิวสัมผัสทั้งสองด้าน ระยะขจัดเชิงมุมด้านซ้ายมือเป็นผลมาจากแรงบิดที่ส่งผ่านมาจากทรงกระบอกกลาง ด้านกับแรงเสียดทานแบบแรงบิดที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสตลอดช่วงความยาวผิวสัมผัส a_1 แรงบิดนี้ลดลงด้วยอัตราคงที่โดยมีความชันเท่ากับ m สำหรับระยะขจัดเชิงมุมด้านขวามือนั้นเป็นผลมาจากแรงบิดที่ส่งผ่านมาจากเพลลา และแรงบิดนี้ลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานแบบแรงบิดเช่นเดียวกับทางด้านซ้ายมือ ดังนั้นในบริเวณช่วงกลางของผิวสัมผัสจึงไม่เกิดระยะขจัดเชิงมุมเนื่องจากเป็นช่วงที่แรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็นศูนย์ ในแผนภาพของแรงบิดภายใน พบว่าแรงบิดภายในของแต่ละชิ้นส่วนในแต่ละช่วงความยาวของผิวสัมผัสนั้นจะลดลงเป็นสัดส่วนของกันและกัน นั่นหมายความว่าผลรวมของแรงบิดภายในของแต่ละช่วงความยาวของผิวสัมผัสมีค่าเท่ากับ αM ที่มากระทำจากภายนอก ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับในกรณีของแผ่นชิ้นงานทาบต่อกัน ในหัวข้อที่ 2.4



รูปที่ 4.3 แผนภาพของแรงบิดภายในที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสในขั้นตอน Loading stage

2. Unloading stage

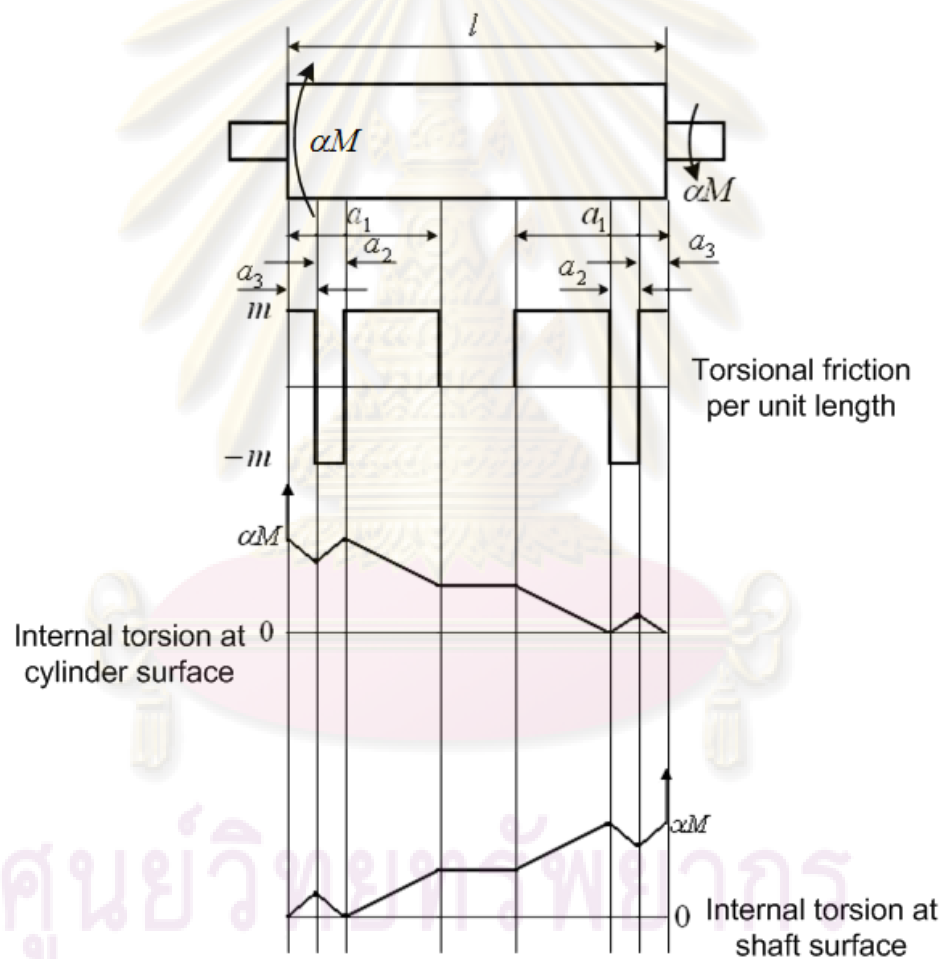
ในขั้นตอนนี้ แรงบิด αM ที่กระทำด้านนอกของทรงกระบอกกลวงจะลดลงจากในขั้นตอนที่ 1 โดยที่ α มีค่าลดลงจาก 1 จนถึงค่าคงที่ r ใดๆ ดังนั้นแรงบิดที่ส่งมาจากเพลาก็จะลดลงด้วยเช่นกัน แผนภาพของแรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาวและแรงบิดภายในที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงความยาวของทรงกระบอกกลวงและเพลาส่งผลให้ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในช่วงความยาวนี้ เกิดปรากฏการณ์ของการเลื่อนไถลย้อนกลับ (Counter slip) แต่ผิวสัมผัสในช่วงอื่นๆ นั้นแรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาวยังคงมีลักษณะคล้ายกันกับในขั้นตอนแรก และแรงบิดภายในของแต่ละชิ้นส่วนนั้นยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงด้วยอัตราคงที่ m เช่นเดียวกันกับในขั้นตอนแรก



รูปที่ 4.4 แผนภาพของแรงบิดภายในที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสในขั้นตอน Unloading stage

3. Reloading stage

ในขั้นตอนนี้ แรงบิด αM ที่กระทำด้านนอกของทรงกระบอกกลวง จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดในขั้นตอนแรกอีกครั้ง โดยที่ α มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าคงที่ r ใดๆ จนถึง 1 ซึ่งจะทำให้แรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาวที่บริเวณปลายด้านนอกของผิวสัมผัสทั้งสองด้านในช่วง a_3 นั้นมีค่าเป็นบวกอีกครั้ง ส่งผลให้ระยะขจัดเชิงมุมในช่วง a_3 นั้นเลื่อนไหลสวนทางกับระยะขจัดเชิงมุมในช่วง a_2 โดยแผนภาพของแรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาวและแรงบิดภายในที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงความยาวของทรงกระบอกกลวงและเพลลา แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพของแรงบิดภายในที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสในขั้นตอน Reloading stage

จากการวิเคราะห์กลไกแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสที่มีการ Interference fit ระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพลลา ซึ่งเป็นผลมาจากแรงบิดที่มากกระทำด้านนอกทั้ง 3 ขั้นตอนนั้น สามารถ

หาระยะขจัดเชิงมุมในแต่ละขั้นตอน โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแรงบิดภายในและระยะขจัดเชิงมุมได้ดังสมการที่ (4-2), (4-3) และ (4-4)

$$\phi_1 = \frac{k\alpha Ml}{G_s I_s} + \frac{(1-3k+3k^2)\alpha^2 M^2}{2mG_s I_s(1-k)}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (4-2)$$

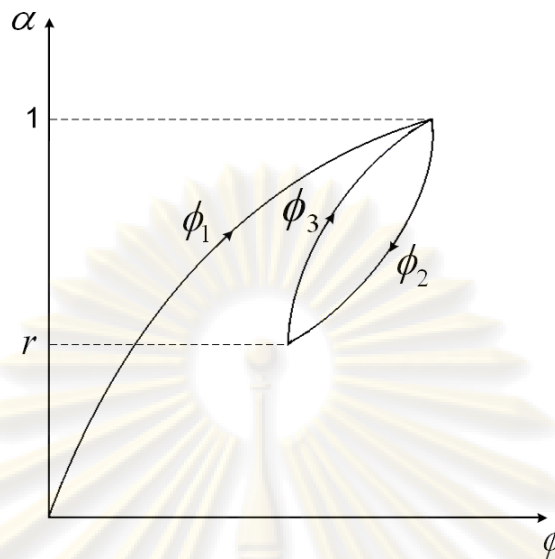
$$\phi_2 = \frac{k\alpha Ml}{G_s I_s} + \frac{M^2(1+2\alpha-\alpha^2)(1-3k+3k^2)}{4mG_s I_s(1-k)}, \quad r < \alpha < 1 \quad (4-3)$$

$$\phi_3 = \frac{k\alpha Ml}{G_s I_s} + \frac{M^2(1+2r-\alpha^2-2\alpha r)(1-3k+3k^2)}{4mG_s I_s(1-k)}, \quad r < \alpha < 1 \quad (4-4)$$

$$k = \frac{G_s I_s}{G_s I_s + G_c I_c} \quad (4-5)$$

โดย	ϕ_1	คือ	ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1
	ϕ_2	คือ	ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2
	ϕ_3	คือ	ระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 3
	M	คือ	แรงบิดที่กระทำด้านนอกของทรงกระบอกกลวง (N-m)
	m	คือ	แรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาว (N-m/m)
	$G_c I_c$	คือ	Torsional stiffness ของทรงกระบอกกลวง (N-m ²)
	$G_s I_s$	คือ	Torsional stiffness ของเพลลา (N-m ²)
	k	คือ	Torsional stiffness ของเพลลาเทียบกับผลรวมของ Torsional stiffness ทรงกระบอกกลวงและเพลลา
	l	คือ	ความยาวของบริเวณผิวสัมผัส (m)
	α	คือ	ค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1
	r	คือ	ค่าคงที่ใดๆ

เมื่อนำสมการที่ (4-2), (4-3) และ (4-4) มาพล็อตเทียบกับ α จะได้ความสัมพันธ์ของระยะขจัดเชิงมุม ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะของระยะขจัดเชิงมุมที่เกิดขึ้นจากแรงบิดภายนอก

จากรูปที่ 4.6 พบว่าระยะขจัดเชิงมุมนั้นมีการเคลื่อนที่ในลักษณะของวงแหวนปิด เรียกว่ วงแหวนที่เกิดขึ้นนี้ว่า วงแหวนฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ซึ่งพื้นที่ภายในวงแหวนฮิสเทอรีซิสนี้คือพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกลไกแรงเสียดทาน สามารถหาพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้ได้โดยการอินทิเกรตผลต่างของสมการที่ (4-3) และ (4-4) ซึ่งเป็นการหาพื้นที่ภายในวงแหวนฮิสเทอรีซิส ผลลัพธ์ที่ได้จากการอินทิเกรตเป็นดังสมการที่ (4-6)

$$\psi = \frac{2M_a^3(1-3k+3k^2)}{3mG_s I_s(1-k)} \quad (4-6)$$

$$M_a = \frac{1}{2}M(1-r), \quad 0 < r < 1 \quad (4-7)$$

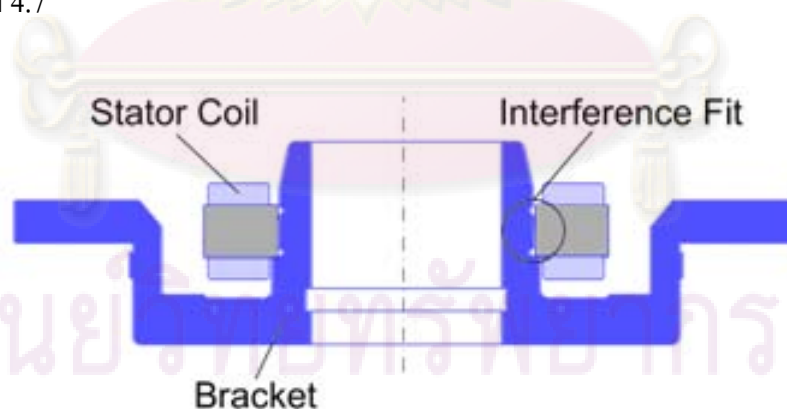
โดย ψ คือ พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกลไกแรงเสียดทาน (Joule)
 M_a คือ แอมพลิจูดของแรงบิดที่กระทำภายนอกทรงกระบอกกลวง (N-m)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (4-6) พบว่าปริมาณของพลังงานสูญเสียจากกลไกแรงเสียดทานนั้นขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของแรงบิดและแรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาว ถ้าแรงบิดที่กระทำด้านนอกของทรงกระบอกกลวงมีค่าคงที่ พลังงานสูญเสียที่บริเวณผิวสัมผัสก็จะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาวเพียงอย่างเดียว แต่จากการสังเกตสมการที่ (4-1) พบว่าแรงเสียดทานแบบแรงบิดต่อหน่วยความยาวจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นสัดส่วนกับความดันที่เกิด

จากการสวมอัตรระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพลาดังนั้นในการวิเคราะห์หาการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านการสั่นสะเทือน โดยการลดขนาด Interference fit ของการสวมอัตรระหว่างทรงกระบอกกลวงและเพล่า จะส่งผลให้ความดันที่เกิดขึ้นจากการสวมอัตรลดลง พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกลไกแรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้การส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากทรงกระบอกกลวงไปสู่เพล่านั้นลดลงตามไปด้วย จากความเข้าใจนี้จะนำไปสู่การออกแบบสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนโดยการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์ เพื่อศึกษาการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและการแพร่ของเสียงที่เกิดขึ้นจริงต่อไป

4.2 การออกแบบสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

การศึกษารายละเอียดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและการแพร่ของเสียงที่เกิดขึ้นจากการทำงานปกติของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้จำกัดขอบเขตของการศึกษาเฉพาะในส่วนของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำไปสู่ฐานมอเตอร์แต่เพียงเท่านั้น โดยพิจารณาจากผลตอบสนองการสั่นสะเทือนเชิงความถี่ด้วยการกระตุ้นทางไฟฟ้าดังแสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 3.2 ทำการทดสอบกับสปินเดิลมอเตอร์ที่ได้มีการออกแบบไว้ โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 บริเวณผิวที่มีการ Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานมอเตอร์

การออกแบบสปินเดิลมอเตอร์สำหรับใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำไปสู่ฐานมอเตอร์ จะใช้สปินเดิลมอเตอร์ประเภท FDB สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของจานดิสก์ขนาด

3.5” โดยมีจำนวนซี่แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร 12 ซี่ และจำนวนช่องว่างของวงแหวนขดลวดเหนียวนำ 9 ช่อง เป็นสปินเดิลมอเตอร์แบบสมมาตรซึ่งหมุนที่ความเร็วรอบ 7200 rpm แบ่งกลุ่มสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างตามการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม A, B และ C ดังแสดงในตารางที่ 4.1 การกำหนดขนาด Interference fit ในแต่ละกลุ่ม พิจารณาจากค่าสูงสุดและต่ำสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานมอเตอร์ในบริเวณที่มีการ Interference fit เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนขดลวดเหนียวนำที่ใช้ในการประกอบสปินเดิลมอเตอร์ทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0-37 μm ซึ่งกลุ่ม A, B และ C สามารถคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับค่าสูงสุดได้เท่ากับ 0-15%, 30-50% และ 70-100% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การแบ่งกลุ่มสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างตามการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit

Group	Interference Fit (μm)	Number of Sample Motor
A	0-5.5	3
B	11.1-18.5	6
C	25.9-37	3

สปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างกลุ่ม A เป็นกลุ่มที่มีความแน่นของการสวมอัดระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์น้อยที่สุด สำหรับกลุ่ม B และ C จะมีความแน่นของการสวมอัดเพิ่มขึ้นตามลำดับ ในกลุ่ม B จะมีสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง นอกจากนี้สปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบมีฐานมอเตอร์แตกต่างกันสองแบบ โดยฐานมอเตอร์แบบที่ 1 เป็นของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างทั้งหมดทุกตัวของกลุ่ม A และในกลุ่ม B เฉพาะที่ตัว B4, B5 และ B6 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) และฐานมอเตอร์แบบที่ 2 เป็นของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างในส่วนที่เหลือของกลุ่ม B และทั้งหมดทุกตัวของกลุ่ม C ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) น้ำหนักโดยรวมของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 53.1 และ 51.1 grams ตามลำดับ ในส่วนของการประกอบวงแหวนขดลวดเหนียวนำเข้ากับฐานมอเตอร์ แรงที่ใช้ในการกดอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 200-230 kgf หรือประมาณ 1960-2260 N สำหรับรายละเอียดของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างในแต่ละกลุ่มแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาด Interference fit ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างในแต่ละกลุ่ม

Group	Bracket Type 1		Group	Bracket Type 2	
	Sample Motor	Interference Fit (μm)		Sample Motor	Interference Fit (μm)
A	A1	4	B	B1	18
	A2	5		B2	16
	A3	5		B3	18
B	B4	15	C	C1	32
	B5	17		C2	34
	B6	13		C3	34

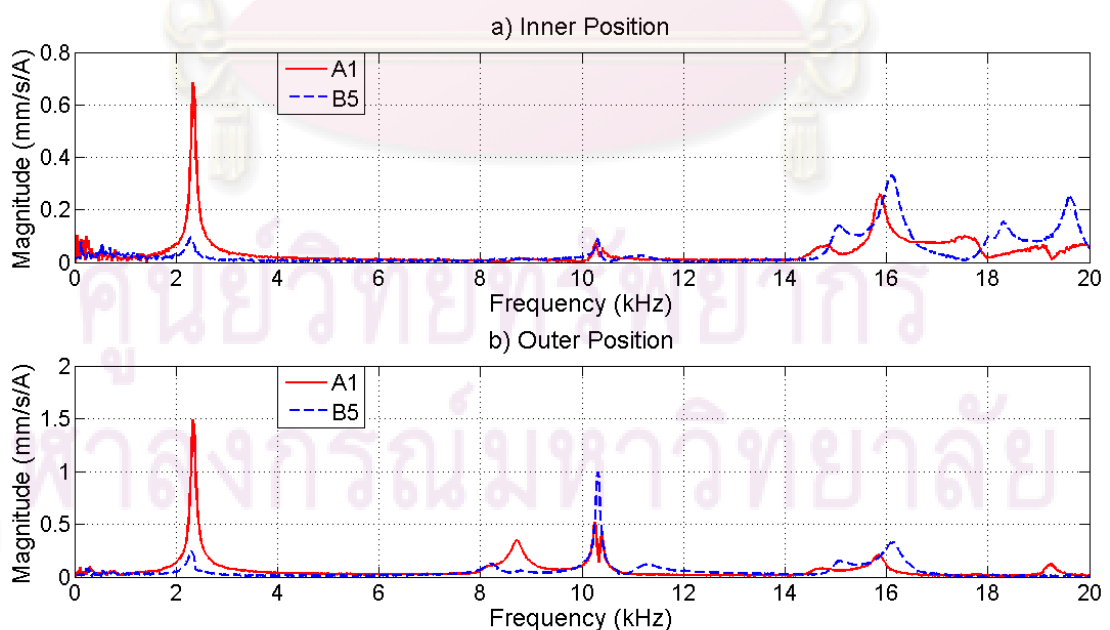


รูปที่ 4.8 ลักษณะของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่มีฐานมอเตอร์ (ก) แบบที่ 1 (ข) แบบที่ 2

4.3 ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนเชิงความถี่ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit

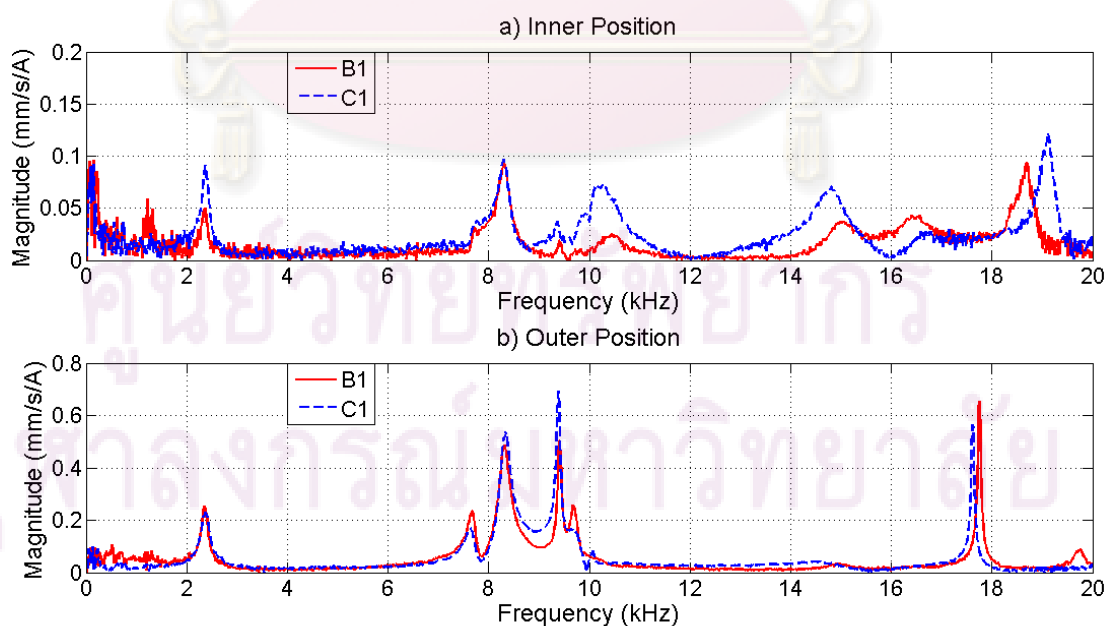
ในการศึกษานี้จะทำการทดสอบการสั่นสะเทือน โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้ากับสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อเปรียบเทียบแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่มีขนาด Interference fit ต่างกัน เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาได้มุ่งหวังไปที่การลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนและเสียง ผ่านกลไกแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของมอเตอร์ที่มีการ Interference fit เกิดขึ้น ทำการทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 500 mV แบบปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 0-20 kHz ให้กับ

วงแหวนขดลวดเหนียวหนาเพียง 1 เฟส วัตถุประสงค์เพื่อทดสอบที่ฐานมอเตอร์ในทิศทาง Transverse โดยใช้ LDV ในการทดสอบกำหนดให้มุมสัมพัทธ์ระหว่างขั้วเหนือของแม่เหล็กถาวรที่ติดอยู่กับชุดโรเตอร์นั้นอยู่ในตำแหน่งเอียงกันกับเฟสที่ถูกกระตุ้นของวงแหวนขดลวดเหนียวหนา เพื่อให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมกระทำกับวงแหวนขดลวดเหนียวหนา เป็นแรงที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานส่งผ่าน ไปสู่ฐานมอเตอร์ ซึ่งได้อธิบายการส่งผ่านการสั่นสะเทือนนี้ไว้ในหัวข้อที่ 3.1 สำหรับวิธีการตรวจสอบตำแหน่งของมุมสัมพัทธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวหนา และขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร สามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ค และแบ่งการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์ตัวอย่างกลุ่ม A และ B ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 1 และส่วนที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์ตัวอย่างกลุ่ม B และ C ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 2 โดยจะนำเสนอการเปรียบเทียบของสปีนเดิลมอเตอร์ตัวอย่างระหว่าง A1 กับ B5 และการเปรียบเทียบระหว่าง B1 กับ C1 ซึ่งสปีนเดิลมอเตอร์ตัวอย่างของแต่ละกลุ่มที่นำมาเปรียบเทียบนั้น มีรูปแบบของโหมดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเหมือนกับมอเตอร์ตัวอื่นๆที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน จึงนำมาเปรียบเทียบเฉพาะตัวที่เห็นการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเชิงความถี่อย่างชัดเจนเท่านั้น และจากผลตอบสนองเชิงความถี่ที่พบในสปีนเดิลมอเตอร์ที่มีฐานมอเตอร์ทั้งสองแบบ สามารถแบ่งกลุ่มโหมดการสั่นสะเทือนเช่นเดียวกับที่พบในสปีนเดิลมอเตอร์ตัวอย่างในหัวข้อที่ 3.4 ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ที่โหมดการสั่นสะเทือน 2.34 kHz กลุ่มที่ 2 ในช่วงความถี่ 7-12 kHz และกลุ่มที่ 3 ในช่วงความถี่ 14-20 kHz



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปีนเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A1 เทียบกับ B5

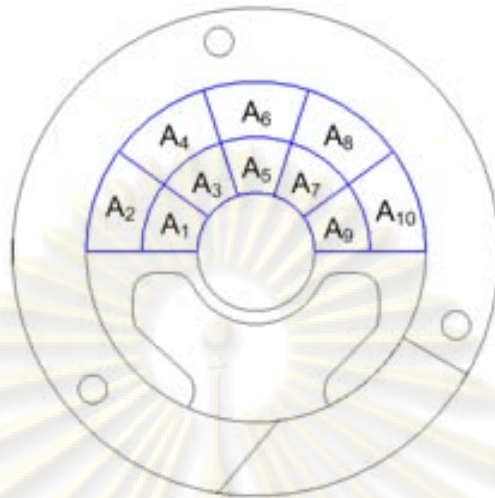
การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของมอเตอร์ตัวอย่าง A1 กับ B5 ที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับแกนกลางและใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์แสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งมีขนาด Interference fit เท่ากับ $4\ \mu\text{m}$ และ $17\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ จากการสังเกตแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 1 และ 2 นั้น พบว่ามอเตอร์ A1 มีระดับการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ B5 อย่างเห็นได้ชัดจากการวัดการสั่นสะเทือนทั้งสองตำแหน่ง โดยโหมดการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 2 นั้น มอเตอร์ A1 มีโหมดการสั่นสะเทือนที่มีแอมพลิจูดเด่นชัดถึง 3 โหมดจากการวัดที่บริเวณใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์ ซึ่งพบใน B5 เพียงแค่ 1 โหมดเท่านั้น นั่นคือที่ความถี่ $10.31\ \text{kHz}$ แต่สำหรับโหมดการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 3 พบว่ามอเตอร์ B5 มีระดับการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ A1 จากการวัดการสั่นสะเทือนทั้งสองตำแหน่ง และโหมดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ B5 นั้นมีการเลื่อนตำแหน่งสูงขึ้นกว่าโหมดการสั่นสะเทือนที่พบในมอเตอร์ A1 จึงสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 1 ระดับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ $0\text{--}12\ \text{kHz}$ จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาด Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์นั้นลดลง สำหรับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ $14\text{--}20\ \text{kHz}$ นั้น การลดขนาด Interference fit สามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้ แต่เนื่องจากผลที่นำมาแสดงนั้นเป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดขึ้นบนฐานมอเตอร์เพียงแค่ 2 ตำแหน่งเท่านั้นจากการวัดการสั่นสะเทือนทั้งหมด 10 ตำแหน่ง จึงยังไม่สามารถบอกได้อย่างแน่ชัดว่าการลดขนาด Interference fit นั้นสามารถลดระดับการสั่นสะเทือนโดยรวมลงได้



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 เทียบกับ C1

การเปรียบเทียบผลตอบสนองการสั่นสะเทือนเชิงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 กับ C1 ของการวัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับแกนกลางและใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์ แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งมีขนาด Interference fit เท่ากับ $18 \mu\text{m}$ และ $32 \mu\text{m}$ ตามลำดับ สำหรับโหมดการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 1 พบว่ามอเตอร์ C1 มีแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ B1 จากการวัดที่บริเวณใกล้กับแกนกลางของฐานมอเตอร์ แต่ในบริเวณที่ใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์กลับไม่เป็นเช่นนั้น สำหรับโหมดการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 2 จะเห็นว่ามอเตอร์ C1 มีระดับการสั่นสะเทือนโดยรวมสูงกว่ามอเตอร์ B1 จากการวัดทั้งสองตำแหน่ง สำหรับโหมดการสั่นสะเทือนในกลุ่มสุดท้าย พบโหมดการสั่นสะเทือนที่เด่นชัดจากการวัดทั้งสองตำแหน่ง แต่จะพบโหมดที่ 19.74 kHz เกิดขึ้นในผลตอบสนองเชิงความถี่ของมอเตอร์ B1 จากการวัดที่บริเวณใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์ ซึ่งจะไม่พบโหมดที่ใกล้เคียงกันนี้เกิดขึ้นในมอเตอร์ C1 ในช่วงความถี่นี้จะสังเกตเห็นว่าโหมดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit เมื่อพิจารณาระดับแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนโดยรวม พบว่ามอเตอร์ C1 มีระดับการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ B1 จากการวัดที่บริเวณใกล้กับแกนกลางของฐานมอเตอร์ แต่จากการวัดที่บริเวณใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์กลับพบว่า โหมดที่มีลักษณะเป็นยอดแหลมของมอเตอร์ B1 มีแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ C1 ก่อนข้างชัดเจน ดังนั้นการลดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ฐานมอเตอร์โดยการลดขนาด Interference fit จึงยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัด

จากการพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างทั้งสามกลุ่ม พบว่าการลดขนาด Interference fit ยังไม่สามารถลดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ได้แน่ชัด แต่เนื่องจากผลตอบสนองเชิงความถี่ที่นำมาแสดงนั้น เป็นเพียงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนในบางตำแหน่งของการวัดเท่านั้น ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบการสั่นสะเทือน พบว่าการวัดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเดียวกันของมอเตอร์แต่ละตัวนั้น ให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกันพอสมควร การนำผลการวัดในแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกันโดยตรง อาจจะทำให้ไม่สามารถสรุปผลได้ถูกต้อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พิจารณาหาวิธีการที่สามารถเปรียบเทียบผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ฐานมอเตอร์ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยการใช้ค่าเฉลี่ยความเร็วของแต่ละจุดบนพื้นที่ใดๆ (Spatial average velocity) [17] ในการหาพลังงานของการสั่นสะเทือนเฉลี่ยโดยรวมที่เกิดขึ้นบนฐานมอเตอร์ ซึ่งเป็นพลังงานของการสั่นสะเทือนที่จะทำให้ฐานมอเตอร์สามารถแพร่ออกมาเป็นเสียงได้ ค่าเฉลี่ยความเร็วนี้สามารถหาได้จากผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้ทำการทดลองมาแล้ว



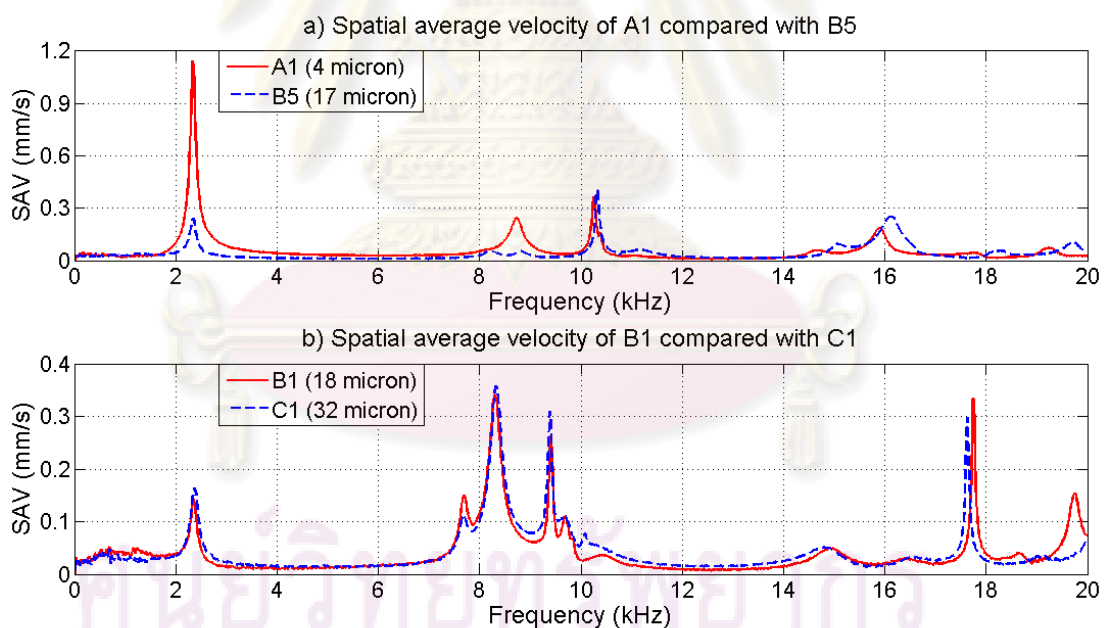
รูปที่ 4.11 การแบ่งพื้นที่บนฐานมอเตอร์สำหรับการวิเคราะห์หา Spatial average velocity

ในการวิเคราะห์หา Spatial average velocity ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของฐานมอเตอร์ ทำโดยวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนฐานมอเตอร์ทั้งหมด 10 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ก) ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้นั้นจะอยู่ในรูปของความถี่ของการสั่นสะเทือนที่พื้นผิวนั้นต่อกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือน แต่เนื่องจากการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าเป็นกระตุ้นด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ เมื่อนำผลตอบสนองเชิงความถี่มาคูณด้วยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้น ก็จะได้ความเร็วของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวนั้น และทำการเฉลี่ยความเร็วที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ของจุดนั้นๆ สำหรับการแบ่งพื้นที่บนฐานมอเตอร์แสดงในรูปที่ 4.11 ดังนั้นจะสามารถคำนวณหา Spatial average velocity ได้จากสมการที่ (4-8)

$$\hat{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i A_i}{A_{total}} \quad (4-8)$$

โดย	\hat{v}	คือ	Spatial average velocity (mm/s)
	v_i	คือ	ความเร็วของการสั่นสะเทือนบนพื้นผิวใดๆ (mm/s)
	A_i	คือ	พื้นที่ผิวของจุดวัดการสั่นสะเทือนใดๆ (m ²)
	A_{total}	คือ	พื้นที่ผิวรวมของจุดวัดการสั่นสะเทือนทั้งหมดบนฐานมอเตอร์ (m ²)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (4-8) จะอยู่ในรูปของความถี่เฉลี่ยของการสั่นสะเทือนบนพื้นผิวของฐานมอเตอร์ในช่วงความถี่ 0-20 kHz และเพื่อให้สามารถชี้ชัดไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit มีผลต่อการเพิ่มหรือลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ฐานมอเตอร์ในแต่ละกลุ่มของโหมดการสั่นสะเทือนอย่างไร จะพิจารณาโดยใช้วิธี Energy spectral density [18] ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณใดๆบนโดเมนความถี่เพื่อหาพลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่นั้น แต่เนื่องจากผลการทดสอบการสั่นสะเทือนที่มีอยู่เป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่อยู่ในรูปของสัญญาณแบบความเร็ว จึงได้นำวิธีการนี้มาปรับใช้ให้เหมาะสม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนั้น ไม่ใช่พลังงานของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงบนฐานมอเตอร์ แต่ก็มีความสัมพันธ์กับพลังงานของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงด้วยเช่นกัน จึงใช้เป็นแนวทางในการเปรียบเทียบพลังงานการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแต่ละกลุ่มของโหมดการสั่นสะเทือน เนื่องจากโหมดการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างบางโหมดในแต่ละกลุ่ม Interference fit นั้นเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างกัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบแอมพลิจูดในแต่ละโหมดได้



รูปที่ 4.12 Spatial average velocity ที่ฐานมอเตอร์ a) สปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A1 เทียบกับ B5 และ b) สปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 เทียบกับ C1

การเปรียบเทียบ Spatial average velocity ที่ฐานมอเตอร์ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A1 เทียบกับ B5 ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.12 a) และมอเตอร์ B1 เทียบกับ C1 ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.12 b) สำหรับการเปรียบเทียบของมอเตอร์ A1 และ B5 ที่โหมด

การสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 1 นั้น พบว่ามอเตอร์ A1 มีพลังงานของการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ B5 อย่างชัดเจน สำหรับโหมดการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 2 พลังงานของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ A1 มีค่าสูงกว่า เนื่องจากพบโหมดการสั่นสะเทือนที่มียอดแหลมเด่นชัดถึง 2 โหมด ซึ่งพบในมอเตอร์ B5 เพียงแค่โหมดเดียว แต่สำหรับโหมดการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 3 นั้น มอเตอร์ B5 มีพลังงานของการสั่นสะเทือนสูงกว่ามอเตอร์ A1 ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งเอาไว้ นั่นคือการลดขนาด Interference fit สามารถลดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนลงได้ และจากการสังเกตยังพบอีกว่าโหมดการสั่นสะเทือนของทั้งสองมอเตอร์นั้นมีลักษณะคล้ายกัน แต่โหมดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ B5 นั้นจะมีการเลื่อนตำแหน่งสูงขึ้นกว่ามอเตอร์ A1 เล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขนาด Interference fit ก็เป็นไปได้ สำหรับพลังงานของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในกลุ่มที่ 2 และ 3 นั้น แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พลังงานของการสั่นสะเทือนที่ฐานมอเตอร์ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง

Sample Motor	Vibration Energy ($\mu\text{J-Hz/kg}$)		
	0-20 kHz	7-12 kHz	14-20 kHz
A1	216.47	36.79	18.90
B1	74.54	48.67	18.66
B5	73.19	20.43	40.87
C1	77.58	57.08	11.89

สำหรับการเปรียบเทียบของมอเตอร์ B1 กับ C1 ที่แสดงในรูปที่ 4.12 b) พบว่าพลังงานของการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 1 และ 2 ของมอเตอร์ C1 นั้นมีค่าสูงกว่า B1 ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของการลดแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนโดยการลดขนาด Interference fit แต่สำหรับโหมดการสั่นสะเทือนในกลุ่มสุดท้าย คือช่วงความถี่ 14-20 kHz กลับพบว่าพลังงานของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ B1 สูงกว่า C1 ซึ่งเป็นผลมาจากโหมดการสั่นสะเทือนที่ 17.75 kHz ของมอเตอร์ B1 นั้นมีแอมพลิจูดสูงกว่าโหมดที่ 17.63 kHz ของมอเตอร์ C1 ก่อนข้างชัดเจน อีกทั้งยังพบโหมดที่ 19.74 kHz เกิดขึ้นอย่างเด่นชัดในผลตอบสนองเชิงความถี่ของมอเตอร์ B1 ซึ่งจะไม่พบโหมดนี้เกิดขึ้นในมอเตอร์ C1 แต่จะพบโหมดนี้เกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป โดยจะแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ในช่วงความถี่ 0-25 kHz ในภาคผนวก ก สำหรับค่าพลังงานของการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 2 และ 3 ของมอเตอร์ B1 และ C1 นั้นแสดงในตารางที่ 4.3

จากการพิจารณาถึงพลังงานการสั่นสะเทือนในทุกช่วงความถี่สำหรับสปินเดิลมอเตอร์ ตัวอย่างกลุ่ม A และ B ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 1 สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit นั้นมีผลต่อการเพิ่มและลดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนในทุกช่วงความถี่ กล่าวคือ ในช่วงความถี่ต่ำ ที่โหมค 2.34 kHz และในช่วงความถี่ 7-12 kHz นั้น เมื่อขนาด Interference fit ลดลง จะส่งผลให้แอมพลิจูดของโหมคการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่นี้สูงขึ้นมาก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากขนาดของ Interference fit มีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นในเวลาที่ทำทดสอบการสั่นสะเทือน เมื่อมีแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำกับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ก็จะทำให้วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำนั้นมีการเลื่อนไหลไปบนผิวสัมผัสของฐานมอเตอร์ เป็นผลให้เกิดโหมคการสั่นสะเทือนที่มีแอมพลิจูดเด่นชัดในช่วงความถี่ 0-12 kHz ในกลุ่มสุดท้ายคือในช่วงความถี่ 14-20 kHz การลดขนาด Interference fit นั้นสามารถลดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนลงอย่างเห็นได้ชัด จึงส่งผลให้พลังงานของการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่นี้ลดต่ำลงซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ แต่การเพิ่มขนาด Interference fit ก็ยังมีผลต่อการเลื่อนตำแหน่งของโหมคการสั่นสะเทือนให้สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาแสดงให้เห็นในที่นี้ พบว่าให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับการเปรียบเทียบของมอเตอร์ A1 และ B5

สำหรับการพิจารณาการเปรียบเทียบพลังงานของการสั่นสะเทือนในทุกช่วงความถี่ของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างกลุ่ม B และ C ที่มีฐานแบบที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit นั้นมีผลต่อการเพิ่มและลดแอมพลิจูดของโหมคการสั่นสะเทือนในทุกช่วงความถี่เช่นกัน กล่าวคือ การลดขนาด Interference fit สามารถลดแอมพลิจูดของโหมคการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 1 และ 2 ลงได้ และไม่มีผลต่อเลื่อนตำแหน่งของโหมคการสั่นสะเทือนสำหรับในกลุ่มสุดท้ายในช่วงความถี่ 14-20 kHz พบว่าการลดขนาด Interference fit ไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่นี้ได้ อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ไม่มีผลต่อโหมคการสั่นสะเทือน 17.75 kHz จึงไม่สามารถควบคุมให้แอมพลิจูดของโหมคการสั่นสะเทือนนี้ลดลงได้ แต่การเพิ่มขนาด Interference fit นั้นมีผลต่อการเลื่อนตำแหน่งของโหมคการสั่นสะเทือนให้สูงกว่าในช่วงความถี่ที่สนใจศึกษาคือ 0-20 kHz ได้ สำหรับสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างของกลุ่ม B และ C ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 2 ซึ่งไม่ได้นำมาแสดงให้เห็นในที่นี้ พบว่าให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับการเปรียบเทียบของมอเตอร์ B1 และ C1 เช่นกัน

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit จึงมีทั้งผลดีและผลเสียเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งผลดีสำหรับการเพิ่มขนาด Interference fit ในกรณีของสปินเดิลมอเตอร์ที่มีฐานแบบที่ 2 นั้นคืออาจจะสามารถลดระดับการแพร่ของเสียงในช่วงความถี่ 14-20 kHz ลงได้ เนื่องจากการศึกษาในหัวข้อที่ 3.5 นั้นพบว่า เมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ จะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงและการแพร่ของเสียงที่ดังยิ่งขึ้น แต่ผลเสียที่

ตามมา คือ เกิดการสั่นสะเทือนและการแพร่ของเสียงที่สูงขึ้นในช่วงความถี่ต่ำและในช่วงความถี่ 7-12 kHz แต่จากการพิจารณาผลของสเปกตรัมเสียงที่วัดได้จากการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ ตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม ยังไม่พบว่าการลดขนาด Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์นั้นสามารถลดเสียงที่แพร่ออกจากฐานมอเตอร์ได้อย่างแน่ชัด เนื่องจากการเปรียบเทียบค่าระดับความดันเสียงรวมในทุกช่วงความถี่ของการเกิดเสียงที่สนใจ มอเตอร์บางตัวที่มีขนาด Interference fit น้อยกว่ากลับมีระดับความดันเสียงรวมสูงกว่าในทุกช่วงความถี่ จึงไม่นำการเปรียบเทียบผลการทดสอบเสียงของสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างมาแสดงในการศึกษานี้ เพราะฉะนั้นเสียงที่แพร่ออกจากสปินเดิลมอเตอร์จึงอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้ในงานวิจัยนี้เป็นหลัก เช่น แม่เหล็กถาวรที่มีรูปทรงไม่สมมาตร หรือการพันขดลวดเหนียวนำที่ไม่ได้ตามมาตรฐานของการผลิต ทั้งสองสาเหตุนี้จะส่งผลให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบวงแหวนเหนียวนำในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน เป็นผลให้เกิดการหมุนที่ไม่ราบเรียบของชุดโรเตอร์ ซึ่งจะเหนียวนำให้เกิดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวโครงสร้างด้านนอกและแพร่ไปสู่เสียงต่อไป และยังมีอีกหลายสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนและการแพร่ของเสียงขึ้น ซึ่งอาจจะมีการศึกษาและค้นคว้าแนวทางการลดเสียงเพื่อให้ได้ผลเป็นที่แน่ชัดของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในการศึกษาครั้งต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาการสั่นสะเทือนและเสียงของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นี้ ได้นำเสนอวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบโมดอลด้วยการกระตุ้นที่เหมาะสมกับสปินเดิลมอเตอร์ขนาดเล็ก เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียง และศึกษาแนวทางการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากภายในโครงสร้างไปสู่ผิวด้านนอก โดยจำกัดไปที่การเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์ ซึ่งได้ดำเนินการศึกษาตามขอบเขตของงานวิจัยมาครบถ้วน จากผลการศึกษาที่พบนั้นสามารถสรุปรายละเอียดที่เป็นประเด็นสำคัญได้ดังนี้

ส่วนแรกนั้นได้ทำการศึกษาวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบ โมดอลด้วยวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมกับสปินเดิลมอเตอร์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียง ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการกระตุ้นทางกลโดยใช้ค้อนเคาะและการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหมาะสมกับการทดสอบการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์มากกว่าการกระตุ้นทางกล เนื่องจากให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เด่นชัดและจำนวนโหมดการสั่นสะเทือนที่พบครบถ้วนสมบูรณ์ตลอดช่วงความถี่ 0-20 kHz เพราะจากผลของการกระตุ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในขณะมอเตอร์หมุน รวมไปถึงการเลือกใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนนั้น ยังมีผลกับผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอีกด้วย กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการใช้ทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่งและ Laser doppler vibrometer (LDV) พบว่าในกรณีของมอเตอร์ขนาดเล็กควรเลือกใช้ LDV เนื่องจากให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เด่นชัดครอบคลุมในช่วงความถี่ที่สามารถได้ยินเสียงคือ 20 Hz-20 kHz โดยที่เครื่องมือวัดไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงาน โดยตรง จึงสามารถวัดการสั่นสะเทือนได้ทุกตำแหน่งและทิศทาง ซึ่งถือเป็นข้อจัดของทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่งซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับสปินเดิลมอเตอร์ และจะต้องติดตั้งบนชิ้นงานเพื่อวัดการสั่นสะเทือนโดยตรง ดังนั้นการทดสอบแบบ โมดอล โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและวัดการสั่นสะเทือนด้วย LDV จึงเหมาะสมกับการศึกษาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีขนาดจานดิสก์ 3.5" ทั่วไป

ในส่วนถัดมาเป็นการศึกษาโหมคการสันสะเทือนและการแพร่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์ โดยพิจารณาจากผลตอบสนองเชิงความถี่ในช่วงความถี่ 0-20 kHz สามารถแบ่งกลุ่มโหมคการสันสะเทือนออกได้เป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มที่มีโหมคการสันสะเทือนเด่นชัดเพียงโหมคเดียว นั่นคือที่ 2.5 kHz ส่วนกลุ่มที่ 2 นั้นอยู่ในช่วงความถี่ 7-12 kHz เป็นกลุ่มที่มีโหมคการสันสะเทือนอยู่อย่างหนาแน่นและเด่นชัดที่สุด และกลุ่มสุดท้ายคือโหมคการสันสะเทือนที่อยู่ในช่วงความถี่ 14-20 kHz เป็นกลุ่มที่มีโหมคการสันสะเทือนไม่เด่นชัดมากนัก แต่ก็พบจำนวนโหมคมาก เมื่อพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่เปรียบเทียบกับสเปคตรัมเสียง พบว่าโหมคการสันสะเทือนในแต่ละกลุ่มนั้นมีค่าใกล้เคียงกับยอดแหลมที่พบในสเปคตรัมเสียง โดยเฉพาะในกลุ่มที่ 2 และ 3 นั้นเป็นกลุ่มที่มียอดแหลมของเสียงที่เด่นชัด นั้นหมายความว่าโหมคการสันสะเทือนเหล่านี้เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการแพร่ของเสียงที่ดังยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 14-20 kHz ของสเปคตรัมเสียงพบว่าเป็นช่วงที่มีระดับกำลังเสียงสูงที่สุด ดังนั้นการสันสะเทือนที่มีผลต่อเสียงที่แพร่ออกมาจากสปินเดิลมอเตอร์มากที่สุดจึงเป็นผลมาจากโหมคการสันสะเทือนในกลุ่มที่ 3 นั่นคือในช่วงความถี่ 14-20 kHz

ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาแนวทางการลดการส่งผ่านการสันสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนียวนำไปสู่ฐานมอเตอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ได้ดำเนินการศึกษาเบื้องต้นจากแบบจำลองกลไกแรงเสียดทานอย่างง่าย และเมื่อเข้าใจถึงพฤติกรรมของการส่งผ่านการสันสะเทือนแล้วจึงทำการทดสอบการสันสะเทือนกับมอเตอร์จริง สำหรับการวิเคราะห์จากแบบจำลองกลไกแรงเสียดทานเพื่อหาการสูญเสียพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและฐานมอเตอร์ พบว่าเมื่อขนาด Interference fit ลดลง เป็นผลให้พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น ทำให้การส่งผ่านการสันสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนียวนำมาสู่ฐานของมอเตอร์ลดลง และเมื่อทำการทดสอบการสันสะเทือนกับสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่างที่มีฐานมอเตอร์แตกต่างกัน 2 แบบ และมีการแบ่งกลุ่มตามการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit เพื่อยืนยันความถูกต้องของแนวทางการลดการสันสะเทือน สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit สามารถลดการสันสะเทือนที่ฐานมอเตอร์ลงได้ในบางช่วงความถี่ กล่าวคือ การลดขนาด Interference fit สำหรับสปินเดิลมอเตอร์ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 1 สามารถลดการสันสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 14-20 kHz แต่จะส่งผลให้แอมพลิจูดของโหมคการสันสะเทือนในกลุ่มที่ 1 และ 2 นั้นมีค่าสูงขึ้น และสำหรับสปินเดิลมอเตอร์ที่มีฐานมอเตอร์แบบที่ 2 พบว่าการลดขนาด Interference fit สามารถลดการสันสะเทือนที่เกิดขึ้นได้ แต่พบว่ามีบางโหมคการสันสะเทือนในกลุ่มที่ 3 นั้น การเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ไม่มีผลต่อการลดแอมพลิจูดของโหมคการสันสะเทือนนั้นให้ลดลงได้ แต่จากการสังเกตยังพบว่าการเพิ่มขนาด Interference fit สามารถเลื่อนตำแหน่งการเกิดโหมคการสันสะเทือนให้สูงขึ้นนอกเหนือช่วงความถี่

0-20 kHz ในกรณีของมอเตอร์ที่มีฐานมอเตอร์แตกต่างกัน 2 แบบ ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนจากผลตอบสนองเชิงความถี่ในช่วงความถี่ 14-20 kHz ดังนั้นถ้าเลื่อนตำแหน่งการเกิดโหมดการสั่นสะเทือนในกลุ่มที่ 3 ให้สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป ก็จะสามารถลดการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 14-20 kHz ลงได้ แต่การเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit ยังไม่พบว่าสามารถลดการแพร่ของเสียงที่ออกมาจากสปินเดิลมอเตอร์ได้อย่างแน่ชัด เพราะยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนและการแพร่ของเสียงซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ในงานวิจัยนี้

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

สิ่งที่ได้รับจากงานวิจัยนี้คือวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปปรับใช้ได้กับมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กลงไปได้อย่างเหมาะสม เช่น การทดสอบการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีขนาดจานดิสก์ 2.5" ทัวไป ให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโหมดการสั่นสะเทือนอย่างเด่นชัดครบถ้วนสมบูรณ์ตลอดช่วงความถี่ 0-20 kHz

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ยังมีประเด็นที่น่าสนใจในการดำเนินการศึกษาต่อไปเกี่ยวกับการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนียวนำไปสู่ฐานมอเตอร์ สามารถแบ่งประเด็นที่น่าสนใจศึกษาออกได้เป็น 2 ส่วน กล่าวคือ ในส่วนแรกเกี่ยวกับการวิเคราะห์ถึงแหล่งกำเนิดหลักของการสั่นสะเทือน นั่นคือปริมาณของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับวงแหวนขดลวดเหนียวในแต่ละทิศทางในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ซึ่งจะทำให้สามารถทำนายถึงปริมาณของการสูญเสียพลังงานจากกลไกแรงเสียดทานที่บริเวณผิวสัมผัสรวมไปถึงการส่งผ่านการสั่นสะเทือนให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงได้ และในส่วนที่ 2 เนื่องจากในสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในงานจริงนั้น มีการหยอดกาวที่บริเวณผิว Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวและฐานมอเตอร์ ดังนั้นในการศึกษาการลดการสั่นสะเทือนที่ฐานมอเตอร์จึงควรพิจารณาผลของกาวที่มีต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนเข้าไปด้วย ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและเสียงใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Ajavakom, N., and Sillapapinij, A. Analysis of electrically excited vibration modes and acoustic noise in a FDB spindle motor. ASME information storage and processing system conference, Santa Clara, California (June 2007): 258-60.
- [2] Zhu, Z. Q., and Howe, D. Electromagnetic noise radiated by brushless permanent magnet DC drives. The 6th International Conference on Electrical Machines and Drives (September 1993): 606-11.
- [3] Beranek, LL., and Ver, IL. Noise and vibration control engineering: principles and applications. New York: Wiley, 1992.
- [4] Bi, Ci.; Jiang, Q.; Lin, S.; Low, TS.; and Mamun, AA. Reduction of acoustic noise in FDB spindle motors by using drive technology. IEEE Transactions on Magnetics 39 (2003): 800-5.
- [5] Ajavakom, N.; Jintanawan, T.; Singhatanadgid, P.; and Sripakagorn, P. On investigation of vibro-acoustics of FDB spindle motor for hard disk drives. Microsystem technologies (2006): DOI 10.1007/s00542-006-0372-z.
- [6] Wang, C. Vibro-acoustic analysis of inverter driven induction motors. Dissertation of doctor philosophy, School of Aerospace and Mechanical Engineering University College, The University of New South Wales, 1998.
- [7] Colby, R. S.; Mottier, F. M.; and Millow, T. J. E. Vibration modes and acoustic noise in a four-phase switched reluctance motor. IEEE Transactions on Industry Applications 32 (1996): 1357-64.
- [8] Cameron, D. E.; Lang, J. H.; and Umans, S. D. The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors. IEEE Transactions on Industry Applications 28 (1992): 1250-5.
- [9] Hartman, A., and Lorimer, W. Undriven vibrations in brushless DC motors. IEEE Transactions on Magnetics 37 (2001): 789-92.

- [10] Jintanawan, T.; Chungphaisan, K.; Liwcharoenchai, K.; Junkaew, P.; and Singhatanagid, P. Role of stator-base interference fit on vibration transmission and acoustic noise in FDB spindle motors for HDD. ASME information storage and processing system conference, Santa Clara, California (June 2007): 261-3.
- [11] Olsson, H.; Åström, K. J.; DE Wit, C. C.; GÄFVERT, M.; and Lischinsky, P. models and friction compensation. European J. on Control (1997).
- [12] 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.
- [13] Singhatanadgid, P., and Ungbhakorn V. Scaling laws for buckling of polar orthotropic annular plates subjected to compressive and torsional loading. Thin-Walled Structures 43 (July 2005): 1115-29.
- [14] Peterson, A., and Gross, E. Handbook of noise measurement. 6th ed. Massachusetts: General Radio Company, 1967.
- [15] Ewins, D. J. Modal testing : theory, practice and application 2nd ed. Baldock: Research Studies Press, 2000.
- [16] Osinski, Z. Damping of vibrations Rotterdam: A.A. Balkema, 1998.
- [17] Lyon, R. H. Statistical energy analysis of dynamical systems: theory and application Cambridge, MA: MIT Press, 1975.
- [18] Norton, M. P. Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [19] Agilent 35670A Supplemental operator's guide Agilent Technologies.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



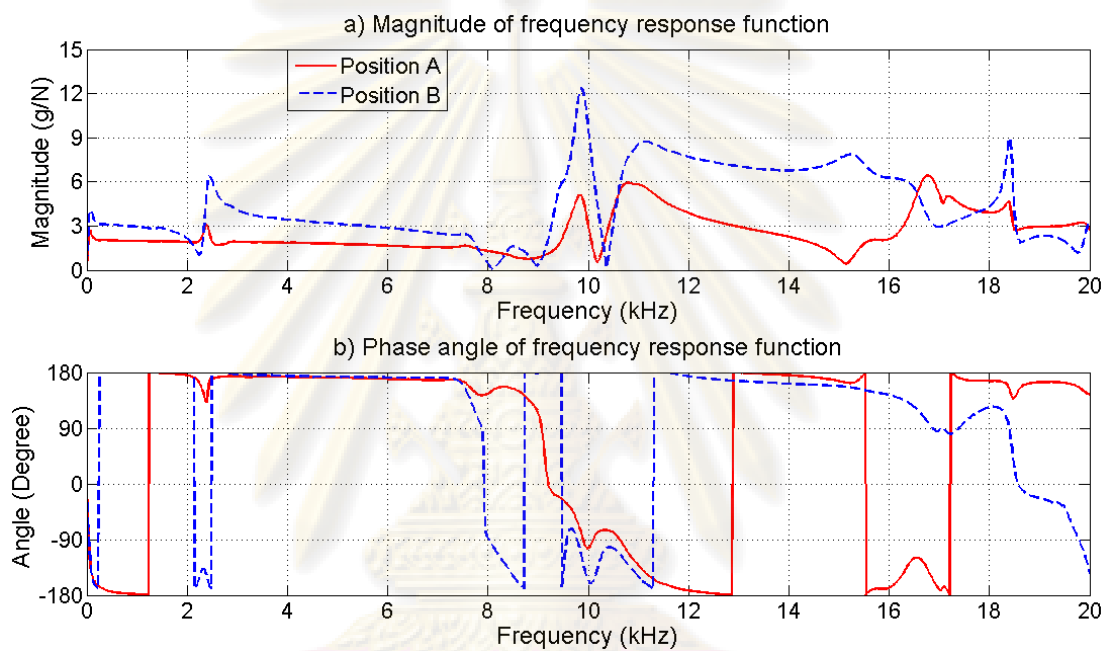
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

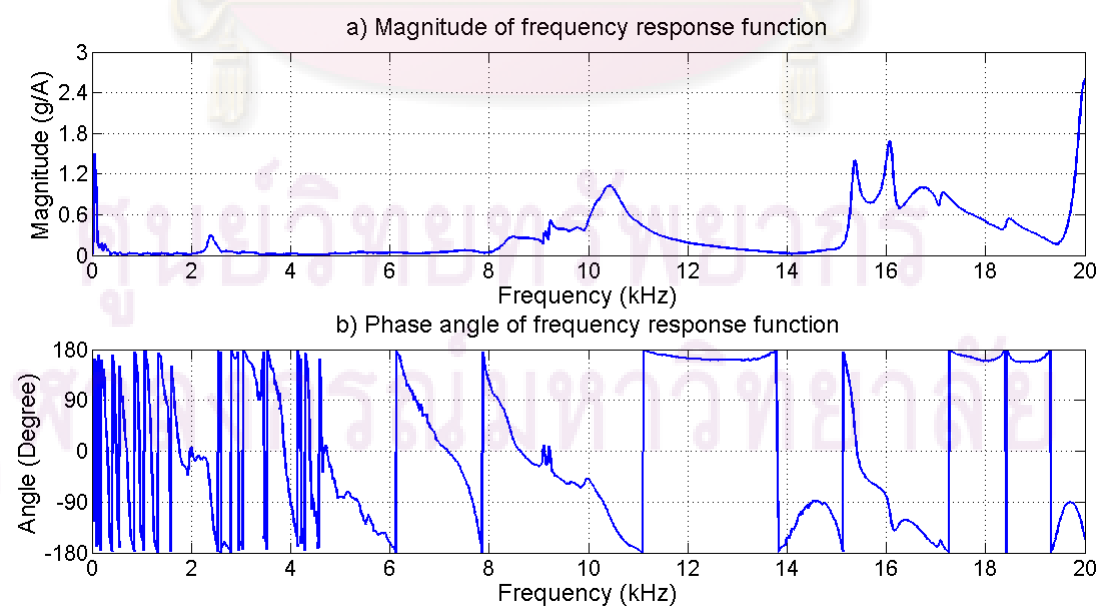
ภาคผนวก ก

ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของสปริงเดลมอเตอร์

รูปที่ ก-1 และ ก-2 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้าระหว่างแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนและมุมเฟส เพื่อใช้ระบุถึงตำแหน่งของโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 0-20 kHz ซึ่งเกี่ยวข้องกับหัวข้อที่ 3.2

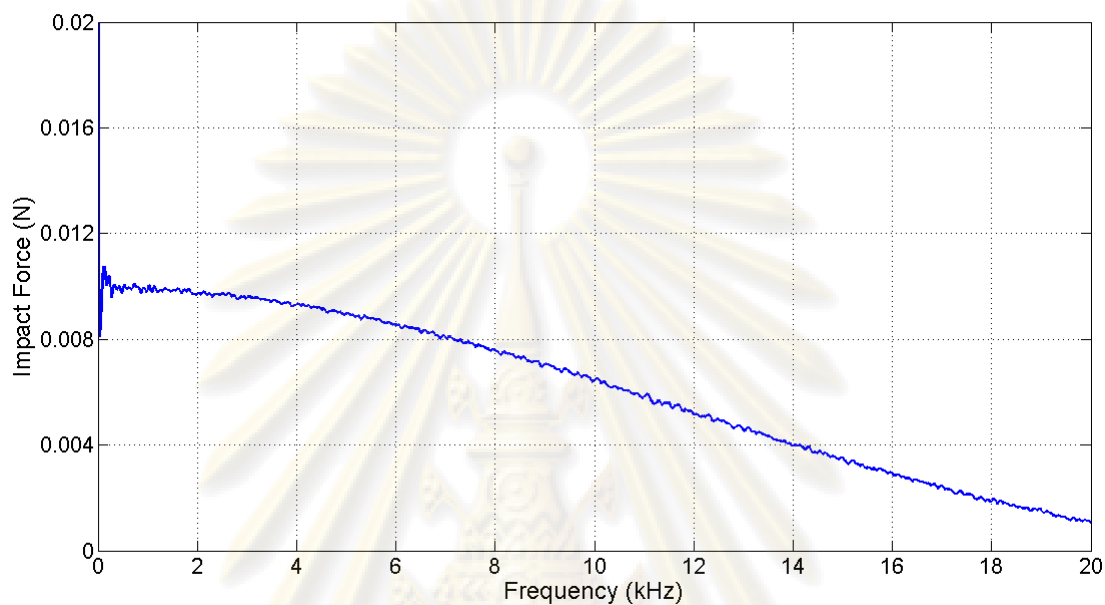


รูปที่ ก-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของการกระตุ้นทางกล

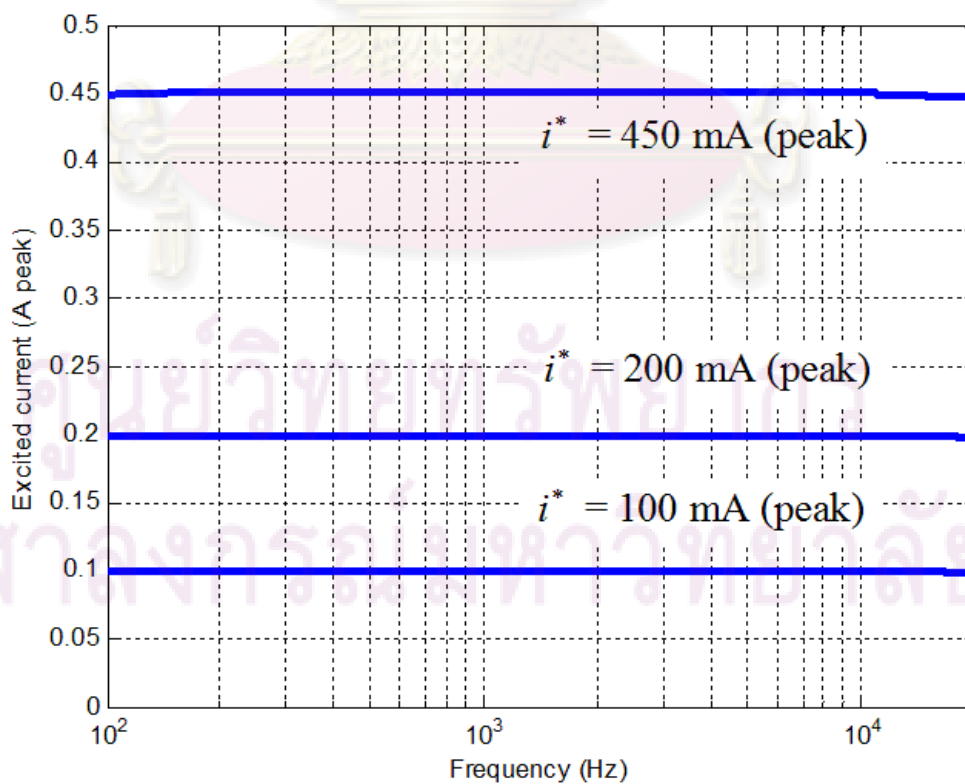


รูปที่ ก-2 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของการกระตุ้นทางไฟฟ้า

รูปที่ ก-3 และ ก-4 แสดงลักษณะของสเปกตรัมที่ใช้ในการกระตุ้นการสั่นสะเทือนระหว่างการกระตุ้นทางกลและการกระตุ้นทางไฟฟ้าในช่วงความถี่ 0-20 kHz ซึ่งเกี่ยวข้องกับหัวข้อที่ 3.2

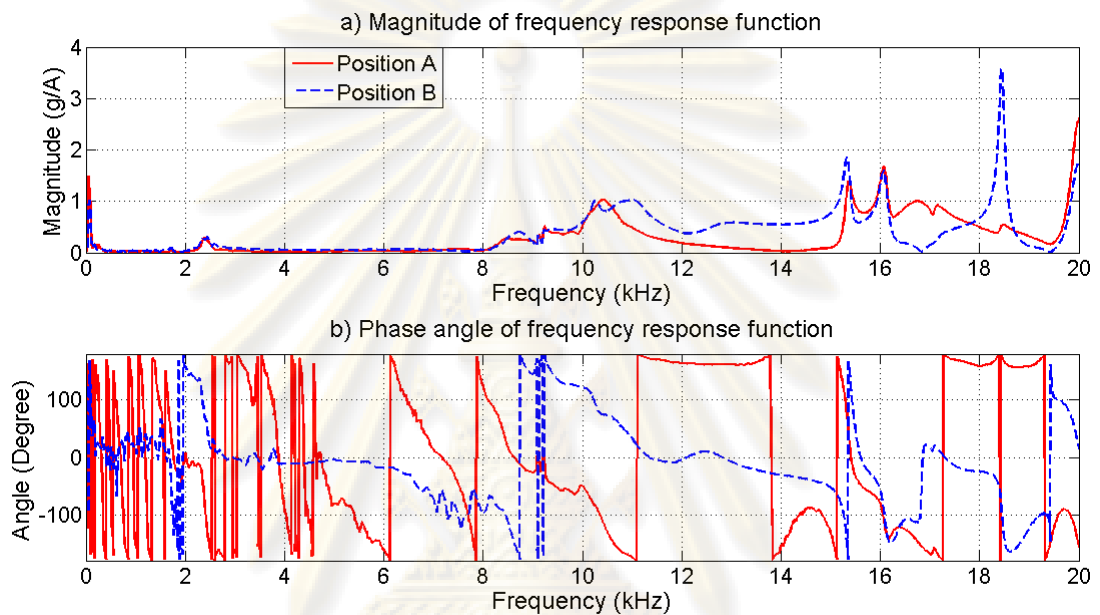


รูปที่ ก-3 สเปกตรัมของค้อนเคาะที่ใช้ในการกระตุ้นการสั่นสะเทือน

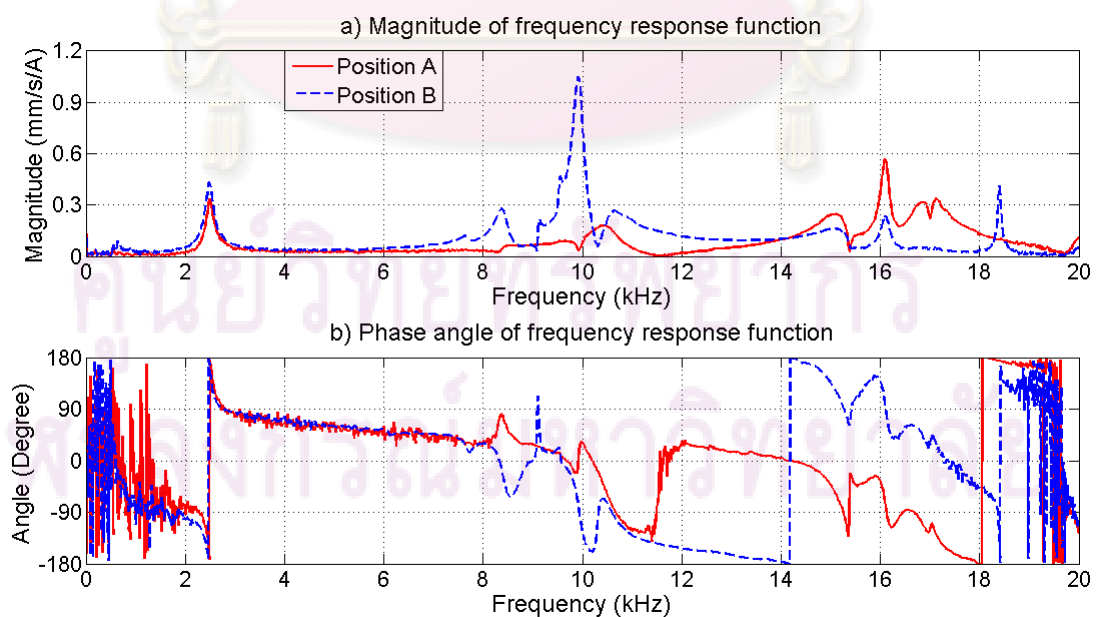


รูปที่ ก-4 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นการสั่นสะเทือน

รูปที่ ก-5 และ ก-6 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนด้วยทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่งและ Laser doppler vibrometer แสดงผลระหว่างแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนและมุมเฟส เพื่อระบุตำแหน่งโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 0-20 kHz ซึ่งเกี่ยวข้องกับในหัวข้อที่ 4.3

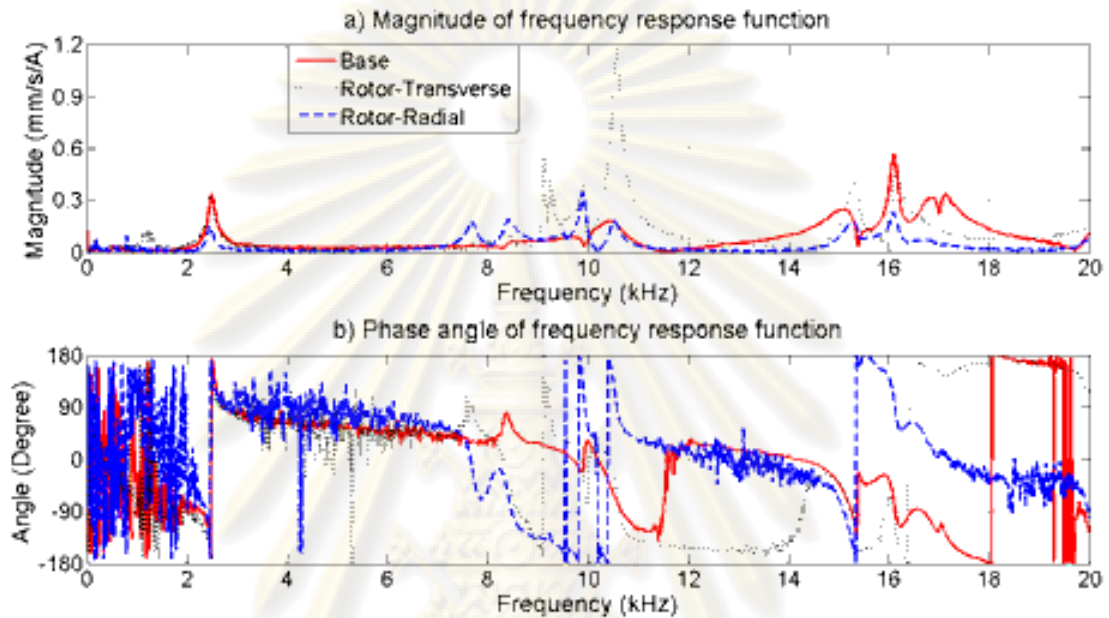


รูปที่ ก-5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการวัดด้วยทรานส์ดิวเซอร์แบบวัดความเร่ง

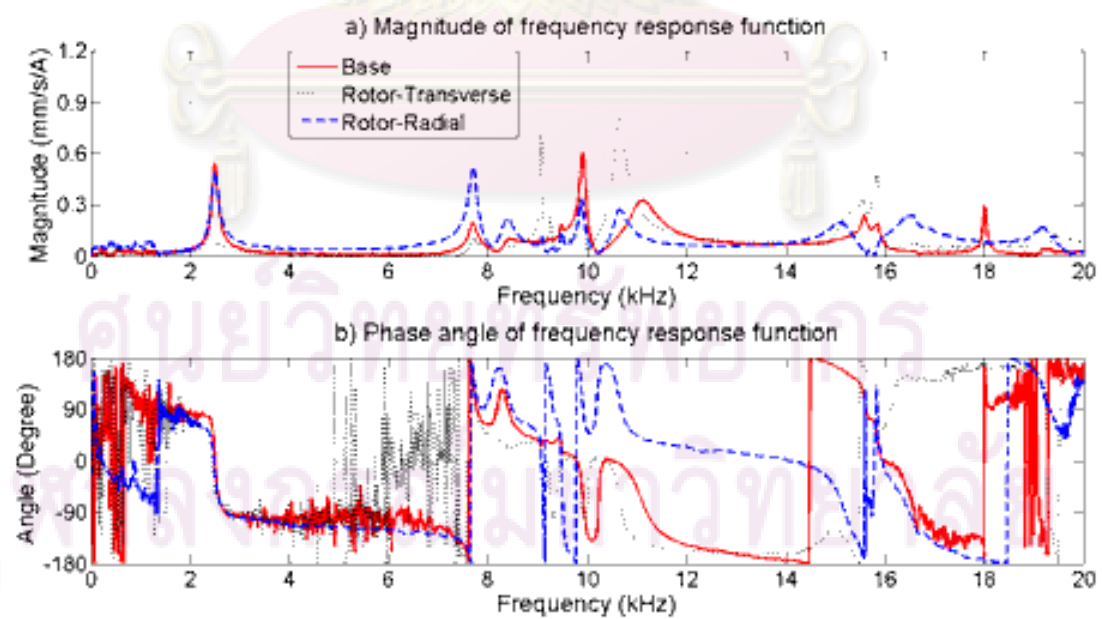


รูปที่ ก-6 ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการวัดด้วย Laser doppler vibrometer

รูปที่ ก-7 และ ก-8 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปีนเดลมอเตอร์ตัวอย่าง A และ B ระหว่างแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนและมุมเฟส เพื่อระบุตำแหน่งของโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ฐานมอเตอร์และชุดโรเตอร์ในช่วงความถี่ 0-20 kHz ซึ่งเกี่ยวข้องกับในหัวข้อที่ 3.4

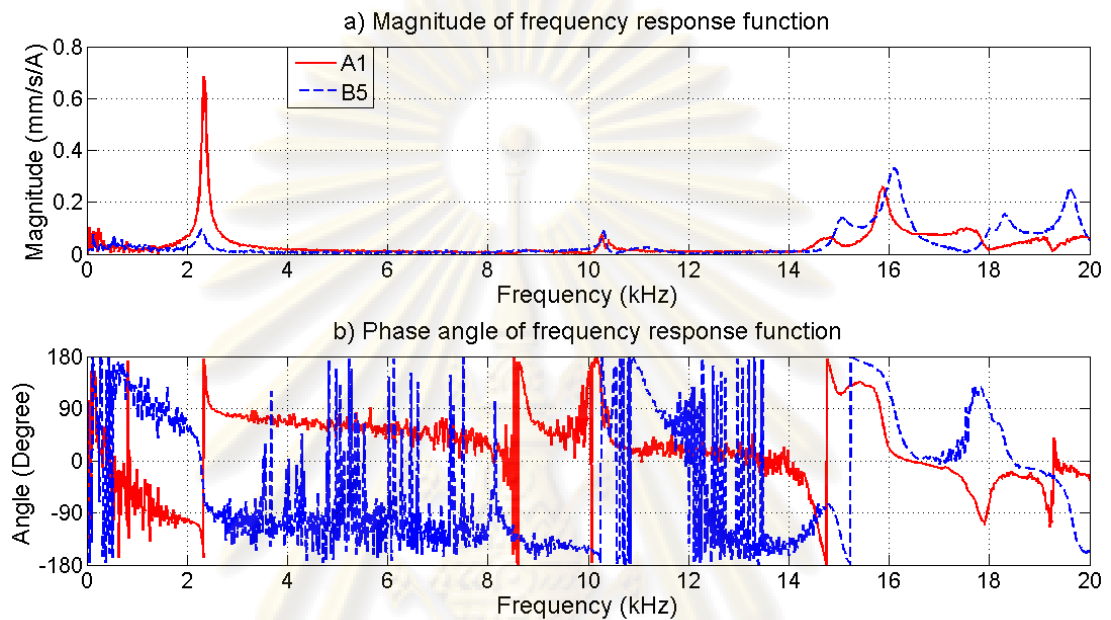


รูปที่ ก-7 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปีนเดลมอเตอร์ตัวอย่าง A

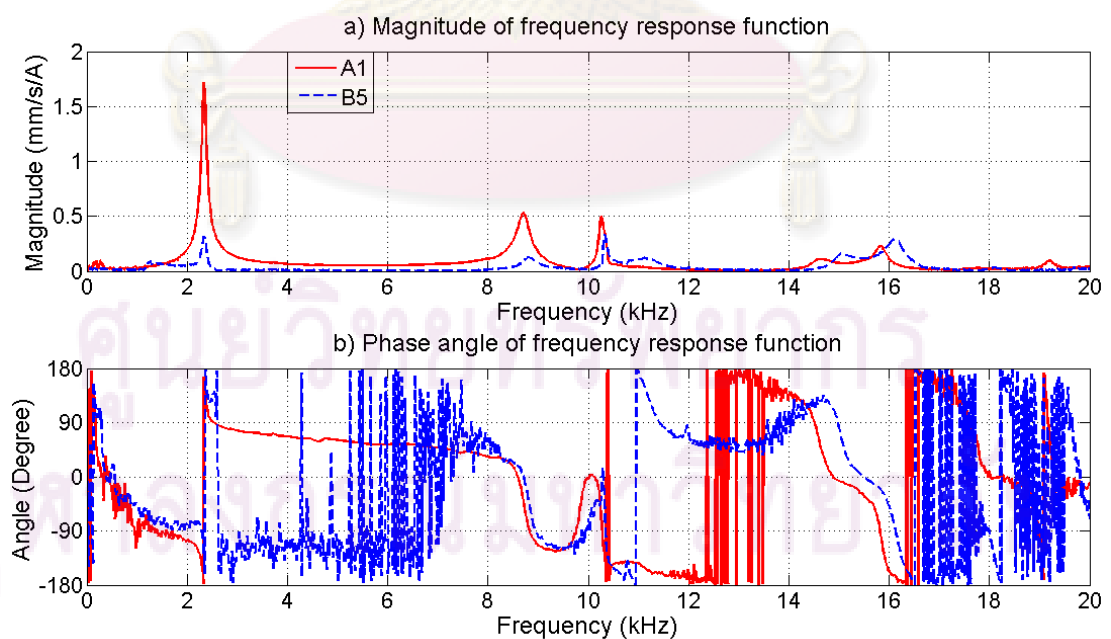


รูปที่ ก-8 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสปีนเดลมอเตอร์ตัวอย่าง B

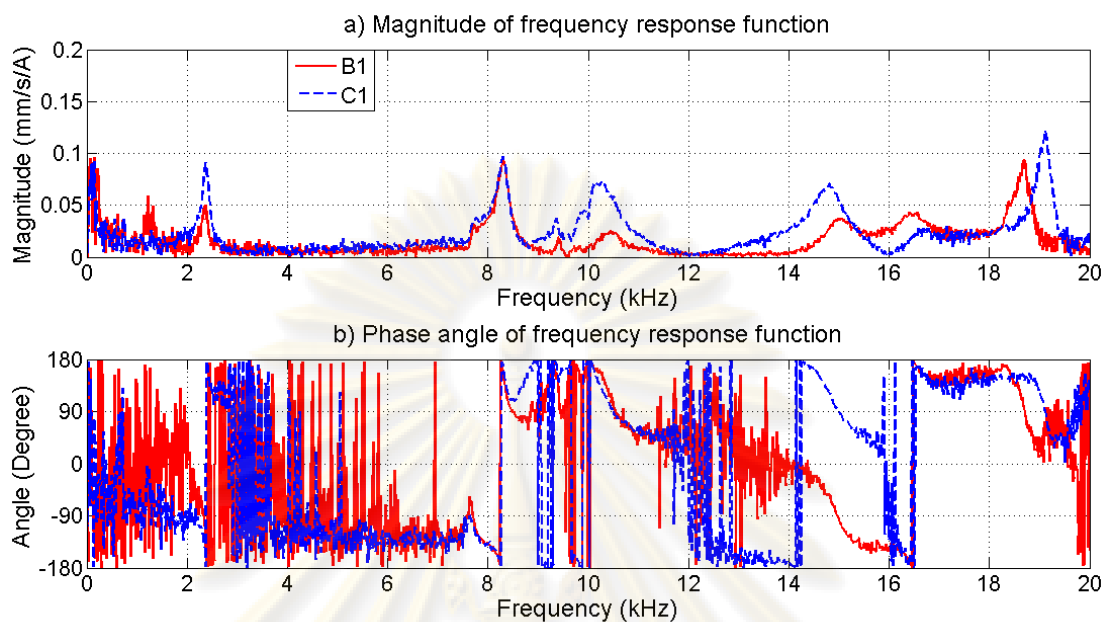
รูปที่ ก-9 ถึง ก-13 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด Interference fit โดยแสดงผลระหว่างแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนและมุมเฟสเพื่อระบุตำแหน่งของโหมดการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 0-20 kHz ซึ่งเกี่ยวข้องในหัวข้อที่ 4.3



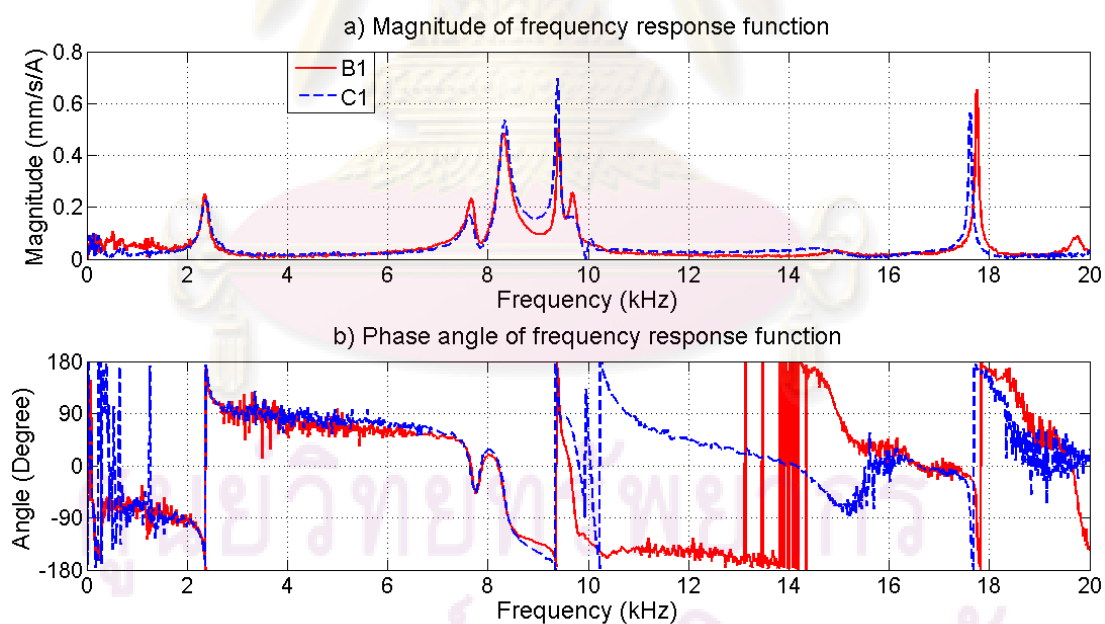
รูปที่ ก-9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A1 และ B5 วัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับแกนกลางของฐานมอเตอร์



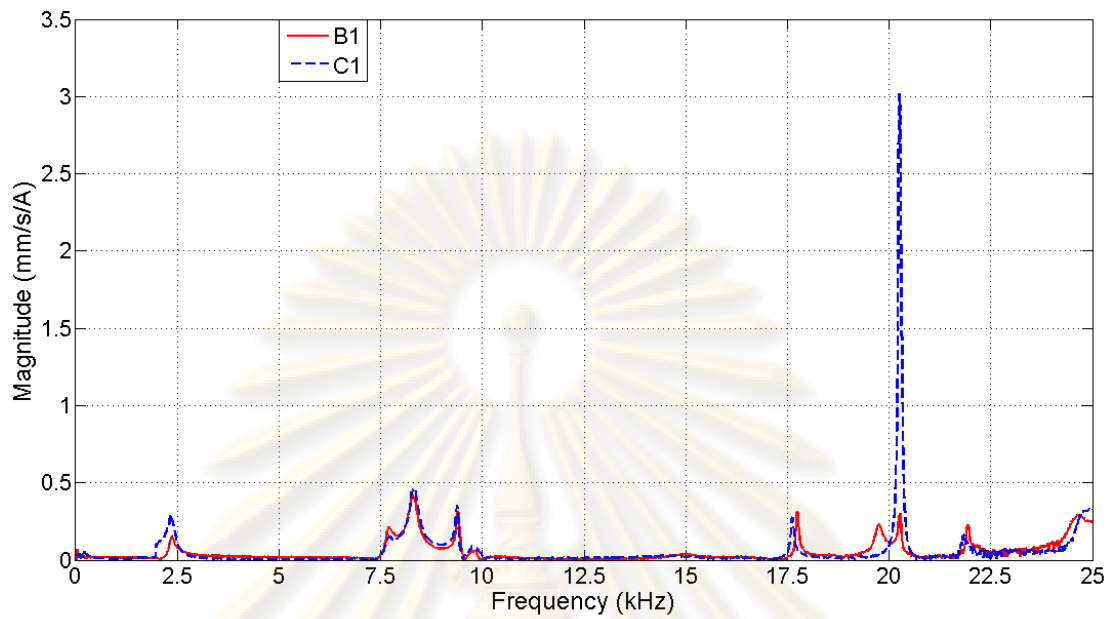
รูปที่ ก-10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง A1 และ B5 วัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์



รูปที่ ก-11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 และ C1
วัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับแกนกลางของฐานมอเตอร์



รูปที่ ก-12 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 และ C1
วัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้กับขอบนอกของฐานมอเตอร์



รูปที่ ก-13 การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่างสปินเดิลมอเตอร์ตัวอย่าง B1 และ C1
วัดการสั่นสะเทือนที่ฐานมอเตอร์ในช่วงความถี่ 0-25 kHz

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับเครื่องมือวัด

การปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในเครื่องมือและอุปกรณ์การวัดต่างๆนั้น จะต้องปรับให้เหมาะสมกับการทดสอบในแต่ละครั้ง เพื่อให้ได้ผลการวัดการสั่นสะเทือนที่ดีที่สุด สำหรับการศึกษานี้จะมีเครื่องมือที่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ Laser doppler vibrometer และ Dynamic signal analyzer แต่สำหรับ Dynamic signal analyzer นั้นการปรับตั้งค่าสำหรับการวัดนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของการทดสอบการสั่นสะเทือน ซึ่งแบ่งออกได้ดังนี้ คือ การกระตุ้นทางกล และการกระตุ้นทางไฟฟ้า

การปรับตั้งค่าการวัดสำหรับ Laser doppler vibrometer

สำหรับชุด Laser Doppler vibrometer นั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ Vibrometer controller (OFV-5000) และ Differential fiber optical sensor (OFV-512) ซึ่งในแต่ละส่วนมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

— Vibrometer controller (OFV-5000) ทำหน้าที่ในการควบคุมการวัด ไม่ว่าจะเป็นการเลือกรูปแบบในการวัด ซึ่งสามารถวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ 2 รูปแบบคือ การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบระยะขจัด (Displacement) และการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร็ว (Velocity) การเลือกความละเอียดของช่วงความถี่ที่สนใจในการวัด รวมไปถึงการกรองสัญญาณในช่วงความถี่ต่ำและสูง เป็นต้น

— Differential fiber optical sensor (OFV-512) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และมีหัวเซ็นเซอร์เพื่อฉายแสงเลเซอร์ไปที่บริเวณพื้นผิวที่ต้องการวัดการสั่นสะเทือนของชิ้นงาน และรับลำแสงที่สะท้อนกลับมาจากพื้นผิวของชิ้นงาน โดยจะส่งสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้รับไปที่ Vibrometer controller เพื่อประมวลผลสัญญาณต่อไป

สำหรับการใช้งานของชุด Laser doppler vibrometer ในการวัดการสั่นสะเทือนนั้น มีขั้นตอนการปรับตั้งค่าสำหรับการวัดดังนี้

1. ก่อนการใช้งานควรเปิดเครื่องให้ Differential fiber optical sensor ได้มีการ Warm up ประมาณ 20 นาที เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ดีที่สุด
2. การติดตั้งหัวเซ็นเซอร์เข้ากับ Test stand ต้องให้ลำแสงของเลเซอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวของบริเวณที่ต้องการวัด โดยให้หัวเลเซอร์มีระยะห่างกับพื้นผิวโดยประมาณ 50 mm.

3. การปรับระยะ โฟกัสของลำแสงเลเซอร์ที่หัวเซนเซอร์ ให้ลำแสงเลเซอร์ที่ติดตั้งจากกับพื้นผิวมีขนาดของจุดที่เล็กที่สุด ซึ่งดูได้จาก Signal level indicator ที่เครื่อง Differential fiber optical sensor จะมีไฟแสดงให้เห็นเต็มแถบความยาว

4. เนื่องจากต้องการผลตอบสนองการสั่นสะเทือนในรูปแบบความเร็ว ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตจากช่องการวัดแบบความเร็วของ Vibrometer controller จะทำการต่อเข้าที่ช่องรับสัญญาณของ DSA ผ่านทางสาย Coaxial

5. ในการปรับค่าพารามิเตอร์ จะขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ในการใช้งานและความละเอียดของผลการวัดที่ต้องการ ดังนั้นในการทดสอบนี้จะทำการตั้งพารามิเตอร์ต่างๆค่าดังต่อไปนี้

Decoder : VD-06

Range : 2mm/s/V

Maximum Frequency : 350kHz

Tracking Filter : Off

Lowpass Filter : Off

Highpass Filter : 100Hz

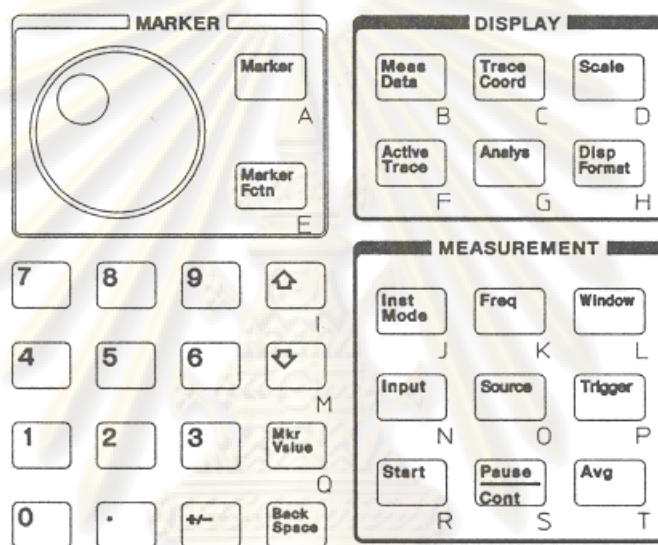
การปรับค่าพารามิเตอร์ของ Laser doppler vibrometer สำหรับการกระตุ้นกลและการกระตุ้นทางไฟฟ้าจะใช้วิธีการเดียวกัน

การปรับตั้งค่าการวัดสำหรับ Dynamic signal analyzer



รูปที่ ข-1 แสดงบริเวณควบคุมการแสดงผลของ Dynamic signal analyzer [19]

สำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการวัดการสั่นสะเทือนสำหรับ Dynamic signal analyzer นั้น จะทำการปรับตั้งที่บริเวณควบคุมการแสดงผลดังแสดงในรูปที่ ข-1 ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ 1. SYSTEM Zone 2. MEASUREMENT Zone และ 3. DISPLAY Zone โดยในรูปที่ ข-2 แสดงภาพขยายเพื่อให้เห็นรายละเอียดในส่วนของ MEASUREMENT Zone และ DISPLAY Zone ซึ่งในแต่ละส่วนนั้นต้องทำการปรับตั้งค่าตามรูปแบบของการกระตุ้นการสั่นสะเทือน โดยมีรายละเอียดในการปรับตั้งดังต่อไปนี้



รูปที่ ข-2 ภาพขยายส่วนควบคุมการแสดงผลของ Dynamic signal analyzer [19]

การกระตุ้นทางกล

1. เมื่อเปิด DSA แล้ว จะต้องทำการปรับค่า Calibration ที่ SYSTEM Zone โดยกดปุ่ม System Utility เพื่อทำการปรับค่า Calibration ให้เป็น Off ทุกครั้งที่ทำการตั้งค่าการวัดใหม่ เนื่องจากตัวเครื่องจะทำการ Calibrate การวัดทุกๆ 15 นาที เมื่อปรับค่าเป็น On

2. ในการทดสอบนี้จะใช้การวิเคราะห์ด้วย FFT Analysis โดยกดปุ่ม Inst Mode ที่ MEASUREMENT Zone และทำการวิเคราะห์แบบ 2 ช่องสัญญาณ

3. ปรับค่า Span, Record length และ Resolutions (Lines) เพื่อเลือกช่วงและความละเอียดของการวิเคราะห์โดยการกดปุ่ม Freq ที่ MEASUREMENT Zone ซึ่งค่า Record length จะปรับโดยอัตโนมัติตามการเลือกค่า Span และ Resolutions (lines) ดังนั้นในการทดสอบจะกำหนดให้

⇒ SPAN : 25.6 kHz

⇒ RESOLUTN (LINES) : 1600 lines

⇒ RECORD LENGTH : 62.5 ms

4. เนื่องจากเป็นการทดสอบโดยการกระตุ้นด้วยค้อนเคาะ และทำการเคาะที่บริเวณฐานของมอเตอร์ จึงต้องเลือกใช้ค่า Force width และ Exponential decay ให้เหมาะสมโดยพิจารณาได้จากช่วงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของผลตอบสนองเชิงเวลา โดยปรับค่าได้ที่ MEASUREMENT Zone กดปุ่ม Window

เลือก FORCE EXPO

⇒ FORCE EXPO SETUP

⇒ FORCE WIDTH : 10ms

⇒ EXPO DECAY : 31ms

5. การปรับค่าความละเอียดของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากการวัดให้เหมาะสมนั้น สามารถปรับได้ที่ MEASUREMENT Zone โดยกดปุ่ม Input เมื่อพิจารณาจากผลตอบสนองที่ได้จากการประมวลผลแล้ว จะปรับค่าต่างๆดังต่อไปนี้

สำหรับช่องสัญญาณที่ 1

เลือก CH1 FIXED RANGE

⇒ CH1 RANGE : 1.0Vpk

เลือก FRONT END CH1 SETUP

⇒ INPUT LOW : GND

⇒ ICP SUPPLY : OFF

เลือก XDCR UNIT CH1 SETUP

⇒ XDCR UNIT : ON

⇒ XDCR SENSITIVITY : 21.9mV / EU

⇒ XDCR UNIT LABEL : N

สำหรับช่องสัญญาณที่ 2

เลือก CH2 FIXED RANGE

⇒ CH2 RANGE : 6.0Vpk

เลือก FRONT END CH2 SETUP

⇒ INPUT LOW : GND

⇒ ICP SUPPLY : OFF

เลือก XDCR UNIT CH2 SETUP

⇒ XDCR UNIT : ON

⇒ XDCR SENSITIVITY : 500V / EU

⇒ XDCR UNIT LABEL : m / s

6. ในการตั้งค่าให้ DSA เริ่มทำการเก็บสัญญาณที่ได้จากการวัด โดยการตั้งค่าที่ MEASUREMENT Zone กดปุ่ม Trigger และเลือก CHANNEL 1

เลือก TRIGGER SETUP

⇒ CHANNEL LEVEL : 0.01V

7. การแสดงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ได้จากการวัด ในที่นี้จะแสดงผลของ Frequency response function โดยเลือกแสดงทั้งขนาดและมุมเฟส และปรับขนาดสเกลที่ใช้แสดงผล ให้เหมาะสม ซึ่งสามารถตั้งค่าการแสดงผลนี้ได้ที่ DISPLAY Zone

การกระตุ้นทางไฟฟ้า

1. เมื่อเปิด DSA แล้ว จะต้องทำการปรับค่า Calibration ที่ SYSTEM Zone โดยกดปุ่ม System Utility เพื่อทำการปรับค่า Calibration ให้เป็น Off ทุกครั้งที่ทำการตั้งค่าการวัดใหม่ เนื่องจากตัวเครื่องจะทำการ Calibrate การวัดทุกๆ 15 นาที เมื่อปรับค่าเป็น On

2. ในการทดสอบนี้จะใช้การวิเคราะห์ด้วย Swept Sine โดยการกดปุ่ม Inst Mode ที่ MEASUREMENT Zone และทำการวิเคราะห์แบบ 2 ช่องสัญญาณ

3. ปรับค่า Span และ Resolution เพื่อเลือกช่วงและความละเอียดของการวิเคราะห์ที่สามารถปรับค่าได้ที่ MEASUREMENT Zone กดปุ่ม Freq

⇒ SPAN : 20 kHz

⇒ SWEEP : LIN

⇒ SWEEP : DOWN

⇒ SWEEP : AUTO

เลือก RESOLUTN

⇒ AUTO RES : ON

⇒ MINIMUM RESOLUTN : 1,600 POINTS / SWEEP

4. การปรับค่าความละเอียดของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากการวัดให้เหมาะสม นั้น สามารถปรับได้ที่ MEASUREMENT Zone โดยกดปุ่ม Input และจะปรับค่าต่างๆดังต่อไปนี้

สำหรับช่องสัญญาณที่ 1

เลือก CH1 AUTO RANGE

เลือก FRONT END CH1 SETUP

⇒ INPUT LOW : GND

⇒ ICP SUPPLY : OFF

เลือก XDCR UNIT CH1 SETUP

- ⇒ XDCR UNIT : ON
- ⇒ XDCR SENSITIVITY : $100\text{mV} / EU$
- ⇒ XDCR UNIT LABEL : A

สำหรับช่องสัญญาณที่ 2

เลือก CH2 AUTO RANGE

เลือก FRONT END CH2 SETUP

- ⇒ INPUT LOW : GND
- ⇒ ICP SUPPLY : OFF

เลือก XDCR UNIT CH2 SETUP

- ⇒ XDCR UNIT : ON
- ⇒ XDCR SENSITIVITY : $500\text{V} / EU$
- ⇒ XDCR UNIT LABEL : m/s

5. เนื่องจาก DSA ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับสปินเดิลมอเตอร์ ดังนั้นจะต้องปรับค่าของแหล่งจ่ายที่ MEASUREMENT Zone โดยกดปุ่ม Source

- ⇒ LEVEL : 500mVpk

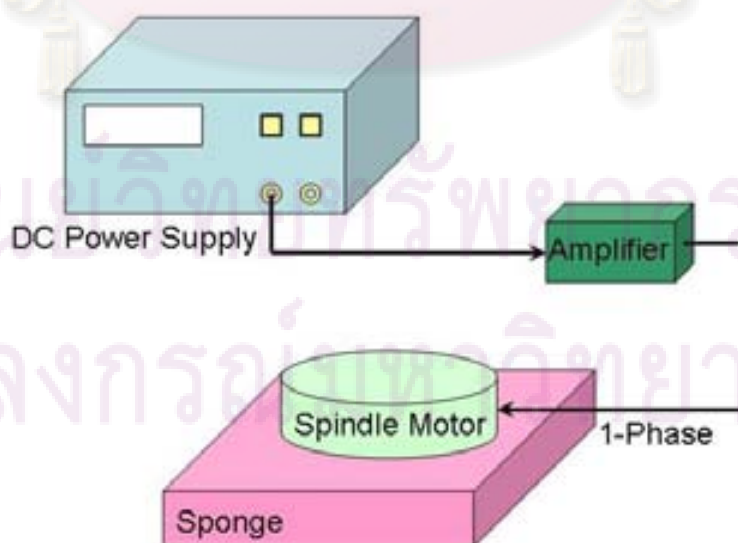
6. การแสดงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ได้จากการวัด ในที่นี้จะแสดงผลของ Frequency response function โดยเลือกแสดงทั้งขนาดและมุมเฟส และปรับขนาดสเกลที่ใช้แสดงผล ให้เหมาะสม ซึ่งสามารถตั้งค่าการแสดงผลนี้ได้ที่ DISPLAY Zone

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

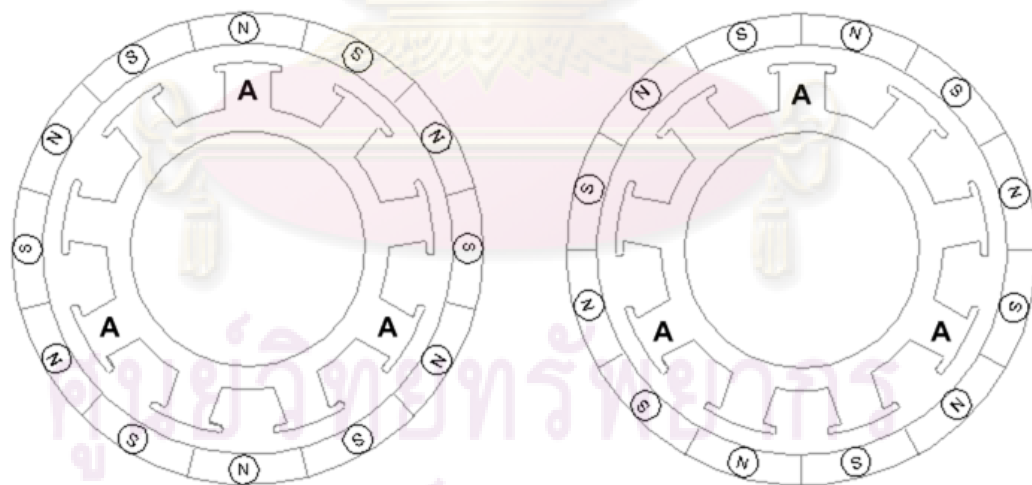
การตรวจสอบตำแหน่งของมุมสัมพัทธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร

จากการศึกษาลักษณะของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมของชุดโรเตอร์ พบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมของชุดโรเตอร์มีผลทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางที่ต่างกันอย่างชัดเจน และยังมีผลต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ฐานมอเตอร์และชุดโรเตอร์อีกด้วย สำหรับผลตอบสนองการสั่นสะเทือนในหัวข้อที่ 3.2 และ 3.4 เป็นการทดสอบการสั่นสะเทือนโดยที่ชุดโรเตอร์นั้นอยู่ในตำแหน่งๆ แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยเน้นไปที่การศึกษาการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำไปยังฐานมอเตอร์ ในลักษณะของแรงเสียดทานผ่านบริเวณผิว Interference fit โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลมเป็นแรงที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานดังกล่าวในลักษณะของแรงบิด ซึ่งตำแหน่งเชิงมุมของชุดโรเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลม คือตำแหน่งที่ขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้ของแม่เหล็กถาวรอยู่เชื่องกับเฟสที่ถูกกระตุ้นของวงแหวนขดลวดเหนียวนำ แต่เนื่องจากในการทดสอบการสั่นสะเทือนไม่สามารถหาตำแหน่งที่ขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเชื่องกับเฟสที่ถูกกระตุ้นได้ด้วยตาเปล่า ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาวิธีการตรวจสอบหาตำแหน่งของมุมสัมพัทธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร ซึ่งมีวิธีการตรวจสอบดังต่อไปนี้



รูปที่ ก-1 การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบตำแหน่งเชิงมุมของชุดโรเตอร์

การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบตำแหน่งมุมสัมพัทธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรแสดงในรูปที่ ค-1 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดขยายสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบแบบโมดูลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า การตรวจสอบเริ่มจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดขยายสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่ขยายแรงดันไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับของกระแสไฟฟ้าให้คงที่และราบเรียบ และส่งกระแสไฟฟ้าให้กับวงแหวนขดลวดเหนียวนำของสปินเดิลมอเตอร์เพียงหนึ่งเฟส เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เกิดขึ้นรอบวงแหวนขดลวดเหนียวนำ ในช่วงเวลานั้น ชุดโรเตอร์จะเคลื่อนที่เพื่อให้ขั้วเหนือของแม่เหล็กถาวรตรงกันกับเฟส A ที่ถูกกระตุ้นของวงแหวนขดลวดเหนียวนำ ดังแสดงในรูปที่ ค-2 (ก) ที่ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่เฟสที่ถูกกระตุ้นเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวรัศมี ดังนั้นเมื่อหมุนชุดโรเตอร์ทุก 60 องศา จากตำแหน่งนี้ จะทำให้เฟสที่ถูกกระตุ้นของวงแหวนขดลวดเหนียวนำเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวรัศมีเสมอ เนื่องจากสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์ที่มีการหมุนแบบสมมาตรสำหรับตำแหน่งที่ทำให้เฟสที่ถูกกระตุ้นของวงแหวนขดลวดเหนียวนำเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสวงกลม หาได้โดยการหมุนชุดโรเตอร์ในทิศตามเข็มนาฬิกาไป 15 องศา จากตำแหน่งที่ขั้วเหนือของแม่เหล็กถาวรตรงกันกับเฟสที่ถูกกระตุ้น แสดงในรูปที่ ค-2 (ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ ค-2 ตำแหน่งมุมสัมพัทธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนียวนำและขั้วแม่เหล็กถาวร (ก) ตำแหน่งที่ขั้วเหนือตรงกันกับเฟสที่ถูกกระตุ้น (ข) ตำแหน่งที่ขั้วเหนือเอียงกับเฟสที่ถูกกระตุ้น [1]

ข้อควรระวังในการตรวจสอบตำแหน่งของมุมสัมพัทธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ และขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร คือต้องพิจารณาระดับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำของสปีนเดิลมอเตอร์ให้เหมาะสม เนื่องจากถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าในระดับที่สูงเกินกว่าอัตราสูงสุดของมอเตอร์ที่สามารถรับได้ จะส่งผลให้วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการอิ่มตัวและมีสถานะเป็นแม่เหล็กถาวรได้ ดังนั้นในการทดสอบการสันสะเทือนแบบโมดอล โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าและการตรวจสอบตำแหน่งของมุมสัมพัทธ์ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและขั้วแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสปีนเดิลมอเตอร์ไม่เกิน 50% ของอัตราสูงสุดที่มอเตอร์สามารถรับได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อภิรัฐ ศิลปพินิจ เกิดเมื่อวันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2526 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2548 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2549 โดยมีผลงานทางวิชาการที่ ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ดังนี้

- 1 Ajavakom, N., and Sillapapinij, A. Analysis of electrically excited vibration modes and acoustic noise in a FBD spindle motor. ASME information storage and processing system conference, Santa Clara, California (June 2007)
- 2 อภิรัฐ ศิลปพินิจ, นูรินทร์ โพธิ์ชัย, ปาจริย์ ถาวรล้ำเลิศ และ นกคณัย อาชวาคม, การศึกษาการ สั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงของสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยการกระตุ้นทาง ไฟฟ้า, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, พัทยา, ชลบุรี, 17-19 ตุลาคม 2550
- 3 Jintanawan, T., Sillapapinij, A., and Suwankawin, S. Exploration of vibro-acoustic characteristic of FDB motors through EM and sine-swept excited modal testing. ASME information storage and processing system conference, Santa Clara, California (June 2008).
- 4 อภิรัฐ ศิลปพินิจ, ฐิติมา จินตนาวัน และ นกคณัย อาชวาคม, การออกแบบการทดสอบแบบ โมดอลเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงในสปินเดิลมอเตอร์สำหรับ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, 15-17 ตุลาคม 2551

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย