

การศึกษาผลของการสวมอัดต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองของสเตเตอร์และเบส  
ของสปินเดิลมอเตอร์ด้วยวิธี Statistical Energy Analysis  
Study of Effect of Interference Fit on Vibrational Transmission of Stator-Base of  
Spindle Motor by Statistical Energy Analysis

กิติพงษ์ กาญจนธนาเลิศ<sup>1,\*</sup> และ นภคณัย อาชวาคม<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

\*E-mail: k.kitphong@gmail.com, โทรศัพท์: (668)17122756

### บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ทฤษฎี Statistical Energy Analysis ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีด้านพลังงานมาใช้ในการศึกษาผลของค่าการสวมอัด (Interference Fit) ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองของสเตเตอร์และเบสของสปินเดิลมอเตอร์ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของแรงสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงรบกวนภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยการแยกส่วนประกอบทั้งสองออกเป็นระบบย่อยที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน ในการทดสอบจะทำการกระตุ้นแบบจำลองของสเตเตอร์และเบสเพื่อให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (Vibration exciter) ค่าการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จะนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย (Coupling Loss Factor) และกำลังการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของสเตเตอร์สู่เบสของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละชุดที่มีค่า Interference Fit ต่างๆกัน จากการศึกษาพบว่าชุดแบบจำลองที่มีค่า Interference Fit ที่น้อยกว่าจะมีค่า Coupling Loss Factor ระหว่างระบบย่อยที่น้อยกว่า ส่งผลทำให้มีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองของสเตเตอร์สู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่น้อยกว่าแบบจำลองที่มีค่า Interference Fit ที่มากกว่า

**คำหลัก:** การสวมอัด, การสั่นสะเทือน, สปินเดิลมอเตอร์, ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อย

### Abstract

This research aims to present the application of an energy-based method, Statistical Energy Analysis, in the study of an effect of the interference fit on vibrational transmission between the stator and the base in spindle motor which is the origin of the vibration in hard disk drive. In this application, the model of stator-base was separated into two subsystems which exchanged energy with each other. The measured vibrational variables, which were measured from excitation of the stator-base models by the vibration exciter, were used in calculations of coupling loss factor and transmitted vibrational power from the stator to the base of each model. The experimental results show that the less interference fit means the less transmitted vibrational power from the stator to the base.

**Keywords:** Statistical Energy Analysis, Interference fit, Spindle Motor, Coupling Loss Factor

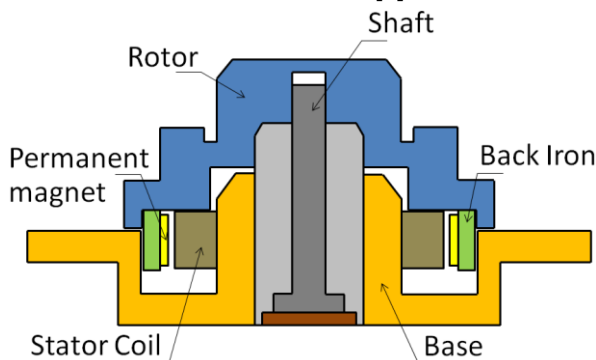
### 1. บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นส่วนประกอบสำคัญส่วนหนึ่งของเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เก็บข้อมูลไว้ภายใน โดยในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาให้มีทั้งความจุและความเร็วในการอ่านและเขียนที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของตลาด แต่การพัฒนาเหล่านี้กลับส่งผลเสียต่อการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือ เกิดการสั่นสะเทือน

และเสียงรบกวนที่เพิ่มมากขึ้นตามมา ซึ่งอาจส่งผลทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีอายุการใช้งานที่ลดลง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งพบว่าการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงรบกวนภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีสาเหตุหลักมาจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่หมุนแผ่นดิสก์ไปหาหัวอ่านเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูล โดยสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดของเสียงรบกวนจากการ

ทำงานของสปีนเดิลมอเตอร์ได้เป็น 3 แหล่ง คือ การกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic excitations), การกระตุ้นทางกล (Mechanical excitations) และแหล่งกำเนิดทางพลศาสตร์ (Aerodynamic source) [1] โดยงานวิจัยส่วนหนึ่งพบว่าเมื่อหยุดจ่ายแรงดันให้สปีนเดิลมอเตอร์หรือตัดการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าลงจะทำให้เสียงรบกวนที่วัดได้มีค่าลดลงอย่างมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าเสียงรบกวนภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟนั้นมีสาเหตุหลักมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าภายในสปีนเดิลมอเตอร์ [2]



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบสำคัญของสปีนเดิลมอเตอร์

สปีนเดิลมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1 จะมีส่วนประกอบหลัก คือ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและโรเตอร์ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนประกอบทั้งสองเมื่อจ่ายแรงดันเข้าสู่ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจะผลักดันให้โรเตอร์หมุน ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่สปีนเดิลมอเตอร์ทั้งสามเฟสมีความไม่สมดุล โรเตอร์จะเกิดการหมุนอย่างไม่สมดุลและเกิดการเสียรูปของส่วนประกอบทั้งสองก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนส่งผ่านจากจุดกำเนิด คือ วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ผ่านผิวสัมผัส และแพร่กระจายสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟกลายเป็นเสียงรบกวนต่อไป

จากปัญหาที่เกิดขึ้น งานวิจัยฉบับนี้จึงให้ความสนใจและทำการศึกษาค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปีนเดิลมอเตอร์ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองในช่วงความถี่ที่หูของมนุษย์ได้ยิน คือ 0 – 20 kHz โดยนำแบบจำลองมาใช้ในการทดสอบและนำทฤษฎี SEA ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีทางด้านพลังงานมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยผลที่ได้จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐาน

ของสปีนเดิลมอเตอร์ซึ่งจะแพร่กระจายสู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟสู่ภายนอกกลายเป็นเสียงรบกวนได้ต่อไป

2. แบบจำลองที่นำมาใช้ในการทดสอบ

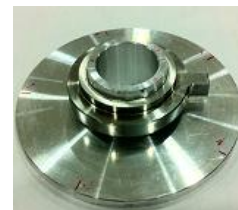
การนำวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปีนเดิลมอเตอร์จริงดังแสดงใน รูปที่ 2 มาใช้ในการศึกษาผลของค่า Interference fit ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองอาจจะเป็นไปด้วยความยากลำบากเนื่องมาจากส่วนประกอบแต่ละส่วนมีขนาดที่ค่อนข้างเล็กและมีรูปร่างที่ซับซ้อน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนหนึ่งได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองของส่วนประกอบทั้งสองขึ้นเพื่อความสะดวกในการทดสอบทางด้านการสั่นสะเทือน [3] โดยออกแบบให้มีรูปร่างใกล้เคียงและใช้วัสดุที่เหมือนส่วนประกอบจริง แต่มีขนาดที่ใหญ่กว่าประมาณ 1.5 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3 และออกแบบให้แบบจำลองแต่ละชุดเมื่อประกอบเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 4 จะมีค่า Interference fit ต่างๆกันจำนวน 5 ชุด โดยจะเรียงลำดับจากค่าการสวมอัดที่มากที่สุดไปน้อยที่สุด ดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 (ก) วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) ฐานของสปีนเดิลมอเตอร์



รูปที่ 3 (ก) แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ (ข) แบบจำลองของฐาน



รูปที่ 4 แบบจำลองของสปีนเดิลมอเตอร์

ตารางที่ 1 ค่า Interference fit ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์แต่ละชิ้น

แบบจำลอง	ค่าการสวมอัด (มม.)
1	0.041
2	0.0304
3	0.0169
4	0.0083
5	0.0049

### 3. Statistical Energy Analysis

เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้ให้ความสนใจกับการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ในช่วงความถี่ 0 – 20 kHz ซึ่งมีกลไกที่ซับซ้อนและอยู่ในช่วงความถี่ที่สูง การใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ เช่น สมการการเคลื่อนที่ (Equation of motions), Finite element method, Boundary element method [4] เป็นต้น มาใช้ในการวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือนอาจจะไม่เหมาะสม จากประเด็นดังกล่าว ทฤษฎี Statistical Energy Analysis หรือ SEA จึงเข้ามามีบทบาทในงานวิจัยฉบับนี้

#### 3.1 ทฤษฎี SEA เบื้องต้น

ทฤษฎี SEA เป็นทฤษฎีที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีทางด้านพลังงาน โดยนิยามนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนภายในระบบที่มีความซับซ้อนหรือมีส่วนประกอบหลายส่วน เช่น โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้า [5], โครงสร้างของอาคาร [6] เป็นต้น ทฤษฎี SEA มีหลักการพื้นฐาน คือ การแบ่งระบบที่สนใจออกเป็นระบบย่อยๆ (Subsystems) ที่มีอิสระต่อกัน แต่มีการสะสมและถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน [7-8]

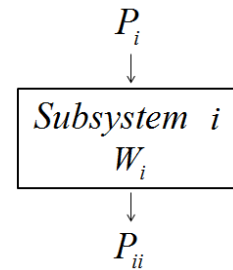
ระบบย่อย หรือ Subsystem โดยทั่วไปจะกำหนดให้แทนส่วนประกอบแต่ละส่วนที่มีการสะสมและถ่ายเทพลังงานระหว่างส่วนประกอบหรือระบบย่อยที่อยู่ติดกัน โดยเมื่อพิจารณาระบบย่อยเพียงหนึ่งระบบ ดังรูปที่ 5 ถูกกระตุ้นด้วยกำลัง  $P_i$  ระบบจะเกิดพลังงานการสั่นสะเทือน  $W_i$  ขึ้น และมีกำลังการสูญเสียเท่ากับ  $P_{ii}$  ซึ่งมีค่าเป็นสัดส่วนกับ  $W_i$  และเมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุลพลังงาน กำลังสูญเสียจะมีค่าเท่ากับกำลังที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังสมการต่อไปนี้

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

โดย  $\eta_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียในโครงสร้างของระบบย่อย  $i$  (Intrinsic loss factor)

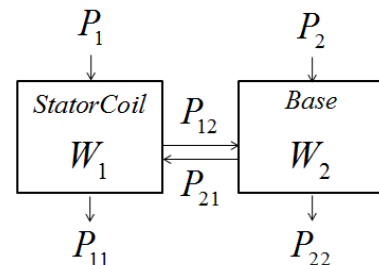
$\omega$  คือ ความถี่ในการสั่นสะเทือน (rad/s)

ค่า Intrinsic loss factor หรือ Damping loss factor จะบ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะของการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในระบบย่อยแต่ละระบบ โดยเมื่อค่า Intrinsic loss factor มีค่าต่ำที่ความถี่ใด ที่ความถี่นั้นจะมีค่าการสั่นสะเทือนที่สูง หรือตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบย่อยนั่นเอง



รูปที่ 5 ระบบย่อยหนึ่งระบบ

เมื่อนำทฤษฎี SEA มาประยุกต์ใช้สำหรับระบบที่ประกอบไปด้วยระบบย่อยสองระบบ หรือตามงานวิจัยฉบับนี้ คือ แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ จะสามารถสรุปพลังงานที่สะสมและการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบย่อยสองระบบได้ตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 การสะสมและถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบย่อยสองระบบ

โดยจากรูปที่ 6 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างระบบย่อยทั้งสองระบบจะแบ่งออกเป็น กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ( $P_{12}$ ) และจากฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่ขดลวดเหนี่ยวนำ ( $P_{21}$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานการสั่นสะเทือนภายในระบบย่อยแต่ละระบบดังนี้

$$P_{12} = \omega \eta_{12} W_1 \quad (2)$$

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

โดย  $\eta_{12}$  และ  $\eta_{21}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียระหว่างระบบย่อยเมื่อถ่ายพลังงานจากระบบ 1 สู่อะบบ 2 และจากระบบ 2 สู่อะบบ 1 ตามลำดับ

จากสมการ (2) และ (3) ค่า Coupling loss factor จะแสดงถึงพฤติกรรมของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างระบบย่อย ถ้าค่า Coupling loss factor มีค่าสูงที่ความถี่ใด จะทำให้ความถี่นั้นมีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่สูงตามมา โดยเมื่อสามารถหาค่า  $\eta_{12}$  และ  $\eta_{21}$  ได้แล้วจะสามารถหาค่า  $P_{12}$  และ  $P_{21}$  ได้ตามมา และสามารถหาลำดับสัทธิในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้จากสมการ ดังนี้

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

### 3.2 การประยุกต์ใช้ทฤษฎี SEA ในการทดสอบ

ในการประยุกต์ใช้ทฤษฎี SEA ในการทดสอบจะเริ่มจากการแบ่งระบบที่สนใจออกเป็นระบบย่อยๆ  $N$  ระบบ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบโดยการกระตุ้นโครงสร้างของระบบย่อย  $i$  ทีละระบบด้วยเครื่องมือที่จะนำมาใช้ในการกระตุ้น แล้วจึงทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแต่ละระบบย่อยจำนวน  $N$  ระบบ ค่าที่ได้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า Intrinsic loss factor ของแบบจำลองแต่ละชิ้นจากสมการ (1) และค่า Coupling loss factor ของแบบจำลองหลังประกอบแต่ละชุดจะคำนวณได้จากสมการของ Lalor [9] ดังนี้

$$\eta_{ij} \approx \frac{1}{\omega} \left( \frac{W_{ji}}{W_{ii}} \right) \left( \frac{P_j}{W_{jj}} \right) \quad (6)$$

โดย  $W_{ji}$  คือ พลังงานการสั่นสะเทือนภายในระบบย่อย  $j$  เมื่อระบบย่อย  $i$  ถูกกระตุ้น

$W_{ii}$  และ  $W_{jj}$  คือ พลังงานการสั่นสะเทือนภายในระบบ  $i$  และ  $j$  เมื่อระบบย่อย  $i$  และ  $j$  ถูกกระตุ้น ตามลำดับ

เมื่อสามารถหาค่า Coupling loss factor ของระบบย่อยแต่ละระบบได้จากสมการ (6) แล้วจะสามารถหาลำดับการส่งผ่านการสั่นสะเทือน  $P_{12}$  และ  $P_{21}$  ได้จากสมการ (2) และ (3) ตามลำดับ จากนั้นจึงสามารถหาค่า  $P_{1 \rightarrow 2}$  ซึ่งเป็นกำลังสุทธิที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ได้จากสมการ (4) ซึ่งค่า  $P_{1 \rightarrow 2}$  ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองแต่ละชุดจะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างกันเพื่อหาผล

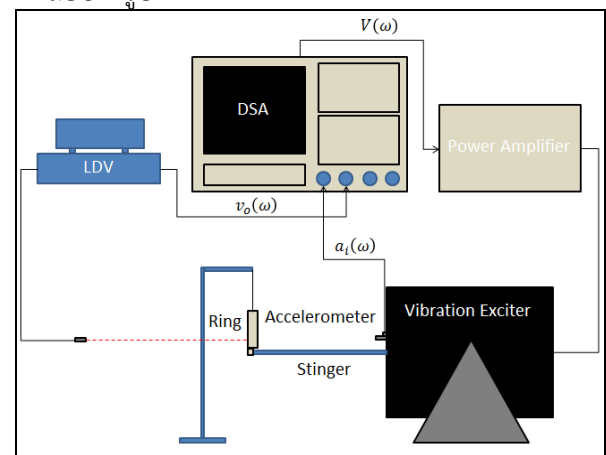
ของค่า Interference fit ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยฉบับนี้

### 4. ขั้นตอนในการทดสอบและการคำนวณ

งานวิจัยฉบับนี้จะแบ่งขั้นตอนการทดสอบออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การทดสอบเพื่อหาค่า Intrinsic loss factor และการทดสอบเพื่อหาค่า Coupling loss factor ในการทดสอบจะนำเครื่อง Vibration exciter มาใช้ในการกระตุ้น ซึ่งสามารถกำหนดลักษณะของสัญญาณการกระตุ้นได้ตามสัญญาณทางไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่เครื่อง และนำแท่งส่งแรงสั่นสะเทือน (Stinger) มาใช้เชื่อมระหว่างเครื่อง Vibration exciter และแบบจำลองเพื่อให้สามารถส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากเครื่อง Vibration exciter สู่จุดที่ต้องการจะกระตุ้นได้อย่างสะดวก ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบ จะมีดังนี้

#### 4.1 Intrinsic loss factor

ค่า Intrinsic loss factor เป็นค่าคงที่เฉพาะสำหรับชิ้นงานรูปร่างหนึ่งๆและวัสดุหนึ่งๆ โดยการทดสอบจะเริ่มจากการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ด้วย Vibration exciter และกำหนดให้ขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ 0 - 20 kHz ซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดสอบหาค่า Intrinsic loss factor ของแบบจำลองโดยใช้ Vibration exciter กระตุ้น จากรูปที่ 7 Accelerometer ที่ติดอยู่บนเครื่อง Vibration exciter จะวัดค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนขาเข้า ( $a_{in}$ ) เพื่อนำไปใช้ในการหาค่ากำลังการสั่นสะเทือนขาเข้า ( $P_{in}$ ) จากสมการ ดังนี้

$$P_{in} = m \frac{a_{in}^2}{\omega} \tag{7}$$

โดย  $m$  คือ มวลที่เครื่อง Vibration exciter ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน (kg)

จากรูปที่ 7 เครื่อง Laser Doppler Vibrometer หรือ LDV จะใช้วัดค่าความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวชั้นทดสอบแต่ละจุด ( $v_{out}$ ) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานการสั่นสะเทือนขาออก ( $W_{out}$ ) จากสมการดังนี้

$$W_{out} = mv_{out}^2 \tag{8}$$

จากนั้นจึงนำค่า  $P_{in}$  และ  $W_{out}$  ไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่า Intrinsic loss factor ( $\eta_i$ ) จากสมการดังนี้

$$\eta_i = \frac{P_{in}}{\omega W_{out}} \tag{9}$$

#### 4.2 Coupling loss factor

Coupling loss factor เป็นค่าคงที่ที่นำมาใช้ในการศึกษาการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์ตามทฤษฎีของ SEA เมื่อประกอบแบบจำลองทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วจึงนำไปทดสอบโดยใช้ Vibration exciter ในการกระตุ้น โดยจะแบ่งการกระตุ้นออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ กระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางที่ทำให้เกิดแรงบิด ณ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแบบจำลองทั้งสอง และขั้นตอนสอง คือ กระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ โดยจะสามารถแสดงจุดที่จะใช้เครื่อง Vibration exciter ในการกระตุ้น และจุดที่จะใช้เครื่อง LDV ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนได้ดังรูปที่ 8 โดยสำหรับ Accelerometer จะนำไปติดไว้ที่เครื่อง Vibration exciter เพื่อวัดค่าความเร่งในการสั่นสะเทือนขาเข้าแทน



รูปที่ 8 แสดงจุดวัดต่างๆในการทดสอบหาค่า Coupling loss factor

Accelerometer จะทำหน้าที่วัดค่าความเร่งในการสั่นสะเทือนขาเข้า ( $a_{in}$ ) ที่เครื่อง Vibration exciter เป็นตัวให้กำเนิด โดยค่าความเร่งนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ( $P_1$ ) และฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ( $P_2$ ) จากสมการ (7)

ในการกระตุ้นขั้นตอนแรก เครื่อง LDV จะทำหน้าที่วัดความเร็วการสั่นสะเทือนของผิวของแบบจำลองในแต่ละตำแหน่ง เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาพลังงานการสั่นสะเทือนเนื่องมาจากการกระตุ้นแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำภายในแบบจำลองแต่ละชิ้น ( $W_{11}$ ,  $W_{21}$ ) ตามสมการ (8) และในขั้นตอนที่สอง เครื่อง LDV จะทำหน้าที่เหมือนกับการกระตุ้นในขั้นตอนแรก โดยค่าความเร็วการสั่นสะเทือนที่วัดได้ที่บริเวณต่างๆจะนำมาใช้ในการคำนวณหาพลังงานการสั่นสะเทือนเนื่องมาจากการกระตุ้นแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ภายในแบบจำลองแต่ละชิ้น ( $W_{12}$ ,  $W_{22}$ ) ตามสมการ (8) เช่นกัน ซึ่งค่าต่างๆจะนำมาใช้คำนวณหาค่า Coupling loss factor ของการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ( $\eta_{12}$ ) และจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ( $\eta_{21}$ ) ตามสมการ ดังนี้

$$\eta_{12} = \frac{1}{\omega} \left( \frac{W_{21}}{W_{11}} \right) \left( \frac{P_2}{W_{22}} \right) \tag{8}$$

$$\eta_{21} = \frac{1}{\omega} \left( \frac{W_{12}}{W_{22}} \right) \left( \frac{P_1}{W_{11}} \right) \tag{9}$$

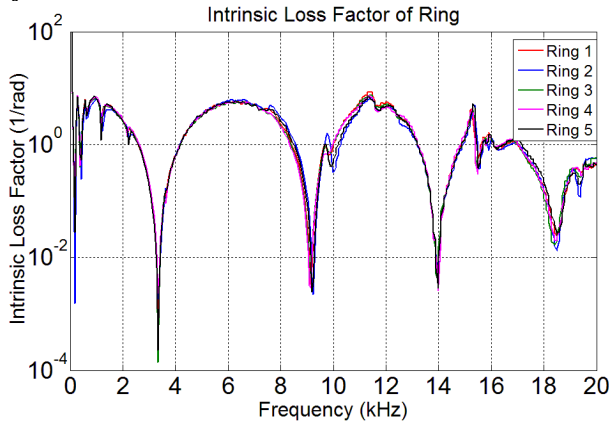
เมื่อคำนวณค่า  $\eta_{12}$  และ  $\eta_{21}$  ได้จากสมการ (8) และ (9) แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือน  $P_{12}$  และ  $P_{21}$  จากสมการ (2) และ (3) ตามลำดับ จากนั้นค่ากำลังสุทธิในการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ที่คำนวณได้จากสมการ (4) จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองแต่ละชุด เพื่อศึกษาผลของค่า Interference fit ต่อการส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองทั้งสองซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยชิ้นนี้ต่อไป



5. ผลการทดสอบ

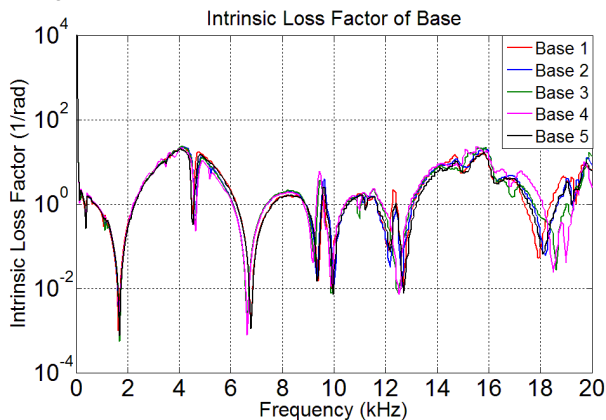
5.1 Intrinsic loss factor

ผลการทดสอบในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นผลของ Intrinsic loss factor ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 9 และผลของ Intrinsic loss factor ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 ค่า Intrinsic loss factor ของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 5 ชั้น

จากรูปที่ 9 ค่า Intrinsic loss factor ของแบบจำลองแต่ละชั้นจะมีค่าคล้ายกัน และจะมีค่าต่ำลงเมื่อใกล้กับความถี่ของโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ คือ ที่ความถี่ประมาณ 9 และ 14 kHz โดยที่ความถี่ประมาณ 3.5 และ 18.5 kHz จะเป็นผลจากโหมดการสั่นสะเทือนของ Stinger ที่นำมาใช้ในการทดสอบ

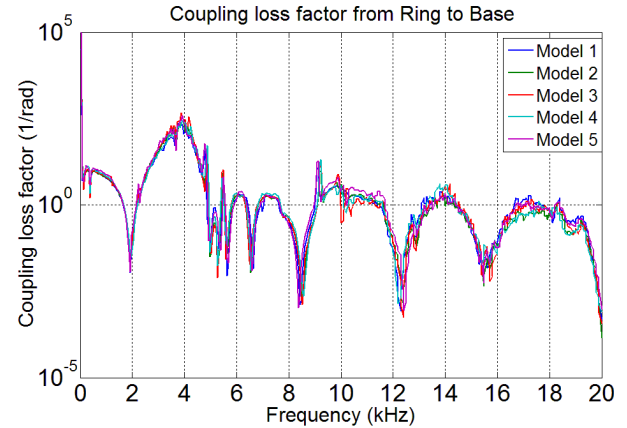


รูปที่ 10 ค่า Intrinsic loss factor ของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชั้น

จากรูปที่ 10 ค่า Intrinsic loss factor ของแบบจำลองแต่ละชั้นจะมีค่าคล้ายกัน และจะมีค่าต่ำลงเมื่อใกล้กับความถี่ของโหมดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์ คือที่ความถี่ประมาณ 4, 6.5, 10 และ 12.5 kHz ซึ่งจากรูปที่ 10 จะ

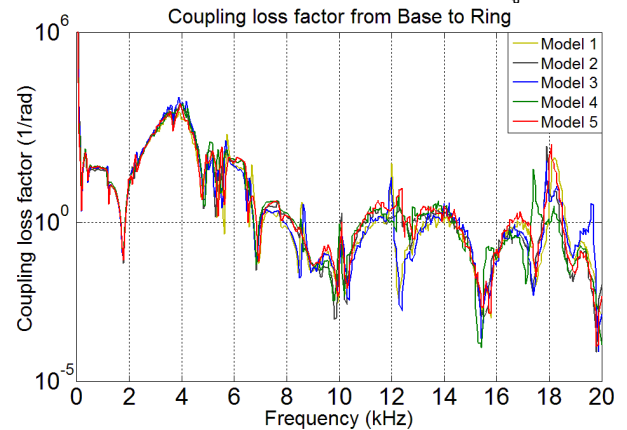
มีผลจากการนำ Stinger มาใช้ในการทดสอบเช่นเดียวกับแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ คือ มีโหมดการสั่นสะเทือนของ Stinger ปรากฏอยู่ที่ความถี่ประมาณ 1.7 และ 18 – 18.5 kHz ซึ่งมีการแกว่งของค่า Intrinsic loss factor เนื่องมาจากความถี่การสั่นสะเทือนที่สูง

5.2 Coupling loss factor



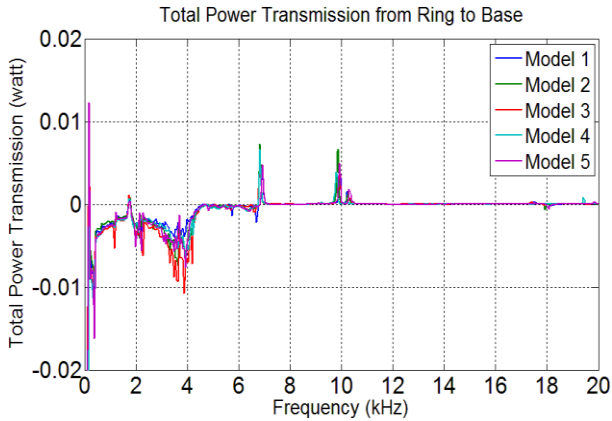
รูปที่ 11 ค่า Coupling loss factor  $\eta_{12}$  ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชุด

จากรูปที่ 11 ค่า Coupling loss factor จะมีค่าสูงที่ความถี่ 0.125, 4, 6, 7, 9, 10, 14 และ 17 kHz โดยค่าที่ทดสอบได้จากแบบจำลองแต่ละชุดจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงความถี่สูง ค่า Coupling loss factor จะเกิดการแกว่งเล็กน้อย เนื่องมาจากการสั่นสะเทือนที่สูง



รูปที่ 12 ค่า Coupling loss factor  $\eta_{21}$  ของแบบจำลองของสปินเดิลมอเตอร์ทั้ง 5 ชุด

จากรูปที่ 12 ค่า Coupling loss factor จะมีค่าสูงที่ความถี่ 0.125, 4, 6, 7.5, 10, 12, 14, 16.5 และ 18 kHz ซึ่งค่า Coupling loss factor ที่คำนวณได้จากแบบจำลองแต่ละชุดจะค่อนข้างใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ต่ำ แต่เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น ค่า Coupling loss factor จะเกิดการแกว่งเพิ่มมากขึ้น แต่ยังมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 13 กำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนสุทธิระหว่างแบบจำลองทั้งสองชั้น ( $P_{1 \rightarrow 2}$ )

จากรูปที่ 13 จะแสดงกำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนสุทธิจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งจะสังเกตเห็นในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 – 4 kHz ค่ากำลังการสั่นสะเทือนจะมีค่าติดลบ ซึ่งหมายความว่ากำลังการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของฐานของสปินเดิลมอเตอร์สู่แบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ แต่ที่ความถี่ 175 Hz, 7 kHz และ 10 kHz ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจะมีค่าเป็นบวกและมีค่าสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ดังกล่าวจะมีกำลังการสั่นสะเทือนถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์มากกว่าที่ความถี่อื่นๆ

โดยจากรูปที่ 13 เมื่อนำค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนสุทธิที่ถูกส่งผ่านจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ หรือค่ากำลังที่มีค่าเป็นบวกนำมารวมกัน จะสามารถสรุปค่าดังกล่าวได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์

แบบจำลอง	กำลังการส่งผ่านสุทธิจากแบบจำลองของวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์ (วัตต์)
1	0.0324
2	0.0432
3	0.0375
4	0.0296
5	0.0393

จากตารางที่ 2 จะสังเกตเห็นได้ว่าแบบจำลองที่มีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนต่ำที่สุด คือ แบบจำลองชั้นที่ 4

และแบบจำลองที่มีค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนสูงที่สุด คือ แบบจำลองชั้นที่ 2

### 6. สรุปผลการทดสอบ

จากตารางที่ 2 เมื่อลองพิจารณาเฉพาะแบบจำลองชั้นที่ 2, 3 และ 4 เมื่อค่า Interference fit มีค่าต่ำลง จะทำให้ค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำสู่ฐานของสปินเดิลมอเตอร์มีค่าที่ต่ำลง แต่เมื่อพิจารณาแบบจำลองทั้ง 5 ชั้นรวมกันจะไม่สามารถหาแนวโน้มที่ชัดเจนได้จากผลการทดสอบ ซึ่งแบบจำลองชั้นที่ 1 และ 5 จะมีแนวโน้มของค่ากำลังการส่งผ่านการสั่นสะเทือนที่แตกต่างออกไปจากแบบจำลองสามชั้นที่เหลือ ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากการความบกพร่องในประกอบแบบจำลองทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันก็เป็นได้

อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาแนวโน้มที่สังเกตได้จากผลการทดสอบแบบจำลองชั้นที่ 2, 3 และ 4 คือ เมื่อค่า Interference fit ระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและฐานของสปินเดิลมอเตอร์มีค่าที่ลดลง จะส่งผลทำให้การส่งผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างส่วนประกอบทั้งสองมีค่าที่ลดลงตามมา ซึ่งแนวคิดดังกล่าวนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบค่า Interference fit ของสปินเดิลมอเตอร์จริงเพื่อลดค่าการส่งผ่านการสั่นสะเทือนภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ต่อไป

### 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบ ซึ่งทำให้บทความฉบับนี้ประสบความสำเร็จด้วยดี จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

### 8. เอกสารอ้างอิง

[1] Beranek, LL., and Ver, IL. *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. New York: Wiley, 1992.

[2] Ajavakom, N.; Sripakagorn, P.; Singhatanadgid, P.; and Jintanawan, T. *Toward a vibro-acoustic analysis of FBD spindle motors. ASME/JSME joint conference on micromechatronics for information and precision equipment*, Santa Clara, California, 2006.

[3] กรานต์ จิ่งไพศาล, ก้องกิติ ลิวเจริญชัย, และ พุฒิพร จันทรแก้ว, การศึกษาลักษณะโครงสร้างและการ

ประกอบสปีนเดิลมอเตอร์สำหรับ Hard Disk Drives ที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนและเสียง. *โครงการปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.*

[4] Meirovitch, L. *Principles and Techniques of Vibrations*. Prentice Hall, 1997.

[5] Delaere, K., Iadevaia, M., Heylen, W., Sas, P., Hameyer, K. and Belmans, R. Statistical Energy Analysis of Acoustic Noise and Vibration for Electric Motors: Transmission from Air gap Field to Motor Frame, *Industry Application Conference vol. 3*, 1999, pp. 1897-1902.

[6] Kim, M.J., Kim, H.S., and Sohn, J.Y. Prediction and evaluation of impact sound transmission in apartment building structures by statistical energy analysis. *Applied Acoustics 62* (August 2001): 601-16

[7] Lyon, R.H. (1975). *Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems: Theory and Applications*, The MIT Press Cambridge, Massachusetts, and London, England.

[8] Sarradj, E. Energy-based vibroacoustics: SEA and beyond. *CFA/DAGA*, Strasbourg, 2004.

[9] Cimerman, B., Bharj, T., and Borello, G., Overview of the Experimental Approach to Statistical Energy Analysis, *SAE Technical Paper 971968*, 1997