



รายงานการวิจัย

การสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดการสั่น (Vibration Generator Prototype)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2542

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดการสั่น (Vibration Generator Prototype)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2542

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

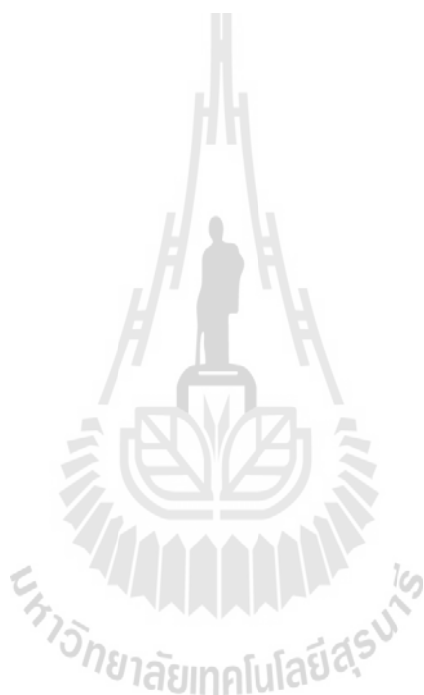
มกราคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2542 หัวหน้าโครงการขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บุคลากรของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยเหลือในการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ และดูแลด้านเทคนิคเป็นอย่างดี

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์และบุคลากรของ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ ช่วยเหลือในการจัดการด้านธุรการ งานเอกสารและอื่นๆ เป็นอย่างดี



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบของเครื่องกำเนิดการสั่น เพื่อที่จะใช้ในการเรียนการสอนระดับปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยเครื่องต้นแบบนี้จะเป็นเครื่องกำเนิดการสั่นแบบสนามแม่เหล็ก เพราะมีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย อีกทั้งมีราคาการสร้างที่ไม่แพงมากนัก ผลการทดสอบเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นโดยใช้เครื่องวัดความเร่งและความคุมการทำงานของเครื่องด้วยโปรแกรม LabVIEW พบว่าเครื่องกำเนิดการสั่นให้การขจัดของแกนกลางต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถที่จะสร้างอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กตามที่คาดหวังไว้ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ สำหรับการตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องมือโดยภาพรวมแล้วถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี ซึ่งทำให้เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้สามารถที่จะนำไปใช้งานด้านการสาธิตการสั่นทางวิศวกรรมได้จริงตามวัตถุประสงค์ของโครงการ



ABSTRACT

The purpose of this research project was to design and build a prototype of a vibration generator machine. This prototype was for use in an undergraduate laboratory. This vibration generator used magnetic actuated technology since through this technology the machine would be small and portable and would not be too expensive to build. The test result of the prototype using computer control with the LabVIEW software revealed that the displacement of middle core was lower than the design. This was because of the limitation in manufacturing of some parts. However, the frequency response of the machine was acceptable. The overall performance was fair. This prototype could then be used in laboratory demonstration for students in mechanical vibration subjects.



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การเส้นทางวิศวกรรมถือเป็นหัวข้อศึกษาหลักหัวข้อหนึ่งในการศึกษาพลศาสตร์ของระบบ และเป็นต้นเหตุสำคัญประการหนึ่งในการเสียหายของโครงสร้างหรือเครื่องจักรกลต่างๆ อย่างไรก็ตามการที่เราจะทดสอบการสั่นของเครื่องมือหรือโครงสร้างได้ อันดับแรกเราจะต้องมีเครื่องกำเนิดการสั่นขึ้นมาก่อน ซึ่งเครื่องกำเนิดการสั่นนั้นมีความจำเป็นต่อการศึกษาเรื่องเส้นทางวิศวกรรมดังนี้

1. ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลวัตของ โครงสร้างหรือแบบจำลองโครงสร้าง
2. การทำการทดสอบการสั่นปกติเพื่อหาการตอบสนองทั่วไป
3. การทดสอบเพื่อหาการตอบสนองของ โครงสร้างหรือเครื่องจักร
4. การหาค่าการสั่นพ้องของ โครงสร้างหรือเครื่องจักร
5. ใช้ในการตรวจวัดมาตรฐานของเครื่องมือวัดความเร่ง
6. ใช้ในการทดสอบความถี่ของชิ้นงาน หรือ โครงสร้าง
7. ใช้ในการสาธิตในการศึกษา
8. อื่นๆ

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีเครื่องกำเนิดการสั่นเพื่อที่จะสามารถทำการทดสอบทางด้านพลศาสตร์ต่างๆ เหล่านี้ได้

เครื่องกำเนิดการสั่นที่เป็นมาตรฐานที่มีอยู่ในประเทศในปัจจุบันนั้น ส่วนใหญ่เป็นเครื่องมือที่ได้จากการสั่งซื้อจากต่างประเทศ ทำให้เป็นเครื่องมือที่มีราคาสูง ซึ่งสาเหตุสำคัญน่าจะมาจากก่อนหน้านี้ ต้องมีเครื่องมือที่ดีในการสร้างชุดทดสอบการสั่นและมีเครื่องมือควบคุมที่มีความแม่นยำสูงในการทดสอบ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีเครื่องมือเครื่องมือที่มีคุณภาพ พร้อมทั้งจะทำการผลิตเครื่องต้นแบบได้ อีกทั้งที่ผ่านมาได้มีการจัดซื้ออุปกรณ์ควบคุมทางไฟฟ้าที่มีความทันสมัย ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถสร้างเครื่องต้นแบบขึ้นมาเพื่อทดสอบคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดการสั่น

สำหรับเครื่องกำเนิดการสั่นที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ มีหลายแบบด้วยกัน แต่เครื่องกำเนิดการสั่นที่เป็นที่ยอมรับและอยู่ในวิสัยที่ผู้วิจัยจะลองสร้างและทำการทดสอบจะเป็นเครื่องกำเนิดการสั่นแบบใช้สนามแม่เหล็ก เพราะสามารถที่จะสร้างขึ้นโดยใช้งบประมาณไม่มากนัก มีขนาดเล็กสามารถที่จะเคลื่อนย้ายไปมาสะดวก เหมาะแก่การใช้ในห้องปฏิบัติการ และใช้ในการสาธิตในห้องเรียนเพื่อให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในบทเรียนได้ดีขึ้น ตลอดจนเครื่องมือควบคุมที่มีอยู่เดิมในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ โดยไม่ต้องจัดซื้ออุปกรณ์อื่นเพิ่มเติมมากนัก

1.2 วัตถุประสงค์

1. จัดสร้างเครื่องกำเนิดการสั่นทางวิศวกรรมแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการสร้างการสั่นให้กับชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรกล หรือการสั่นของโครงสร้างต่าง ๆ
2. ใช้เป็นเครื่องมือพื้นฐานในการศึกษาวิจัยการสั่นในระดับบัณฑิตศึกษา

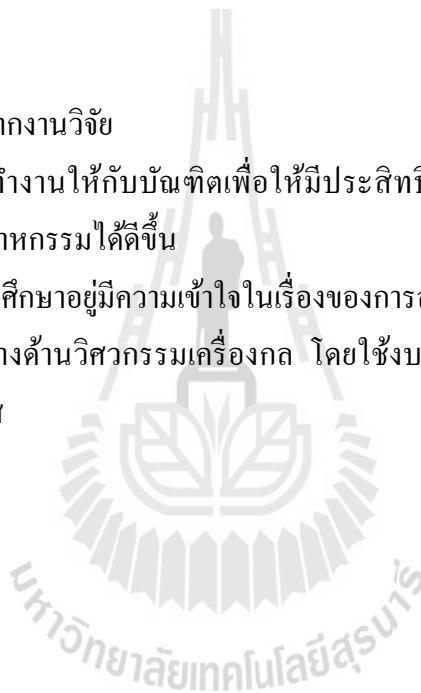
1.3 ขอบเขตงานวิจัย

สร้างเครื่องต้นแบบการกำเนิดการสั่นทางวิศวกรรมควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดย

1. สามารถรับแรงกระทำได้สูงสุด 20 kN
2. ความถี่สูงสุด 200 Hz

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เพิ่มศักยภาพในการทำงานให้กับบัณฑิตเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และนำความรู้ไปพัฒนาใช้กับภาคอุตสาหกรรมได้ดียิ่งขึ้น
2. ทำให้นักศึกษาที่กำลังศึกษาอยู่มีความเข้าใจในเรื่องของการสั่นทางวิศวกรรมมากขึ้น
3. เพิ่มห้องปฏิบัติการทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล โดยใช้งบประมาณน้อยเมื่อเทียบกับการจัดซื้อจากต่างประเทศ



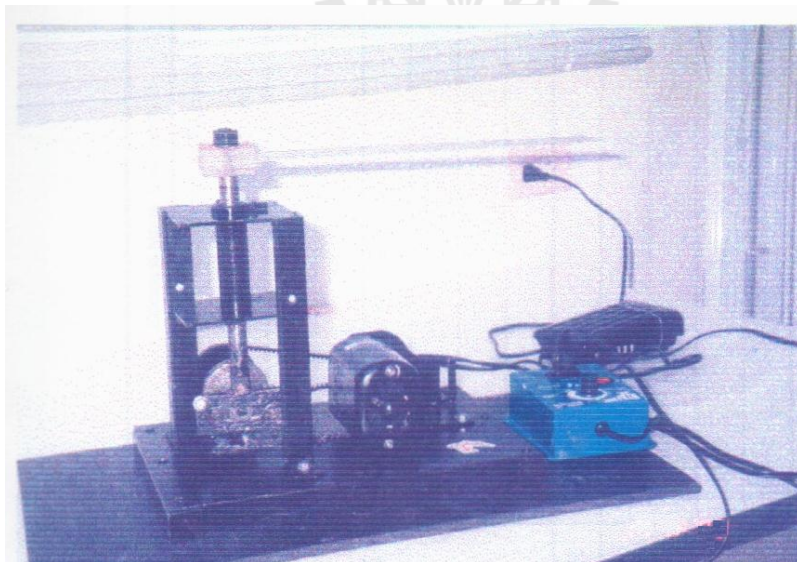
บทที่ 2

หลักการทํางานของเครื่องกําเนิดการสั่น

2.1 เครื่องกําเนิดการสั่นแบบต่างๆ

เครื่องกําเนิดการสั่นที่นิยมใช้ในการทดสอบทางวิศวกรรมมีหลายแบบโดยแต่ละแบบมีข้อดีและข้อเสียต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามสามารถที่จะแบ่งเครื่องกําเนิดการสั่นเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท ดังนี้คือ

1. เครื่องกําเนิดการสั่นแบบกล (Mechanical Vibration Exciter) เครื่องกําเนิดการสั่นแบบนี้ เป็นเครื่องกําเนิดการสั่นที่สร้างขึ้นเองได้อย่างง่ายคือจะใช้หลักการของลูกเบี้ยว หรือการหมุนเยื้องศูนย์กลางเป็นหลัก เป็นเครื่องที่มีราคาถูก บำรุงรักษาง่าย สามารถกำหนดความถี่ของแรงกระทำได้โดยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนข้อเสียก็คือ ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่จะมีมวลมาก เป็นการหมุนที่เยื้องศูนย์กลาง ดังนั้นแรงเยื้องศูนย์กลางจะมีค่ามากทำให้ฐานรองรับต้องแข็งแรง อีกทั้งจะทำให้ความถี่ธรรมชาติของเครื่องกําเนิดการสั่นแบบนี้มีค่าต่ำการทดลองจึงจำกัดในช่วงที่ความถี่ธรรมชาติของระบบที่ทดสอบมีค่าต่ำ และข้อเสียที่สำคัญของเครื่องกําเนิดการสั่นประเภทนี้คือสามารถที่จะกระตุ้นการสั่นแบบฮาร์โมนิกส์ได้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถที่จะให้การสั่นในรูปคลื่นประเภทอื่นได้



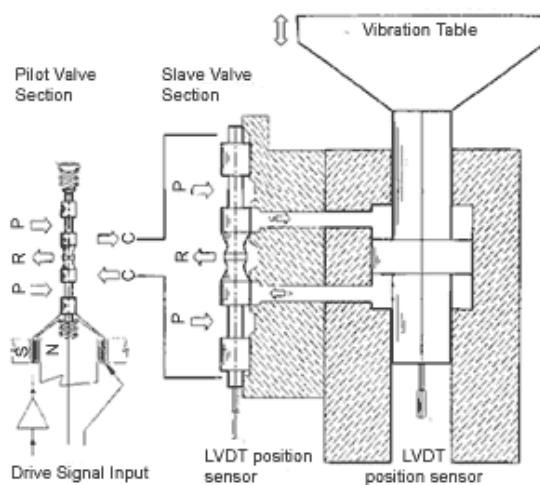
รูปที่ 2.1 เครื่องกําเนิดการสั่นเชิงกล

2 เครื่องกำเนิดการสั่นแบบใช้ไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Vibration Exciter)

เครื่องกำเนิดการสั่นแบบนี้ อาศัยการใช้ระบบไฮดรอลิกส์ควบคุมการสั่น โดยควบคุมการเปิด-ปิดน้ำมันเข้าสู่ระบบแล้วทำให้เกิดการสั่นขึ้นซึ่งจะสามารถทำงานได้ดีในกรณีที่ต้องใช้แรงในการสั่นที่มีขนาดสูง เช่นการที่จะทดสอบการสั่นกับโครงสร้างขนาดใหญ่ หรือ ยานยนต์ที่มีน้ำหนักมากๆ เพราะระบบเช่นนี้สามารถรองรับแรงที่มีขนาดสูงๆ ได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบนี้ก็คือระบบจะควบคุมระยะการสั่นได้ยาก ดังนั้นจึงมักจะมีช่วงกว้างการสั่นที่สูงเพื่อหาคะพิกัดการทำงานได้ง่ายขึ้น ซึ่งผลที่ตามมาก็คือความถี่ที่เครื่องกำเนิดการสั่นนี้กระตุ้นจะเป็นความถี่ที่ต่ำ ดังนั้นอุปกรณ์ที่จะใช้กับเครื่องกำเนิดการสั่นประเภทนี้จึงต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีความถี่ธรรมชาติที่ไม่สูงมาก ข้อเสียอีกประการหนึ่งก็คือระบบนี้จะมีราคาสูงเพราะ โครงสร้างของอุปกรณ์ต่างๆ จะต้องมีความคงทนสูงเพื่อรองรับแรงขนาดใหญ่ได้ เครื่องมือประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.2 และในรูปที่ 2.3 เป็นการแสดงแผนผังของเครื่องกำเนิดการสั่นประเภทนี้



รูปที่ 2.2 เครื่องกำเนิดการสั่นแบบไฮดรอลิกส์ขนาดเล็ก

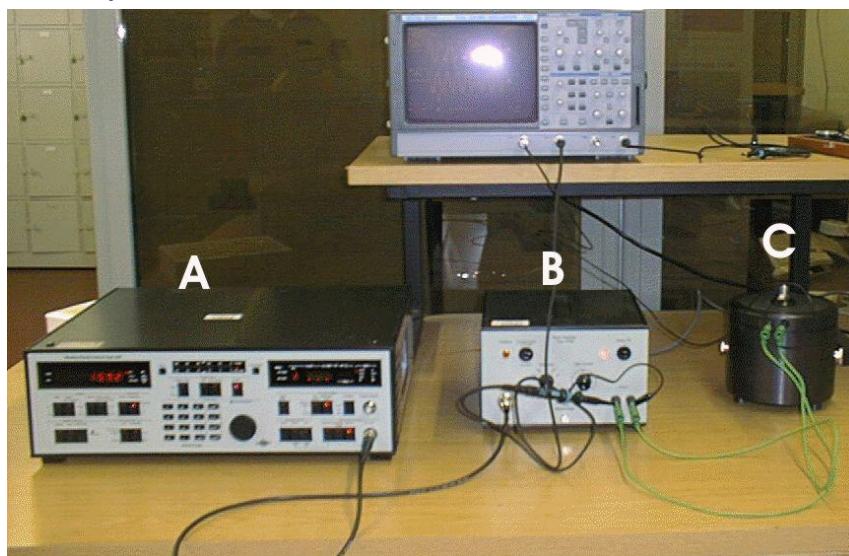


รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงการทำงานของเครื่องกำเนิดการสั่นแบบไฮดรอลิกส์
3 เครื่องกำเนิดการสั่นแบบใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electrodynamics Vibration Exciter)

เครื่องกำเนิดการสั่นประเภทนี้ อาศัยหลักของสนามแม่เหล็ก โดยมีการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับแกนที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะเมื่อได้รับไฟฟ้ากระแสสลับแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะสลับขั้วขึ้นเหนือ-ขั้วใต้ ตามความถี่ของกระแสสลับที่ได้ ซึ่งแม่เหล็กนี้ก็จะออกแรงผลักหรือดูดกับแม่เหล็กถาวรที่สร้างอยู่ภายในเครื่อง ทำให้เกิดการสั่นตามความถี่ที่ได้รับจากกระแสไฟฟ้าสลับ เครื่องมือประเภทนี้จึงสามารถตอบสนองต่อความถี่ที่กระตุ้นสูงๆ ได้ดี เพราะส่วนที่เคลื่อนที่มักจะมีน้ำหนักที่เบา ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติมีค่าสูงรองรับความถี่สูงได้ดี สามารถรองรับแรงที่กระทำได้ระดับหนึ่ง ข้อเสียของเครื่องมือประเภทนี้คือต้องมีระบบควบคุมที่ดี มีความยุ่งยากในการออกแบบระบบควบคุมทางไฟฟ้า และอุปกรณ์เหล่านี้มักมีราคาสูง ตัวอย่างของเครื่องมือประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.4 และสำหรับรูปที่ 2.5 เป็นการแสดงองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดการสั่นพร้อมอุปกรณ์ควบคุมและเครื่องมือวัดความเร่ง



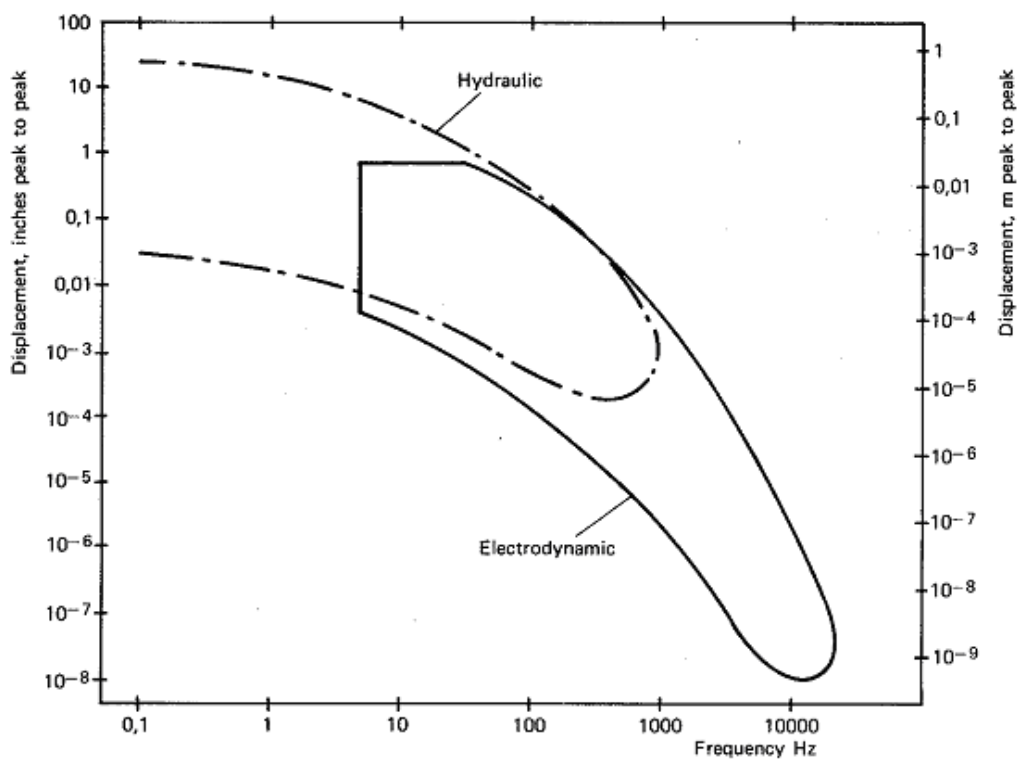
รูปที่ 2.4 เครื่องกำเนิดการสั่นแบบสนามแม่เหล็ก ขนาดเล็ก



รูปที่ 2.5 เครื่องกำเนิดการสั่นแบบสนามแม่เหล็ก พร้อมเครื่องควบคุมและเครื่องมือวัด

จากที่กล่าวมา ทำให้งานวิจัยนี้ เลือกที่จะลองสร้างต้นแบบของเครื่องกำเนิดการสั่นที่ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเป็นการทดสอบความเป็นไปได้ของการสร้างเครื่องมือประเภทนี้ที่มีราคาถูก ดังนั้นรายละเอียดการทำงานของเครื่องมือประเภทนี้จะกล่าวถึงอีกครั้งหนึ่ง

เครื่องกำเนิดการสั่นที่นิยมใช้ในวงการวิจัยทั่วไป จะเป็นแบบไฮดรอลิก และแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามเหตุผลที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้แล้ว ข้อแตกต่างที่ชัดเจนของเครื่องทั้งสองคือ ขนาดของการเคลื่อนที่ และความถี่ที่เครื่องนี้สามารถที่จะทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบการทำงานของเครื่องกำเนิดการสั่น Jens Trampe Broch, *Mechanical Vibration and Shock Measurements*, 2nd Ed., Bruel & Kjaer, 1984.

2.2 เครื่องกำเนิดการสั่นแบบสนามแม่เหล็ก

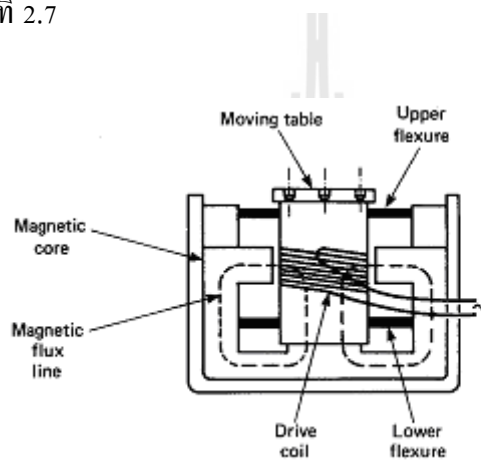
ตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้แล้วว่าเครื่องกำเนิดการสั่นแบบสนามแม่เหล็กเป็นเครื่องกำเนิดการสั่นที่เหมาะสมที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีควรวจะนำมาทดลองสร้างเครื่องต้นแบบขึ้น ทั้งนี้เพราะเป็นเครื่องที่น่าจะมีราคาไม่แพงในการสร้าง และอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ที่จำเป็นด้วย

ส่วนใหญ่ ก็มีใช้ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะประสบความสำเร็จในการสร้างเครื่องมือนี้ขึ้น

สำหรับองค์ประกอบหลักของเครื่องกำเนิดการสั่นแบบนี้ จะประกอบด้วย

- ตัวเรือน และแผ่นยางยึดหยุ่นที่ทำหน้าที่ป้องกันฝุ่น (Upper Flexure)
- แม่เหล็กถาวร (Magnetic Core)
- แกนกลางที่ทำด้วยโลหะพันรอบด้วยลวดทองแดง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น (Drive Coil)
- แผ่นยึดหยุ่นด้านล่าง (Lower flexure)
- พื้นจัดชิ้นงาน (Moving Table) ซึ่งจะยึดติดกับแกนกลาง

ทั้งหมดนี้แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดการสั่นแบบสนามแม่เหล็ก

สำหรับหลักการทำงานเบื้องต้น ของเครื่องมือนี้ ก็คือในเบื้องต้น แม่เหล็กถาวร จะดูดแกนกลางที่เป็น โลหะให้ติดอยู่กับแม่เหล็ก จากนั้นเมื่อมีการปล่อยไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ขดลวดไฟฟ้า จะทำให้แกนกลางนั้นมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น และเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสลับมีการสลับขั้วอยู่ตลอดเวลา ทำให้แกนกลางแม่เหล็กเปลี่ยนคุณสมบัติเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้ สลับกันด้วยความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ให้ ดังนั้นการผลัดหรือดูดกันของแม่เหล็กถาวร และแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะเกิดขึ้นสลับกันไป ทำให้แกนกลางพร้อมกับพื้นจับชิ้นงานขยับหรือสั่นขึ้นลง ด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ให้ สำหรับขนาดของการขจัดก็จะขึ้นอยู่กับแรงดูดหรือผลักระหว่างแม่เหล็กทั้งสอง ซึ่งจะควบคุมได้จากความต่างศักย์ของกระแสไฟที่ให้กับขดลวด ในขณะที่แผ่นยางยึดหยุ่นทั้งสองจะทำหน้าที่เหมือนกับสปริงจึงทำให้การตอบสนองของแกนกลางเหมือนกับระบบการสั่นที่มีลำดับขั้นความเป็นอิสระเท่ากับหนึ่งภายใต้แรงกระทำ ซึ่งแรงที่ได้ก็จะ เป็นแรงดูดและผลักรันของแม่เหล็กไฟฟ้า

ในทางปฏิบัติการประกอบแกนกลางซึ่งทำหน้าที่เป็น Armature จะสามารถกระทำได้ 2 แบบ ตามความต้องการการตอบสนองการสั่น การประกอบแกนกลางทั้งสองแบบคือ

1. Inductive Armature Assembly
2. Conductive Armature Assembly

สำหรับที่ได้อธิบายผ่านมานั้นเป็นการใช้แกนกลางแบบ Conductive Armature Assembly ซึ่งเป็นแบบที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดการสั่นขนาดเล็ก เพราะกำลังที่มาจากกระแสไฟฟ้าจะเข้าสู่แกนการเคลื่อนที่โดยตรง ทำให้บางครั้งเรียกแกนกลางแบบนี้ว่า Direct Coupled

สำหรับการคำนวณหาขนาดแรงที่ได้ในการเคลื่อนที่จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$f = (BL)i \quad (2.1)$$

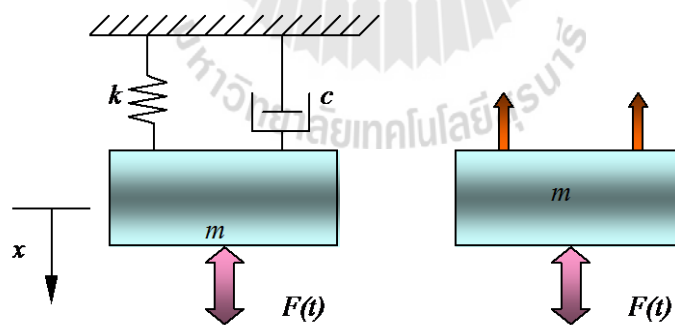
เมื่อ f คือแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับแกนกลาง มีหน่วยเป็น N

B เป็น Magnetic Flux Density มีหน่วยเป็น Wb / m^2

L เป็นความยาวของ Conductor มีหน่วยเป็น m

i เป็นกระแสที่เข้าสู่แกนกลาง มีหน่วยเป็น A

เมื่อทราบขนาดของแรงกระทำ และความถี่ของแรงที่กระทำจะเท่ากับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวด ทำให้ทราบถึงแรงพลวัตที่กระทำต่อแกนกลางที่เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งเราสามารถที่จะหาการตอบสนองของแกนกลางภายใต้แรงกระทำได้จากการใช้แบบจำลองการสั่นของระบบหนึ่งลำดับชั้นการเป็นอิสระ ภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์โมนิกส์ (Harmonics force vibration of one degree of freedom system) ซึ่งจำลองระบบได้ตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบหนึ่งลำดับชั้นการเป็นอิสระ ภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์โมนิกส์

ผลตอบสนองของระบบที่มีความหน่วงแบบหนืด ซึ่งจากสมการการเคลื่อนที่ (2.2) และการกำหนดฟังก์ชันของแรงเป็น $F = F_0 \cos \omega t$ เราจะได้สมการการเคลื่อนที่ที่เป็น

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (2.2)$$

ผลเฉลยของสมการนี้จะมีสองส่วนคือ ส่วนผลเฉลยเอกพันธ์ และส่วนปริพันธ์เฉพาะ และเนื่องจากการสั่นแบบอิสระแบบมีความหน่วงจะหายไปเมื่อระยะเวลาผ่านไปพอสมควร ดังนั้นจึงจะไม่ให้ความสนใจกับการสั่นชั่วคราวในส่วนนี้ จากนั้นหากพิจารณาผลเฉลยในส่วนของปริพันธ์เฉพาะซึ่งทำให้เกิดการสั่นอย่างคงตัวของระบบ โดยจะมองหาผลเฉลยตามลักษณะของฟังก์ชันของแรงที่กระทำ ดังนั้นในที่นี้เราจะมองหาผลเฉลยในรูป

$$x_p(t) = X \cos(\omega t - \phi) \quad (2.3)$$

เมื่อ X และ ϕ เป็นค่าคงที่ ซึ่งหมายความว่าเราได้มองหาผลตอบสนองของระบบต่อแรงกระทำนี้ด้วยการตอบสนองที่สอดคล้องไปกับแรงกระทำ แต่อาจมีมุมเฟสเปลี่ยนแปลงไปจากแรงที่กระทำบ้าง ซึ่งจากการมองหาผลเฉลยตามสมการ (2.2) นี้ทำให้ได้ค่าความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่เป็น

$$\dot{x} = -X\omega \sin(\omega t - \phi)$$

และ

$$\ddot{x} = -X\omega^2 \cos(\omega t - \phi)$$

ตามลำดับ จากนั้นแทนค่าลงในสมการการเคลื่อนที่ (2.4) จะได้

$$m[-X\omega^2 \cos(\omega t - \phi)] + c[-X\omega \sin(\omega t - \phi)] + kX \cos(\omega t - \phi) = F_0 \cos \omega t \quad (2.4)$$

และจากเอกลักษณ์ของตรีโกณมิติ

$$\cos(\omega t - \phi) = \cos \omega t \cos \phi + \sin \omega t \sin \phi$$

$$\sin(\omega t - \phi) = \sin \omega t \cos \phi - \cos \omega t \sin \phi$$

ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการ (2.4) ได้ในรูป

$$-mX\omega^2 \cos \omega t \cos \phi - mX\omega^2 \sin \omega t \sin \phi - cX\omega \sin \omega t \cos \phi + cX\omega \cos \omega t \sin \phi + kX \cos \omega t \cos \phi + kX \sin \omega t \sin \phi = F_0 \cos \omega t$$

จากนั้นเราเทียบสัมประสิทธิ์ของเทอม $\cos \omega t$ และเทอม $\sin \omega t$ จะได้

$$\text{เทอม } \cos \omega t : \quad -mX\omega^2 \cos \phi + cX\omega \sin \phi + kX \cos \phi = F_0 \quad (2.5)$$

$$\text{เทอม } \sin \omega t : \quad -mX\omega^2 \sin \phi - cX\omega \cos \phi + kX \sin \phi = 0 \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) นี้เราได้

$$(k - m\omega^2) \sin \phi - c\omega \cos \phi = 0$$

$$\tan \phi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \quad (2.7)$$

จากบทที่สองเราได้นิยามอัตราส่วนความหน่วง ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$c = c_0 \zeta = 2m\omega_n \zeta \quad (2.8)$$

และจากความถี่ธรรมชาติ

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.8) และ (2.9) เราสามารถเขียนสมการ (2.7) ได้ในรูป

$$\tan \phi = \frac{c\omega/m}{\frac{k}{m} - \omega^2} = \frac{2\omega_n \omega \zeta}{\omega_n^2 - \omega^2}$$

หรือ

$$\tan \phi = \frac{2 \frac{\omega}{\omega_n} \zeta}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.10)$$

จากอัตราส่วนความถี่ $r = \omega/\omega_n$ ทำให้สมการ (3.10) เขียนได้ในรูป

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{2r\zeta}{1-r^2} \right] \quad (2.11)$$

ส่วนค่าขนาดของการสั่น X เราจะสามารถหาได้จากการพิจารณาสมการ (2.5) และ (2.6) คือ

$$\begin{aligned} X[(k - m\omega^2) \cos \phi + c\omega \sin \phi] &= F_0 \\ X[(k - m\omega^2) \sin \phi - c\omega \cos \phi] &= 0 \end{aligned}$$

จากนั้นยกกำลัง 2 สมการทั้งสอง จะได้

$$X^2[(k - m\omega^2)^2 \cos^2 \phi + (c\omega)^2 \sin^2 \phi + 2c\omega(k - m\omega^2)^2 \cos \phi \sin \phi] = F_0^2 \quad (2.12a)$$

$$X^2[(k - m\omega^2)^2 \sin^2 \phi + (c\omega)^2 \cos^2 \phi - 2c\omega(k - m\omega^2)^2 \cos \phi \sin \phi] = 0 \quad (2.12b)$$

และเมื่อนำสมการ (2.12) ทั้งสองมารวมกัน เราจะได้

$$X^2[(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2] = F_0^2$$

หรือ

$$X = \frac{F_0}{\left\{ k^2 \left(1 - \frac{m}{k} \omega^2 \right)^2 + (c\omega)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.13)$$

จากคุณสมบัติ $c = c_c \zeta = 2m\omega_n \zeta$, $\omega_n^2 = \frac{k}{m}$ และ $r = \omega/\omega_n$ เราสามารถจัดรูปสมการ (2.13) ให้อยู่ในรูปอื่นได้ดังนี้

$$X = \frac{F_0}{\left\{ k^2 \left(1 - \frac{m}{k} \omega^2 \right)^2 + (2m\omega_n \zeta \omega)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}$$

$$X = \frac{F_0 / k_0}{\left[\left(1 - \frac{m}{k} \omega^2 \right)^2 + \left(2 \frac{m}{k} \omega_n \zeta \omega \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$X = \frac{F_0 / k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.14)$$

และจากการจัดสถิติ $\delta_{st} = \frac{F_0}{k}$ ทำให้เราจัดสมการ (2.14) ได้ในรูป

$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.15)$$

จากนั้นนิยาม อัตราส่วนขนาด (Amplitude Ratio หรือ Magnification Factor หรือ Normalized Magnitude) เป็น

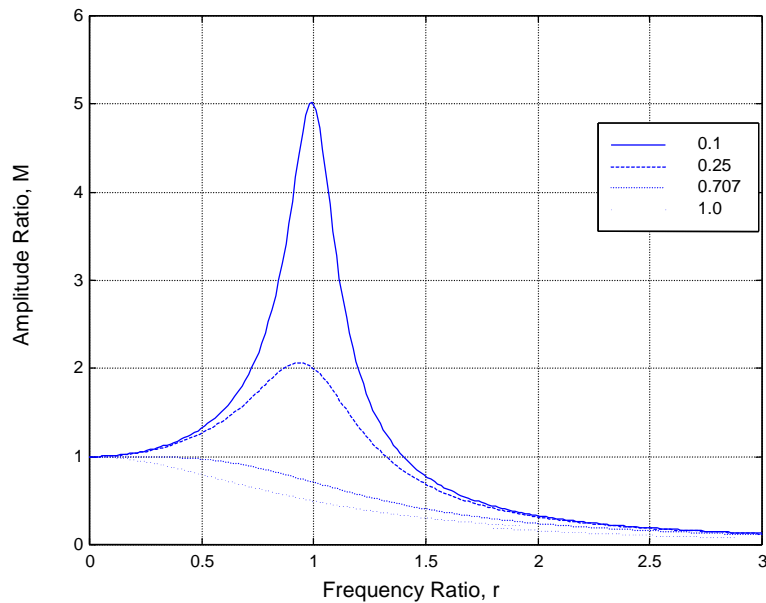
$$M = \frac{X}{\delta_{st}}$$

ซึ่งอัตราส่วนขนาดการสั่นนี้เป็นการเปรียบเทียบการตอบสนองเมื่อแรงมีขนาดเท่ากันแต่แรงหนึ่งเป็นแรงพลวัตในขณะที่อีกแรงหนึ่งเป็นแรงสถิต ซึ่งจากสมการ (2.15) จะได้

$$M = \frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.16)$$

และ
$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{2\zeta r}{1-r^2} \right] \quad (2.17)$$

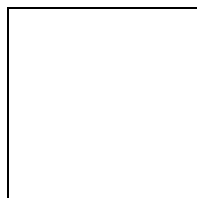
รูปที่ 2.9 ได้แสดงถึงผลตอบสนองของระบบในรูปไม่มีมิติตามสมการ (2.16) ตามค่าอัตราส่วนความถี่ที่เปลี่ยนไป โดยกราฟแต่ละเส้นแสดงถึงค่าอัตราส่วนความถี่ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงผลการตอบสนองของขนาดการสั่นเทียบกับค่าความถี่ของแรงกระทำ

สำหรับสมการแสดงขนาดของการสั่นตามรูปที่ 2.9 นี้เราสามารถพิจารณาการตอบสนองของระบบต่อส่วนต่างๆ ที่สำคัญได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบที่ไม่มี ความหน่วง ($\zeta = 0$) เมื่อ $r \rightarrow 1$ ตามสมการ (2.16) จะได้ $M \rightarrow \infty$ ซึ่งระบบจะเข้าสู่การสั่นพ้อง ตามที่ได้ศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา
2. การที่เรา มีความหน่วงในระบบการสั่น ไม่ว่าจะมากหรือน้อยเพียงใดก็ตาม ($\zeta > 0$) เราจะสามารถที่จะลดขนาดของการตอบสนอง (M) ได้ทุกความถี่ของแรงกระทำ และตำแหน่งที่เกิดการสั่นสูงสุด หรือค่า M_{\max} จะเกิดขึ้นที่ $r < 1$ สำหรับทุกค่าของ ζ
3. ทุกค่าของอัตราส่วนความหน่วง ζ เมื่ออัตราส่วนความถี่มีค่าสูง ($r \rightarrow \infty$) การตอบสนองของระบบจะมีค่าน้อย ($M \rightarrow 0$)
4. ที่ค่าอัตราส่วนความถี่ r ที่กำหนดให้แน่นอนค่าหนึ่ง การเพิ่มความหน่วงหรือเพิ่มค่า



จะทำให้ขนาดของการตอบสนอง M มีค่าลดลง

5. สำหรับกรณีที่แรงกระทำเป็นแรงกระทำสถิต ($\omega = 0$) นั่นคือเราได้ $r = 0$ จะได้ว่าขนาดของผลการตอบสนอง $M = \frac{x}{\delta_{st}} = 1$
6. ในกรณีที่ $r = 1$ เราจะได้ $M = \frac{1}{2\zeta}$

7. การกำหนดค่า ζ มาให้ ค่า r ที่จะทำให้เกิดการสั่นมากที่สุดหรือได้ค่า M_{\max} เราจะสามารถหาได้จากการพิจารณา ดังต่อไปนี้

$$M = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} = \{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2\}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

เนื่องจาก $M = M(r)$ ถ้าเรากำหนดค่าที่แน่นอนของ ζ มาให้ ดังนั้นเราสามารถหาค่าสูงสุดของฟังก์ชันนี้ได้ ด้วยการหาอนุพันธ์เทียบกับ r แล้วให้มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยเราได้อนุพันธ์เป็น

$$\frac{dM}{dr} = -\frac{1}{2} \{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2\}^{-\frac{3}{2}} [2(1-r^2)(-2r) + 2(2\zeta r)(2\zeta)] \quad (2.19)$$

ฟังก์ชันนี้จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\frac{dM}{dr} = 0$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} 4r(1-r^2) + 8\zeta^2 r &= 0 \\ [4(1-r^2) + 8\zeta^2]r &= 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

ซึ่งเราสามารถพิจารณาได้ดังนี้คือ

กรณีที่ 1 คือพิจารณาว่า $r=0$ ซึ่งกรณีนี้จะเป็นกรณีของแรงสถิตที่กระทำกับระบบ และเราจะไม่พิจารณาในที่นี้

กรณีที่ 2 คือพิจารณาว่า $4(1-r^2) + 8\zeta^2 = 0$ ซึ่งจะทำให้ได้

$$r = \sqrt{1-2\zeta^2} \quad (2.21)$$

นั่นคือที่ $r = \sqrt{1-2\zeta^2}$ จะได้ค่า M มากที่สุด อย่างไรก็ตามเนื่องจาก r ต้องเป็นเลขจำนวนจริงเท่านั้น ดังนั้นสมการนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อค่าในรากที่สองต้องมีค่าเป็นบวก นั่นคือ

$$1-2\zeta^2 > 0 \quad (2.22)$$

หรือเราได้ว่า

$$\zeta < \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.23)$$

นั่นคือ ถ้าหาก $0 < \zeta < \frac{1}{\sqrt{2}}$ เราจะได้อนุพันธ์ $\frac{dM}{dr} = 0$ นั่นคือได้ค่า M สูงสุดเมื่อค่าอัตราส่วนความถี่ $r = \sqrt{1 - 2\zeta^2}$ และหากเราแทนค่า $r = \sqrt{1 - 2\zeta^2}$ นี้ลงไปในสมการ (2.18) เราจะได้ค่า M ที่เป็นค่าสูงสุด ซึ่งจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \frac{1}{\sqrt{(1 - (1 - 2\zeta^2))^2 + 4\zeta^2(1 - 2\zeta^2)}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{4\zeta^4 + 4\zeta^2 - 8\zeta^4}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{4\zeta^2 - 4\zeta^4}} \end{aligned}$$

นั่นคืออัตราส่วนขนาด M จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ

$$M_{\max} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.24)$$

และถ้าเรากำหนดค่าอัตราส่วนความถี่ของระบบมาให้ในช่วง $1 < \zeta < \frac{1}{\sqrt{2}}$ เราจะได้ว่าการสั่นของระบบจะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าอัตราส่วนความถี่มีค่าเป็น

$$r = \sqrt{1 - 2\zeta^2}$$

ซึ่งเราจะพบว่าที่อัตราส่วนความถี่ในช่วง $1 < \zeta < \frac{1}{\sqrt{2}}$ นี้ การเกิดการสั่นสูงสุดจะเกิดขึ้นก่อนที่จะเป็นการสั่นพ้องเสมอ

สำหรับในกรณีที่ค่าอัตราส่วนความถี่มีค่ามากกว่า $\frac{1}{\sqrt{2}}$ เราจะต้องพิจารณา สมการ (2.19) ใหม่ อีกครั้งหนึ่ง นั่นคือจากสมการ (2.19)

$$\frac{dM}{dr} = \frac{-[4(1 - r^2) + 8\zeta^2]r}{2[(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2]^{3/2}}$$

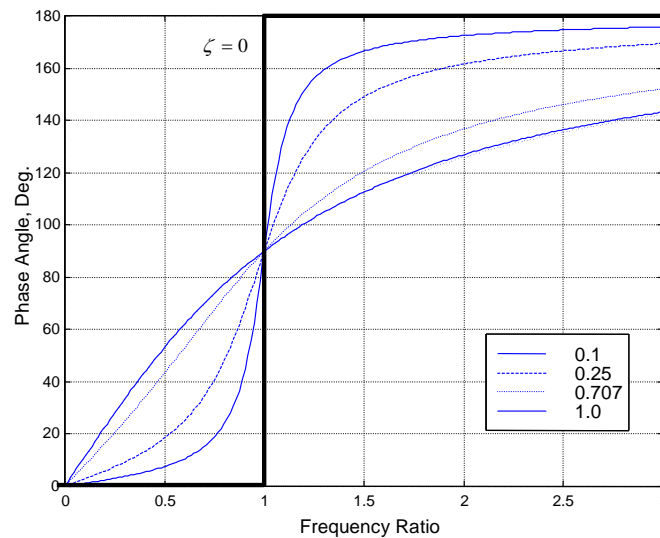
หรือ

$$\frac{dM}{dr} = \frac{-2[(1 - r^2) + 2\zeta^2]r}{[(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2]^{3/2}}$$

จากสมการนี้เมื่อเราพิจารณาว่า $\zeta > \frac{1}{\sqrt{2}}$ แล้วเราจะพบว่า $\frac{dM}{dr} < 0$ สำหรับทุกค่าของ r นั่นหมายความว่ากราฟของ M เทียบต่อ r นี้จะมีความชันเป็นลบเสมอหาก $\zeta > \frac{1}{\sqrt{2}}$ ซึ่งจะทำให้ขนาดของ M นี้มีขนาดลดลงเพียงอย่างเดียว (Monotonic Decrease)

จึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้า $\zeta > \frac{1}{2}$ และ $r > 0$ แล้วขนาด M จะลดลงเรื่อยๆ ตามค่า r ซึ่งก็คือ ผลการตอบสนองภายใต้แรงพลวัตจะมีค่าน้อยกว่าผลตอบสนองภายใต้แรงสถิตเสมอไม่ว่าแรงพลวัตที่กระทำนั้นจะมีความถี่เท่าใดก็ตาม จนกระทั่งขนาดของ M มีค่าเป็นศูนย์เมื่ออัตราส่วนความถี่ r มีค่ามากๆ

การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสเราจะได้กราฟการเปลี่ยนแปลงตามรูปที่ 2.10 ซึ่งได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสตามสมการ (2.17) ที่ค่าอัตราส่วนความถี่ต่างๆ



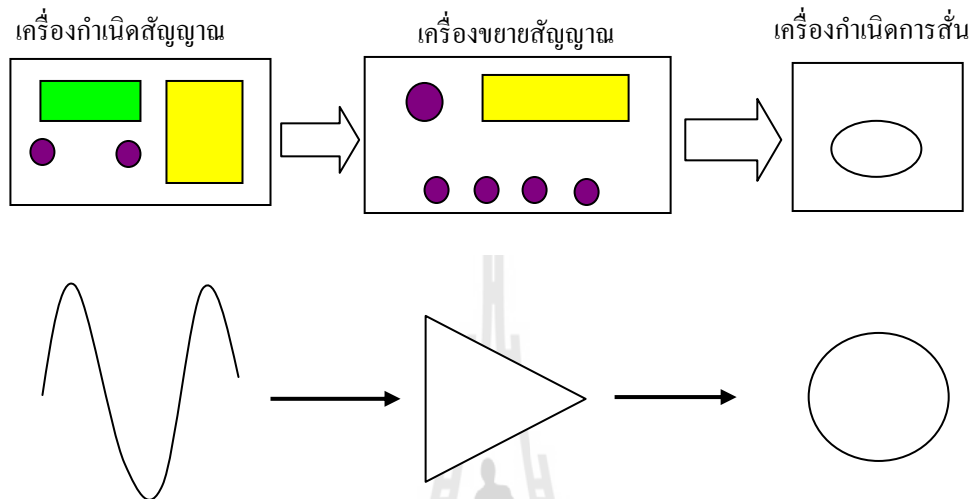
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงผลการตอบสนองของมุมเฟสเทียบกับค่าความถี่ของแรงกระทำ

ซึ่งจากรูปที่ 2.10 นี้เราพบว่า

1. เมื่อ $\zeta = 0$ จะได้ว่ามุมเฟสเท่ากับศูนย์ เมื่อ $0 < r < 1$ และมุมเฟสจะเท่ากับ 180° เมื่อ $r > 1$ นั่นคือ เมื่อ $\zeta = 0$ การสั่นจะอยู่ในเฟสเดียวกับแรงกระทำ เมื่อ $r < 1$ และจะมีเฟสเป็นตรงกันข้ามกันเมื่อ $r > 1$
2. เมื่อ $\zeta > 0$ และ $0 < r < 1$ จะแรงกระทำและการตอบสนองจะมีเฟสแตกต่างกันในช่วง $0 < \phi < 90^\circ$ ดังนั้นการตอบสนองจะตามแรงกระทำอยู่ในช่วงนี้
3. เมื่อ $\zeta > 0$ และ $r > 1$ จะเกิดเฟสแตกต่างกันอยู่ในช่วง $90^\circ < \phi < 180^\circ$ ดังนั้นช่วงนี้การตอบสนองจะนำแรงกระทำ
4. เมื่อ $\zeta > 0$ และ $r = 1$ จะได้มุมเฟส $\phi = 90^\circ$ สำหรับทุกค่าของอัตราส่วนความถี่
5. เมื่อ $\zeta > 0$ และ $r \rightarrow \infty$ จะพบว่า $\phi \rightarrow 180^\circ$ ดังนั้นเมื่อ $r \rightarrow \infty$ ทั้งสองจะมีเฟสตรงกันข้าม

2.3 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดการสั่นแบบสนามแม่เหล็ก

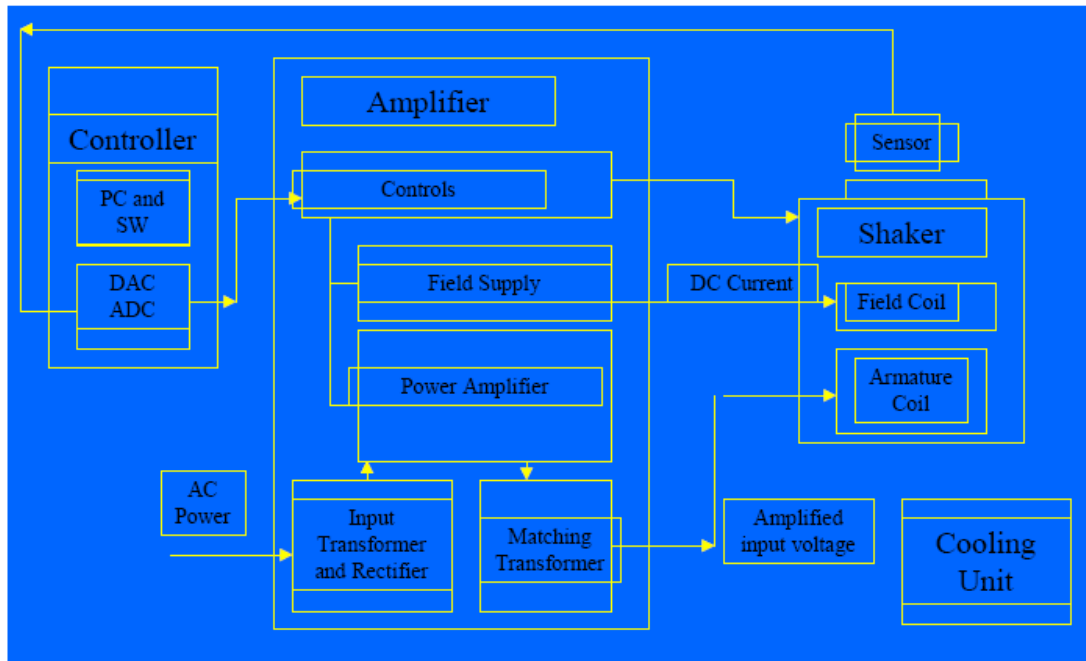
สำหรับระบบควบคุมที่ใช้กับเครื่องกำเนิดการสั่น จะมีแผนภาพแสดงการทำงานโดยคร่าวๆ ตามรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของระบบควบคุมที่ใช้กับเครื่องกำเนิดการสั่น

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าในลำดับแรก จะเป็นการสร้างสัญญาณที่ต้องการจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปขยายให้มีกำลังสูงขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณด้วยทั่วไปจะมีกำลังต่ำไม่สามารถที่จะนำไปใช้ในการขับเคลื่อนให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งที่เครื่องขยายสัญญาณนี้เราจะสามารถปรับขนาดของกระแสไฟที่จะส่งเข้าเครื่องกำเนิดการสั่นได้ เพื่อควบคุมช่วงกว้างของการสั่นได้นั่นเอง จากนั้นกระแสไฟที่มีค่ากระแสหรือความต่างศักย์ที่สูงและมีความถี่เดียวกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ ก็จะเข้าสู่เครื่องกำเนิดการสั่นทำให้เกิดการสั่นในเครื่องต่อไป

ในทางปฏิบัติวงจรการควบคุมอาจมีความยุ่งยากมากกว่านี้ เพราะจะมีวงจรไฟฟ้าอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งแผนภาพแสดงวงจรการควบคุมแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนผังระบบควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดการสั่น

ในระบบที่ใช้กันเ็นทางปฏิบัติ วงจรและเครื่องมือเหล่านี้อาจถูกนำไปสร้างรวมกันเป็นเครื่องมือ 2 ถึง 3 ชั้น เพื่อการสะดวกในการใช้งานและการควบคุม ซึ่งทั้งหมดก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ใช้ และสภาพแวดล้อมของงานด้วย

ข้อที่ควรคำนึงถึงระบบขยายสัญญาณนั้นมีอยู่หลายประการด้วยกัน เพราะการที่จะควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดการสั่นให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ เราจะต้องได้เครื่องมือควบคุมที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับงานหรือเครื่องมือที่จะใช้ อุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดการสั่นที่สำคัญที่สุด ก็คือเครื่องขยายสัญญาณ ข้อควรคำนึงถึงของเครื่องขยายสัญญาณที่จะใช้ร่วมกับเครื่องกำเนิดการสั่นมีดังนี้

1. ลักษณะของ Armature เป็นชนิด Inductive หรือ Conductive
2. ความต้องการกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดการสั่นว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด
3. ความต้องการกระแสเพื่อรักษาสภาพสนามแม่เหล็ก
4. จะเป็นเครื่องขยายสัญญาณแบบ IGBT หรือ MOSFET
5. ควรจะมี Interlock หรือไม่

และประเด็นอื่นๆ ซึ่งส่วนนี้มีผลต่อการจะเลือกใช้ หรือ สร้างเครื่องขยายสัญญาณที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดการสั่นทั้งสิ้น

บทที่ 3

การสร้างเครื่องกำเนิดการสั่น

3.1 การสร้างตัวเครื่อง

การที่จะทำการสร้างเครื่องกำเนิดการสั่น จำเป็นที่จะต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพื่อป้องกันถึงคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดการสั่นที่จะสร้างขึ้นเป็นเครื่องต้นแบบ เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นการสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อการเรียนการสอนและงานวิจัยพื้นฐาน ดังนั้นเครื่องมือที่จะสร้างจึงกำหนดให้มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก สามารถที่จะเคลื่อนย้ายให้สะดวก ใช้กำลังไฟไม่มาก ซึ่งจากจุดประสงค์ของการสร้างเครื่องกำเนิดการสั่นนี้ ทำให้ได้ข้อกำหนดสำหรับพารามิเตอร์ที่สำคัญ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบเบื้องต้นคือ

1. ช่วงความถี่ ที่เครื่องจะทำงาน ซึ่งช่วงความถี่ที่กำหนดนี้จะเป็นการกำหนดว่าค่าความถี่ธรรมชาติตามแนวการเคลื่อนที่ของแกนกลางจะต้องมีค่าต่ำที่สุดเป็นเท่าใด โดยค่าความถี่ธรรมชาติต่ำสุดของแกนกลางจะต้องมีค่าสูงกว่าความถี่สูงสุดที่เครื่องกระตุ้นการสั่นจะทำงาน
2. ขนาดของความเร่ง ความเร็วและการขจัด ที่จะให้เกิดขึ้น โดยเครื่องกำเนิดการสั่น ซึ่งค่าทางกลศาสตร์นี้จะเป็นการกำหนดว่าเครื่องจะต้องมีขนาดเท่าใด และต้องการแรงกระทำเท่าใด ซึ่งได้กล่าวมาบ้างแล้วในบทที่ผ่านมา
3. ขนาดและมวลของชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบ ส่วนนี้จะเป็นค่าที่นำมาคำนวณเป็นมวลที่เกิดการเคลื่อนที่
4. ขนาดของ power amplifier ที่ต้องใช้

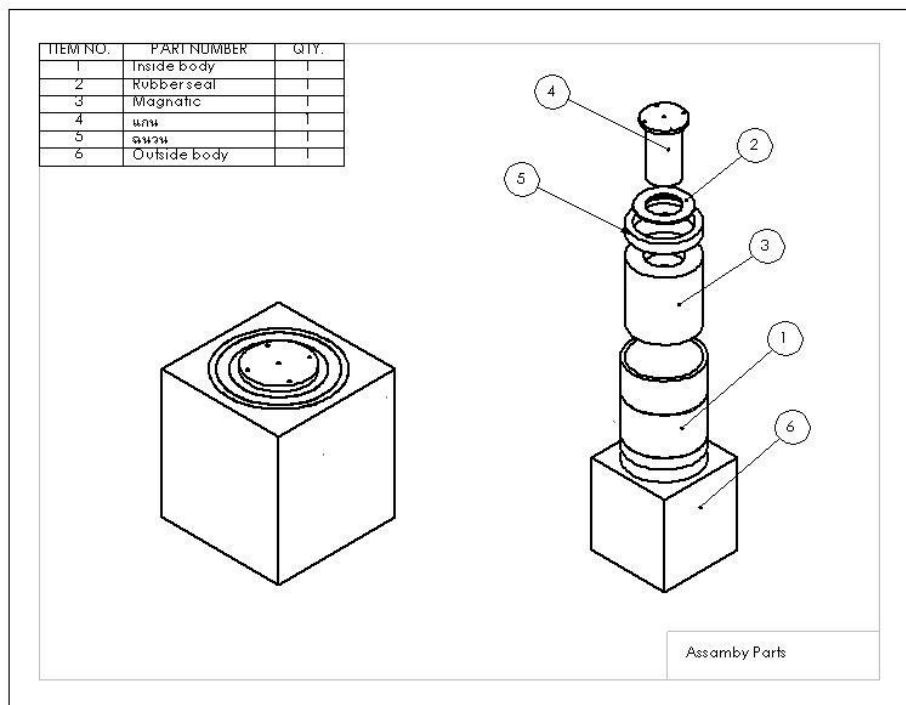
เพื่อความเหมาะสมเราจะสร้างขึ้นเป็นเครื่องมือที่มีวัตถุประสงค์หลักคือเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสาธิตคุณสมบัติของระบบการสั่นที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำ ดังนั้นเครื่องมือควรมีลักษณะดังนี้

1. มีขนาดเล็กเคลื่อนย้ายสะดวก เหมาะแก่การนำไปใช้สาธิตในห้องเรียนและห้องปฏิบัติการ
2. ใช้กำลังไฟต่ำเพื่อให้ power amplify มีขนาดเล็ก เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย
3. ชิ้นทดสอบมีขนาดเล็ก มีมวลน้อย

หลังจากที่ได้ข้อกำหนดพื้นฐานของเครื่องต้นแบบที่จะทำการสร้าง ขึ้นต่อไปจะเป็นการกำหนดคุณสมบัติทางเทคนิคของเครื่องให้สอดคล้องกับข้อกำหนดพื้นฐาน และให้สอดคล้องกับเครื่องมือวัดและเครื่องมือควบคุมที่มีใช้ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งจากการประเมินรายละเอียดต่างๆ เบื้องต้นทำให้มีการกำหนดกรอบทางเทคนิคเบื้องต้นของเครื่องต้นแบบเครื่องกำเนิดการสั่นดังนี้

1. ช่วงความถี่ทำงาน 5-1000 Hz
2. แรงกระทำ 100 N
3. ระยะการขจัดสูงสุด (peak-peak) 15 mm
4. ความเร็วสูงสุด 1 m/s
5. ความเร่งสูงสุด 15 g

จากข้อกำหนดทางเทคนิค และองค์ประกอบต่างๆ ทำให้สามารถที่จะทำการกำหนดขนาดและมิติของเครื่องกำเนิดการสั่น ในเบื้องต้นได้ ซึ่งในเบื้องต้นได้มีการพิจารณารายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆ ที่สำคัญดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 สำหรับรายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆ ทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก



รูปที่ 3.1 เครื่องต้นแบบเครื่องกำเนิดการสั่น

3.2 เครื่องมือควบคุมที่ใช้

เครื่องมือควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อความสะดวกและการประหยัด เราเลือกใช้เครื่องมือควบคุมที่มีอยู่แล้วในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งจากเครื่องกำเนิดการสั่นที่ได้มีการกำหนดขนาดเบื้องต้นที่กำหนดมาก่อนหน้านี้ ทำให้ได้เลือกใช้เครื่องมือควบคุม ต่อไปนี้

เครื่องขยายสัญญาณ

สำหรับเครื่องขยายสัญญาณที่ใช้เป็นรุ่น SA-30 ซึ่งมีคุณสมบัติตามคู่มือของเครื่องขยายสัญญาณ จะมีคุณสมบัติที่สำคัญตามตารางที่ 3.1

Sinusoidal Input				Amplifier Output SA-30				
H	GpK	IPS	Inch P-P	Vrms	Arms	Kva		
5	2.03		1.57	40.2	30.2	1214		
7	3.97		1.57	58.5	37	2165		
13.5	14.88	67	1.57	100	38.5	3850		
20	22.12	67		105	40.6	4263		
92	100	67		95	225	21375		
500	100			51.3	230	11799		
800	100			76.7	208	15954		
1000	100			87.3	184	16063		
1500	100			87.3	119	10389		
1800	100			70	76	5320		
2000	100			46.6	41	1911		
2500	100			38.5	44	1694		
3000	100			103	93	9579		
				Max Output	110	330	36300	
				Max Total Used			21375	
							% of Max	
				Max Vrm	105		95.50%	
				Max Arms		230	69.70%	

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติที่สำคัญของเครื่องขยายสัญญาณ

3.3 การควบคุม

สำหรับการควบคุมของระบบควบคุมและระบบตรวจสอบการทำงานของเครื่อง เพื่อให้การควบคุมแบบป้อนมีความสมบูรณ์ ดังนั้นจะต้องมีการใช้เครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer) ติดเข้ากับแกนกลางที่มีการเคลื่อนที่ สำหรับเครื่องมือวัดความเร่งที่ใช้มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

1. มวลโดยประมาณ 70 gram
2. ช่วงความถี่ 1 – 3000 Hz
3. ความเร่งสูงสุด 25 g

สำหรับลักษณะภายนอกของเครื่องมือวัดความเร่งที่ใช้ในงานวิจัย จะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 3.2 เครื่องมือวัดความเร่ง

เครื่องมือวัดความเร่งที่ใช้ มีรายละเอียดทางเทคนิคโดยละเอียด ตามที่แสดงในรูปที่ 3.3

Model	CXL25M3	Units	Remarks
Span	± 25	G	$\pm 5\%$
Sensitivity	80	mV/G	$\pm 5\%$
Bandwidth	OC-100	Hz	$\pm 5\%$
Noise	50	mg rms	Typical
Noise Density	5000	$\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$	
Zero, Output	$+25 \pm 0.1$	Volts	
Zero, Drift	± 60 ± 0.75	mV G	0°C to 70°C 0°C to 70°C

	± 145	mV	-40°C to +85°C
	± 1.8	G	-40°C to +85°C
Span Output	$\pm 2.0 \pm 0.1$	Volts	
Nonlinearity	± 0.2	%FS	Typical
Alignment	± 2	degrees	Typical
Transverse Sensitivity	± 3.5	%FS	Typical
Temperature Range	- 40 to + 85	°C	
Shock	2000	G	
Output Loading	$>10\text{k}\Omega, <1\text{nF}$		Max
Supply Voltage	-5 ± 0.25	Volts	
Supply Voltage -R option	-8-30	Volts	Unregulated
Supply Current	8	mA	Typical

รูปที่ 3.3 รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องมือวัดความเร่ง

นอกเหนือจากเครื่องมือวัดแล้ว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมียุทธศาสตร์การวัด และระบบการเก็บข้อมูล สำหรับระบบการวัดและระบบการเก็บข้อมูลนั้น ได้ใช้อุปกรณ์ของ National Instrument และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป LabVIEW ช่วงในการทำการระบบการเก็บข้อมูล เครื่องมือช่วยการวัดมีรายละเอียดดังนี้

เครื่องมือเก็บข้อมูล (DAQ Card) ได้ใช้ของบริษัท National Instrument แบบ PCI Card รุ่น 16 XE-10 มีลักษณะภายนอกดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 และมีคุณลักษณะที่สำคัญดังที่แสดงในรูปที่ 3.5

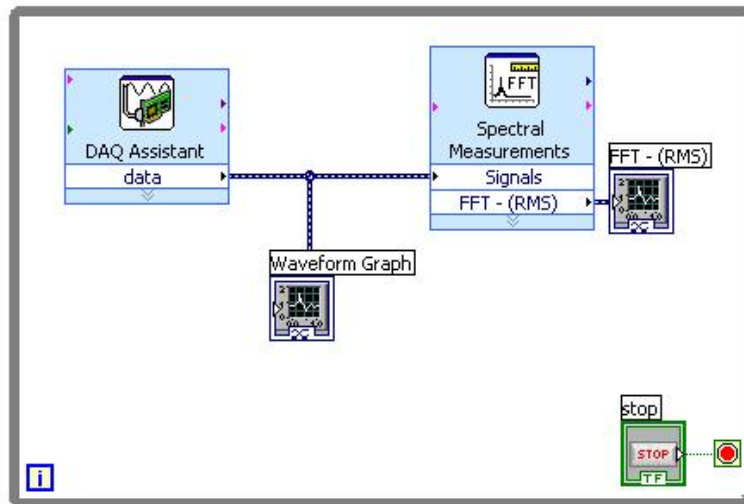


รูปที่ 3.4 DAQ Card รุ่น PCI-MIO-16 XE-10 มีคุณลักษณะที่สำคัญดังนี้

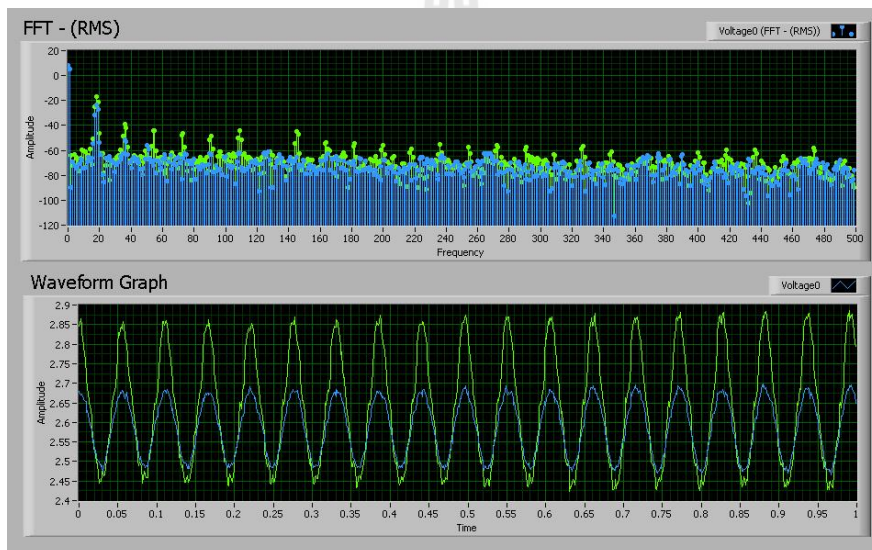
Input Characteristics	
Number of channels	
PCI-MIO-16E-1	
PCI-MIO-16E-4.....	16 single-ended or 3 differential (software-selectable per channel)
PCI-6071E.....	64 single-ended or 32 differential (software-selectable per channel)
Type of ADC.....	Successive approximation
Resolution.....	12 bits, 1 in 4.096
Max sampling rate (single-channel)	
PCI-MIO-16E-1,PCI-6071E.....	1.25 MS/s
PCI-MIO-16E-4.....	500 kS/s

รูปที่ 3.5 คุณสมบัติเบื้องต้นของ DAQ Card

สำหรับการที่จะควบคุมการทำงานของ DAQ Card จำเป็นที่จะต้องมีการช่วยในการกำหนดค่าต่างๆที่จำเป็นที่จะบันทึก รวมทั้งพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการวัด ในการวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อการวัดโดยเฉพาะ คือโปรแกรม LabVIEW ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สร้างขึ้นมาเพื่อระบบการวัดและการควบคุมโดยเฉพาะ โปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ได้มีการเขียน Front Panel และ Block Diagram ดังนี้



รูปที่ 3.6 ตัวอย่าง Block Diagram ของโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 3.7 ตัวอย่าง Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW

เมื่อได้มีการสร้างกำหนดลักษณะของส่วนต่างๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปจะเป็น การทำการทดสอบระบบซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดการสั่น เครื่องขยายสัญญาณ เครื่องมือวัดและ อุปกรณ์เก็บข้อมูล ซึ่งทั้งหมดจำเป็นที่จะต้องทำงานร่วมกันได้อย่างเรียบร้อย เครื่องมือจึงจะ สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์

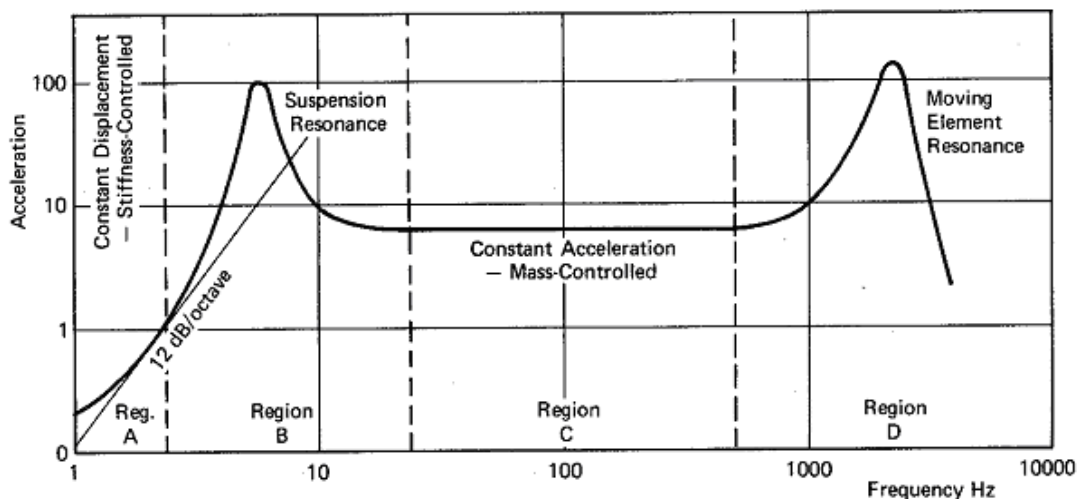
บทที่ 4

การทดสอบเครื่องกำเนิดการสั่น

4.1 คุณสมบัติที่สำคัญของเครื่องกำเนิดการสั่น

เครื่องกำเนิดการสั่นมีคุณสมบัติที่สำคัญคือการตอบสนองของแกนกลางซึ่งเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ ต่อค่าความถี่ที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดการสั่น เพราะคุณสมบัตินี้จะเป็นค่าที่บ่งชี้ว่าเครื่องกำเนิดการสั่นมีการตอบสนองต่ออินพุตในโดเมนของความถี่เป็นอย่างไร และเนื่องจากเครื่องมือวัดที่ใช้วัดเป็นเครื่องวัดความเร่ง ดังนั้นจึงมักจะแสดงกราฟคุณสมบัติออกมาในรูปของการตอบสนองของความเร่ง เทียบกับความถี่ที่ป้อนให้กับเครื่องทดสอบการสั่น

การตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องกำเนิดการสั่นแบบสนามแม่เหล็กโดยทางทฤษฎีหรือตามแนวความคิดแล้ว ก็จะเหมือนกับการตอบสนองของระบบที่มีลำดับชั้นความเป็นอิสระทั่วไป ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การตอบสนองตามอุดมคติของเครื่องกำเนิดการสั่นแบบสนามแม่เหล็ก

ในรูปที่ 4.1 การตอบสนองของเครื่องกำเนิดการสั่นจะแบ่งออกเป็นช่วงๆ ได้ 4 ช่วงคือช่วง A, B, C และ D ตามลำดับ โดยลักษณะการตอบสนองในแต่ละช่วงเป็นดังนี้ ช่วงแรก ช่วง A เป็นช่วงที่เรียกว่า constant stiffness-displacement controlled ในช่วงนี้ความถี่ของแรงที่กระทำจะเป็นความถี่ที่ต่ำ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของมวลที่ถูกแรงกระทำจะมีการตอบสนองต่ำค่า ความเร่งของมวลจะมีค่าน้อย แต่ก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความถี่ของแรงที่กระทำ ช่วงที่ 2 ช่วง B ในช่วงนี้ความถี่ของแรงเริ่มมีค่าสูงขึ้น ถ้าหากว่าระบบที่สร้างขึ้นมีระบบรองรับหรือ suspension ซึ่งอาจเป็นแผ่นยางหรือสปริงที่ทำหน้าที่รองรับการเคลื่อนที่ของแกนกลางมีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำ ก็มีโอกาเป็นไปได้ที่จะพบเห็นการเข้าสู่การสั่นพ้องของ suspension อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติจริงสามารถที่จะออกแบบให้ความถี่ของ suspension มีค่าต่ำมากๆ จนไม่อยู่ในช่วงการ

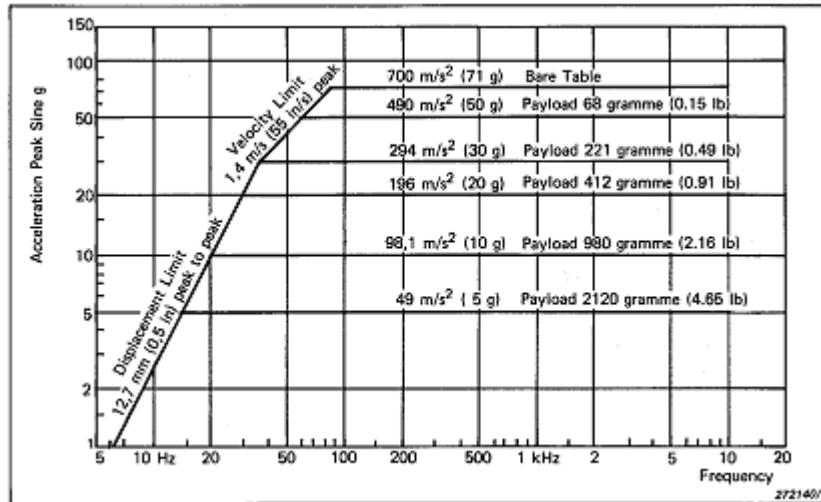
ทำงานของระบบกำเนิดการสั่น เราก็จะไม่เกิดปัญหาการสั่นอย่างรุนแรง ยกเว้นตอนเริ่มต้นการทำงานและตอนหยุดเครื่อง อาจพบการสั่นอย่างรุนแรงได้ แต่ก็เกิดในช่วงเวลาที่สั้นมาก ไม่กระทบต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดการสั่น

ช่วงที่ 3 ช่วง C เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดการสั่น ในช่วงนี้ความถี่ของสัญญาณมีค่าที่เหมาะสมกับค่าขนาดของ มวล ค่าคงที่สปริง และค่าความหน่วงของระบบ ดังนั้นค่าแรงที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีค่าคงที่ตลอดช่วง สำหรับช่วง constant acceleration- mass control นี้จึงเป็นช่วงที่เครื่องกำเนิดการสั่นให้ค่าความเร่งที่คงที่ต่อระบบที่ต้องการทดสอบ

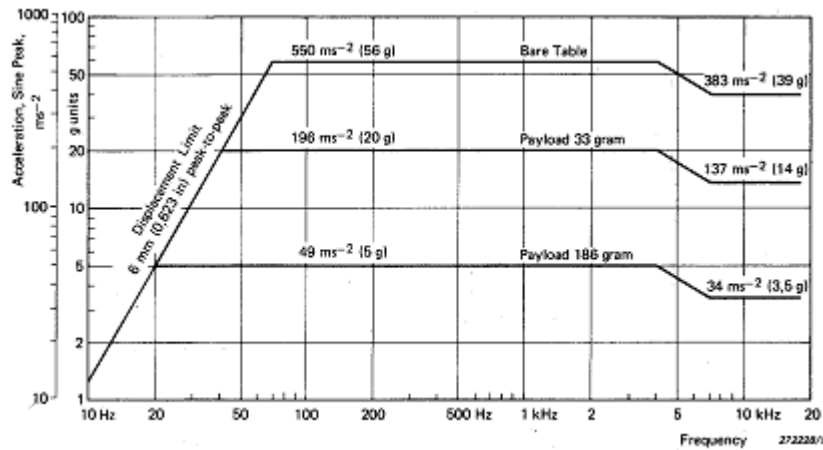
ช่วงสุดท้าย ช่วง D ช่วงนี้ความถี่จะเริ่มสูงขึ้นและอาจสูงถึงค่าความถี่ธรรมชาติของแกนกลางของเครื่องกำเนิดการสั่น ดังนั้นการสั่นในช่วงนี้จึงเป็นการสั่นพ้องของแกนกลาง หรือเรียกช่วงนี้ว่า moving element resonant ดังนั้นโดยปกติจะไม่นิยมที่ให้เครื่องกำเนิดการสั่นทำงานในช่วงนี้

สำหรับรูปที่ 4.1 ที่แสดงมานั้นเป็นคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องกำเนิดการสั่นเครื่องหนึ่ง ค่าตัวเลขที่แสดงในรูป เป็นเพียงตัวเลขของเครื่องกำเนิดการสั่นเครื่องหนึ่งเท่านั้น ไม่ใช่การตอบสนองของเครื่องทั้งหมด

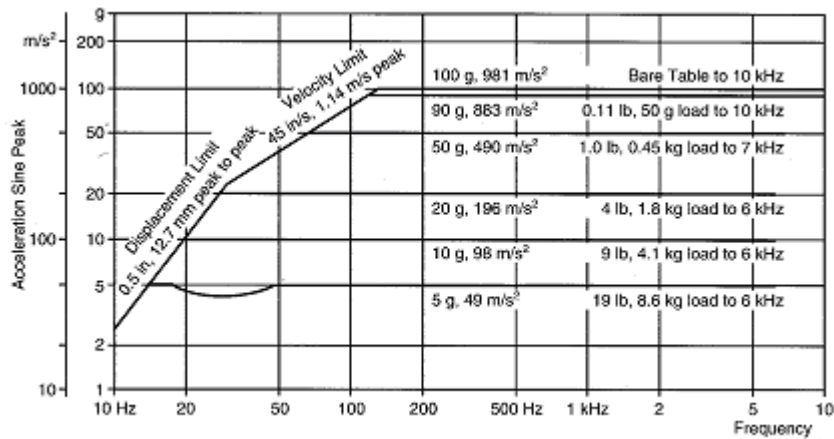
ในการทดสอบเครื่องกำเนิดการสั่น นอกเหนือจากการทดสอบระบบเครื่องกำเนิดการสั่นเปล่าๆ แล้ว การทดสอบการตอบสนองของเครื่องยังจำเป็นที่จะต้องทดสอบเมื่อมีการนำเครื่องนี้ไปต่อเข้ากับชิ้นทดสอบ ซึ่งชิ้นทดสอบเหล่านี้ก็จะทำให้มวลโดยรวมของระบบการสั่นมีค่าสูงขึ้น ทำให้การตอบสนองของระบบก็จะเปลี่ยนไปเมื่อมีมวลที่เคลื่อนที่เข้ามาเพิ่มให้กับระบบการสั่น ดังนั้นการทดสอบเครื่องกำเนิดการสั่น จึงจะต้องทดสอบทั้งเครื่องเปล่า (Bear Table) และเมื่อมีมวลมาเชื่อมต่ออยู่ด้วย สำหรับลักษณะการตอบสนองของเครื่องกำเนิดการสั่นแสดงในรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ซึ่งกราฟในรูปดังกล่าวได้แสดงการตอบสนองของเครื่องหลายๆ ขนาดต่อความถี่ที่กระทำกับเครื่องกำเนิดการสั่น ซึ่งจะเห็นว่าการตอบสนองของเครื่องกำเนิดการสั่น โดยทั่วไป มีลักษณะที่คล้ายกัน แต่อาจจะแตกต่างกันที่ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่นเครื่องกำเนิดการสั่นขนาดเล็กจะมีช่วงการเคลื่อนที่ที่แคบกว่าเพราะขนาดเล็กกว่า แต่จะสามารถทำงานที่ย่านความถี่ที่สูงกว่า เพราะเนื่องจากขนาดเล็กจะมีมวลที่น้อยกว่า ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติตามแนวการเคลื่อนที่ของแกนกลางนั้นมีค่ามากกว่า ซึ่งจะตรงกันข้ามกับเครื่องกำเนิดการสั่นที่มีขนาดใหญ่ ก็จะมีช่วงกว้างการสั่นที่สูง แต่จะรับค่าความถี่สูงสุดในการทำงาน ได้ต่ำกว่าเครื่องเล็ก เพราะมีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำกว่าเครื่องขนาดเล็กนั่นเอง



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการตอบสนองของเครื่องกำเนิดการสั่นขนาดเล็ก



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการตอบสนองของเครื่องกำเนิดการสั่นขนาดกลาง



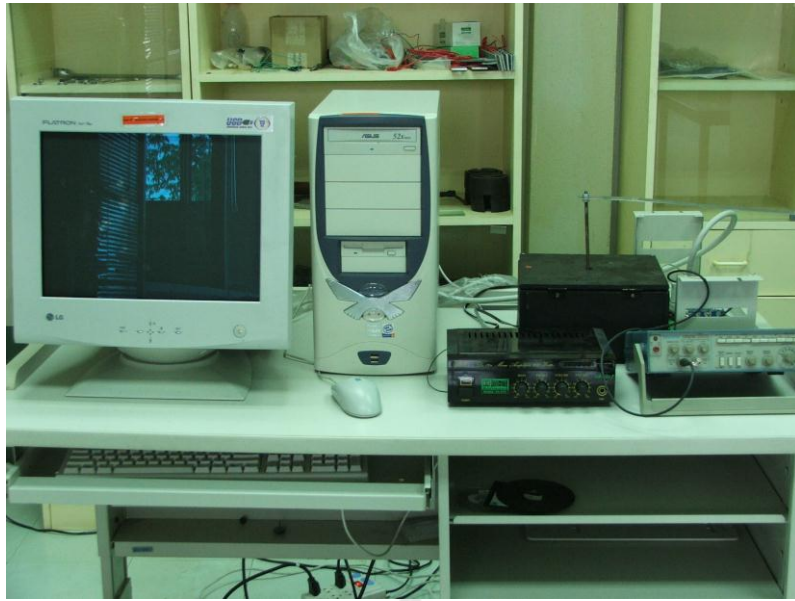
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการตอบสนองของเครื่องกำเนิดการสั่นขนาดใหญ่

4.2 การทดสอบต้นแบบ

หลังจากที่ได้ทำการสร้างเครื่องต้นแบบ ทดสอบการทำงานเบื้องต้น และมีการทดสอบระบบเครื่องมือวัดต่างๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบเครื่องต้นแบบ เพื่อหาคุณสมบัติของการตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องมือ สำหรับขั้นตอนการทดสอบเครื่องต้นแบบ เครื่องกำเนิดการสั่นนั้น มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมเครื่องมือ และต่อสายของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ให้เรียบร้อย
2. กำหนดค่าสัญญาณที่ออกจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ให้เป็น sine curve
3. เลือกค่าความถี่ของสัญญาณ เริ่มต้นเป็น 5 Hz
4. ปรับเพิ่มกำลังของ Power Amplifier โดยค่อยๆ เริ่มจากศูนย์ สังเกตการณ์สั่นของเครื่องกำเนิดการสั่น โดยดูจากค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดความเร่งเป็นหลัก
5. เมื่อระบบเริ่มสั่น รอให้ระบบเสถียรก่อน จึงเริ่มอ่านค่าความเร่งที่ได้
6. อ่านค่าความเร่งและบันทึกผล
7. ปรับค่าความถี่เพิ่มขึ้น โดยในการทดสอบนี้ทำการปรับค่าความถี่ครั้งละ 5 Hz
8. รอให้ระบบเสถียรจึงทำการอ่านค่าความเร่ง
9. บันทึกค่า และปรับค่าความถี่ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึง 1000 Hz
10. ค่อยๆ ลดค่าความถี่ลง จนกระทั่งเครื่องหยุดการสั่น
11. ทำการเพิ่มมวลให้กับเครื่องกำเนิดการสั่น
12. มวลที่ได้มีค่า 50 gram, 75 gram, 100 gram ตามลำดับ
13. ทำการทดลองซ้ำในแต่ละมวล

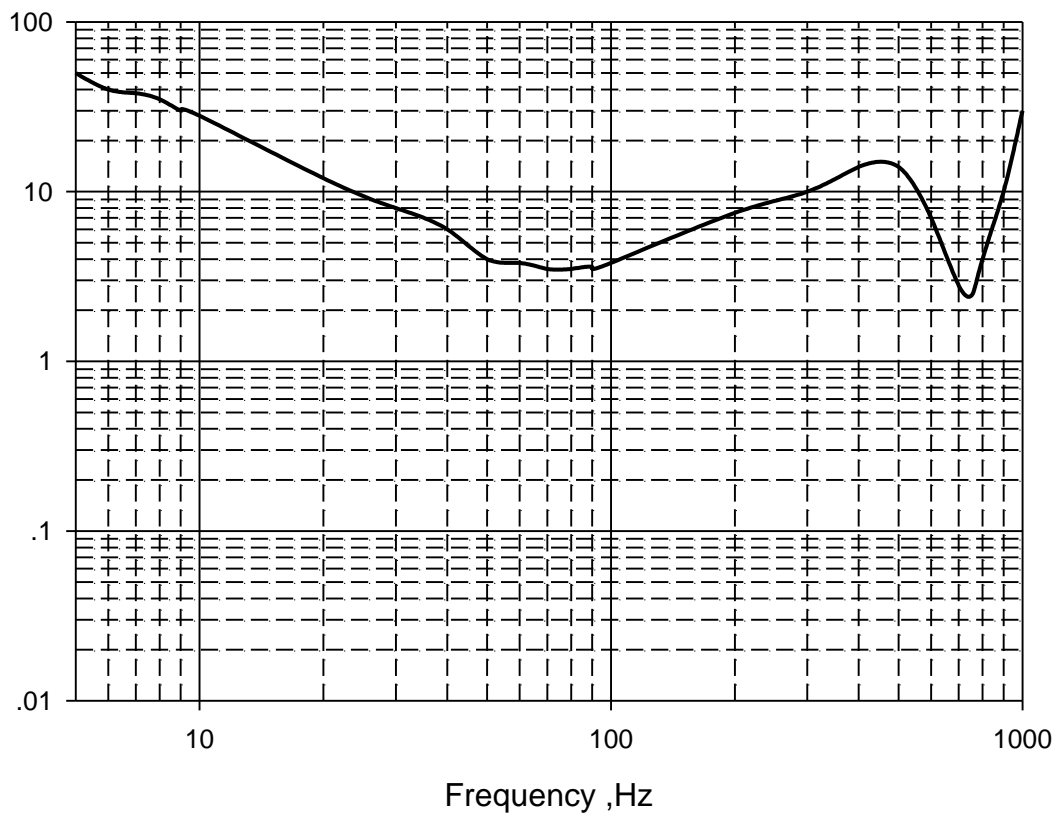
รูปที่ 4.5 เป็นรูปการแสดงผลการติดตั้งเครื่องต้นแบบเพื่อการทดสอบเครื่องต้นแบบ และในระหว่างการทดสอบ หากพบว่าระบบได้เข้าสู่การสั่นพ้อง จะหยุดการทดสอบแม้ว่าความถี่ที่ให้กับเครื่องกำเนิดการสั่น ยังไม่ถึงช่วงสูงสุดที่กำหนดก็ตาม เพื่อป้องกันการเสียหายของเครื่อง



รูปที่ 4.5 การติดตั้งเครื่องมือเพื่อทำการทดสอบเครื่องต้นแบบเครื่องกำเนิดการสั่น

4.3 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อความถี่

จากขั้นตอนการทดสอบเครื่องต้นแบบ ทำให้เราได้ผลการทดสอบการตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องต้นแบบตามกราฟในรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นว่าการตอบสนองนั้นมีความแตกต่างจากการตอบสนองทางอุดมคติพอสมควร อาจเนื่องจากระบบความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่คงที่เนื่องจากกระบวนการสร้างเครื่องต้นแบบ

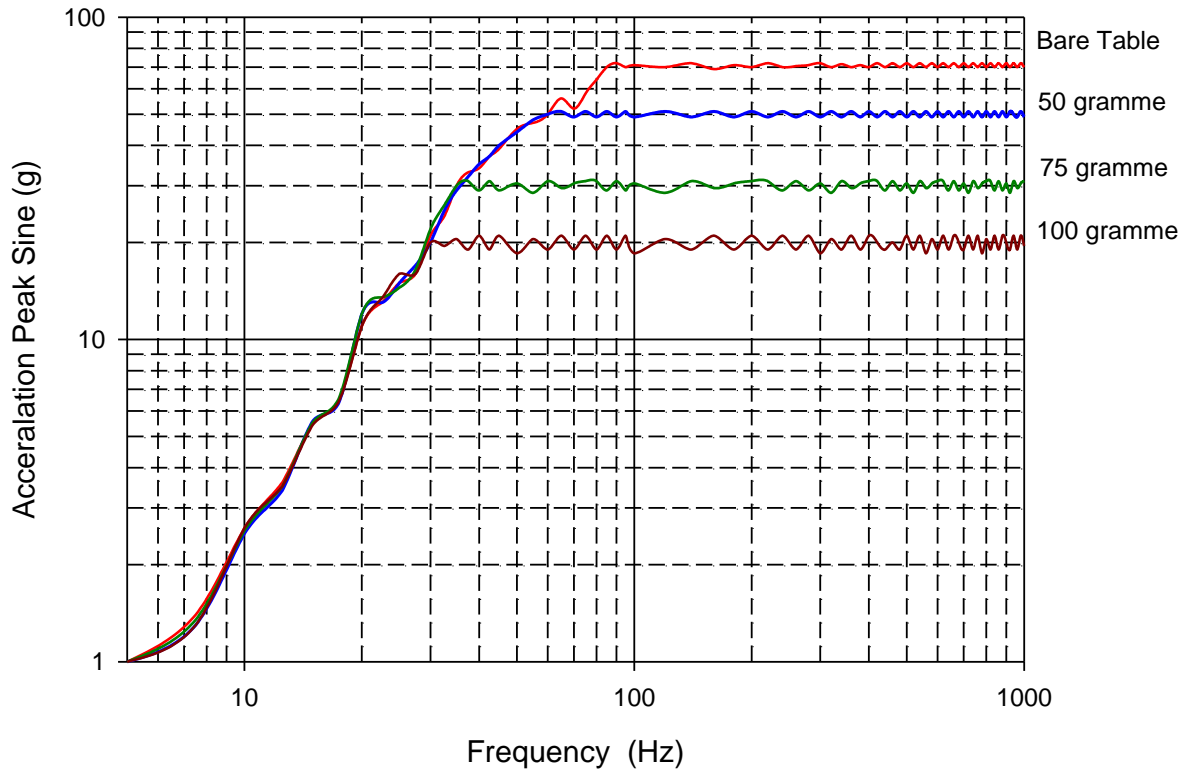


Frequency ,Hz

รูปที่ 4.6



สำหรับในรูปที่ 4.7 เป็นการแสดงการตอบสนองต่อความถี่เมื่อมีการประกอบเข้ากับฐาน และวัดเปรียบเทียบความเร่ง



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุป

ในการสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องกำเนิดการสั่น ตามจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ แม้ว่าเครื่องมือต้นแบบจะไม่สามารถทำงานในทุกด้านได้ตามที่ผู้ทำการวิจัย ได้ตั้งเป้าหมายและออกแบบสร้างไว้ แต่เครื่องกำเนิดการสั่นก็สามารถที่จะทำงานพื้นฐานเบื้องต้น ได้ดีในระดับหนึ่ง สำหรับผลการสร้างเครื่องกำเนิดต้นแบบสรุปได้ดังนี้

1. เครื่องกำเนิดการสั่นให้การจัดของแกนกลางต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้เนื่องจาก ไม่สามารถที่จะสร้างอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กตามที่คาดหวังไว้ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ
2. แรงกระทำที่กระทำต่อแกนกลางมีค่าน้อยกว่าค่าที่ออกแบบไว้มาก สาเหตุนี้เนื่องมาจากการพันขดลวดรอบแกนกลางนั้นมีข้อจำกัดเพราะขณะผู้ทำการวิจัย ขาดประสบการณ์ในด้านนี้ และแม้ว่าจะให้ผู้เชี่ยวชาญในการพันขดลวดเข้ามาช่วยแก้ไข ก็เพิ่มแรงกระทำได้เพียงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะการเลือกวัสดุในเบื้องต้นไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตามเมื่อได้ปรับแก้ถึงขั้นสุดท้ายก็สามารถที่จะได้แรงกระทำสูงสุดมาได้ประมาณครึ่งหนึ่งของค่าที่ออกแบบไว้
3. การตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องมือ โดยภาพรวมแล้วถือว่าอยู่ในเกณฑ์ใช้ได้ ซึ่งจะเห็นได้จากการพิจารณาจากกราฟที่ได้จากการทดลอง ค่าต่างๆ มีการสั่นอยู่บ้าง แตกต่างจากทางทฤษฎี ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ และการต่อเชื่อมสายไฟและสายสัญญาณต่างๆ ยังใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร
4. การทดสอบใช้เวลานาน เพราะเครื่องมือวัดต่างๆ เป็นเครื่องมือที่ละเอียดอ่อน การวัดสัญญาณที่ออกจากเครื่องวัดความเร่งมีค่าที่ไม่แน่นอน อาจจะเป็นเนื่องจากการที่ใช้เครื่องมือวัดความเร่งกับเครื่องรวบรวมสัญญาณไม่เหมาะสมกัน ทำให้ต้องมีการวัดหลายครั้ง
5. การดำเนินการวิจัยใช้เวลานานกว่าที่คาดไว้มาก เนื่องจากในขั้นวางแผนได้มีการคาดการณ์ว่าจะได้รับจัดสรรเครื่องมือวัดและเครื่องมือทดสอบต่างๆ จากทางมหาวิทยาลัย แต่เนื่องจากการได้รับจัดสรรเครื่องมือมีความล่าช้าออกไปประมาณ 2 ปีงบประมาณ จึงได้มีการจัดซื้อผ่านโครงการเงินกู้ของธนาคารโลก แทน เมื่อได้เครื่องมือต่างๆ แล้วจึงสามารถที่จะเริ่มทำการทดสอบได้

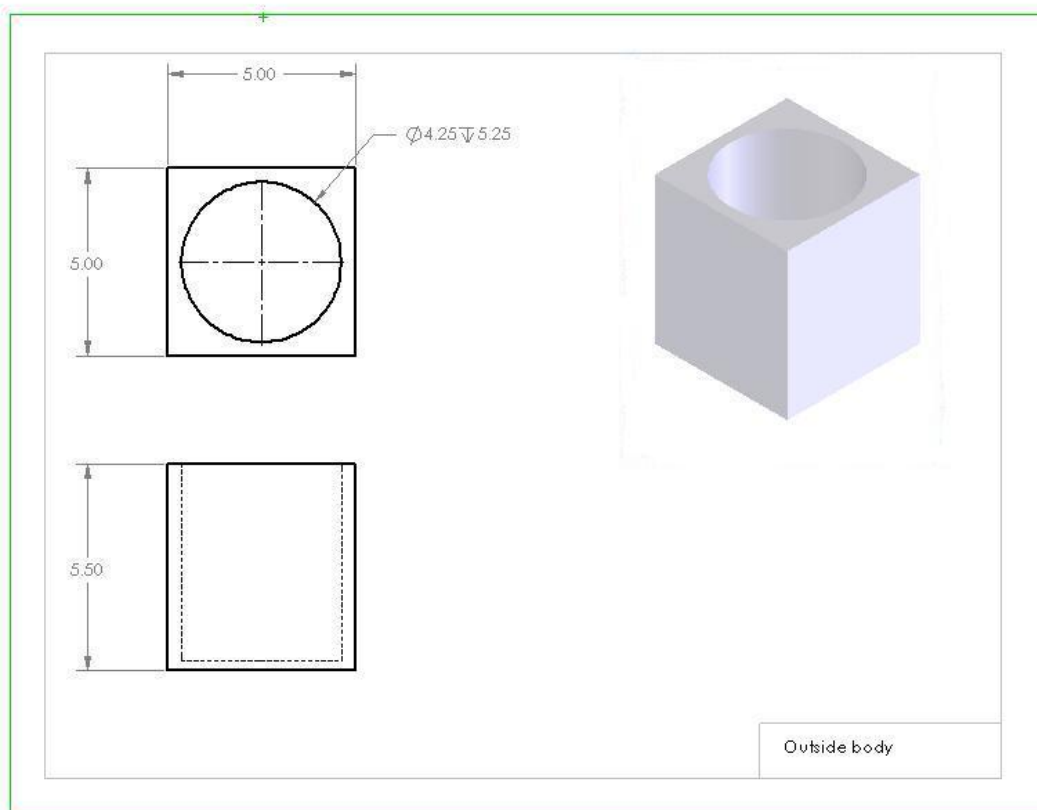
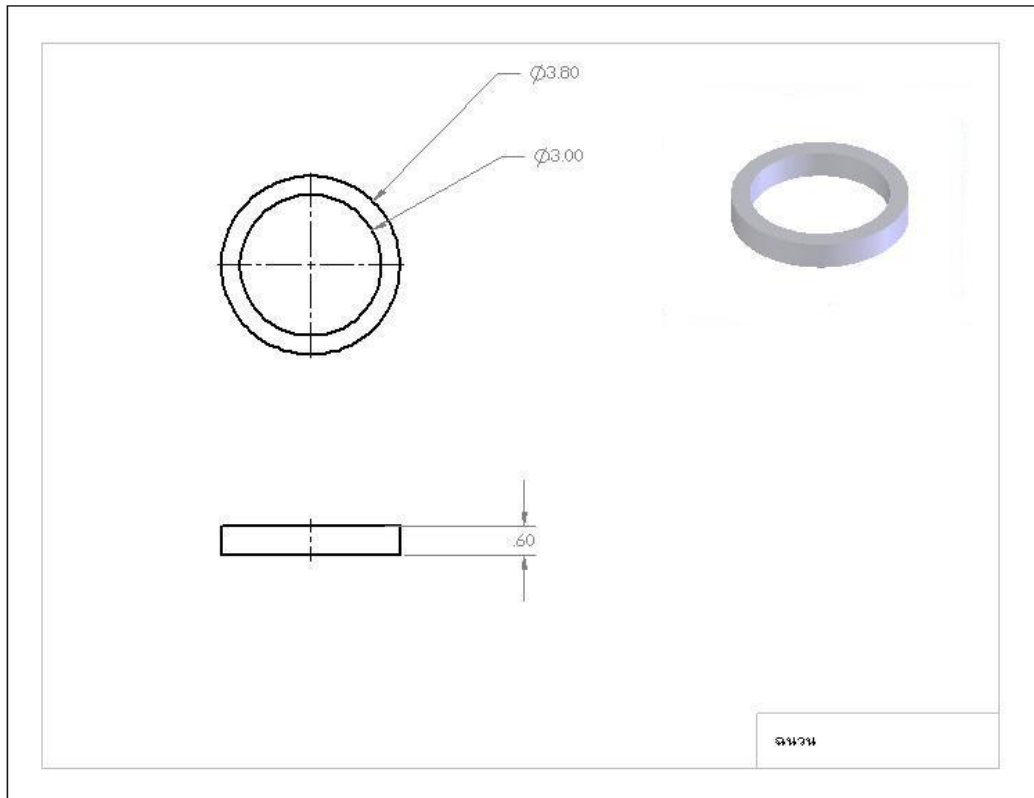
แม้ว่าจะมีข้อผิดพลาดหลายประการในการดำเนินการวิจัย แต่โดยภาพรวมเครื่องมือที่สร้างขึ้นก็สามารถทำงานได้ โดยสามารถใช้สาธิตในการเรียนการสอนในรายวิชาการสั่นทางวิศวกรรมให้นักศึกษาได้มีความเข้าใจในการสั่นของวัตถุภายใต้แรงกระทำได้

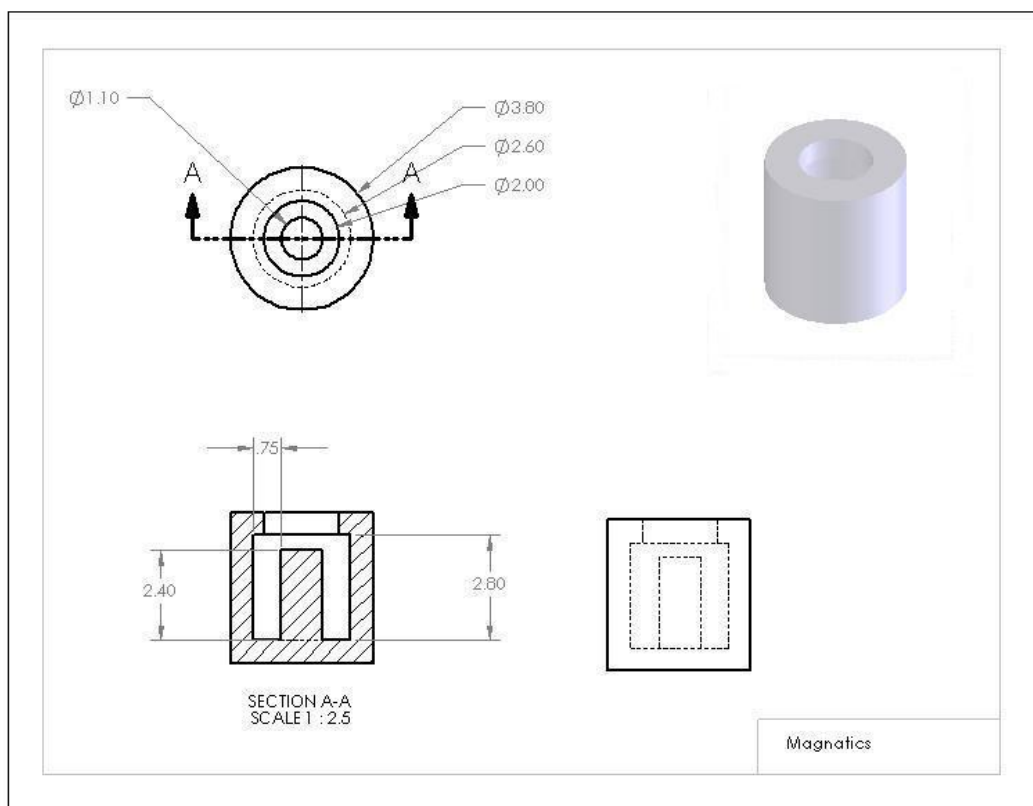
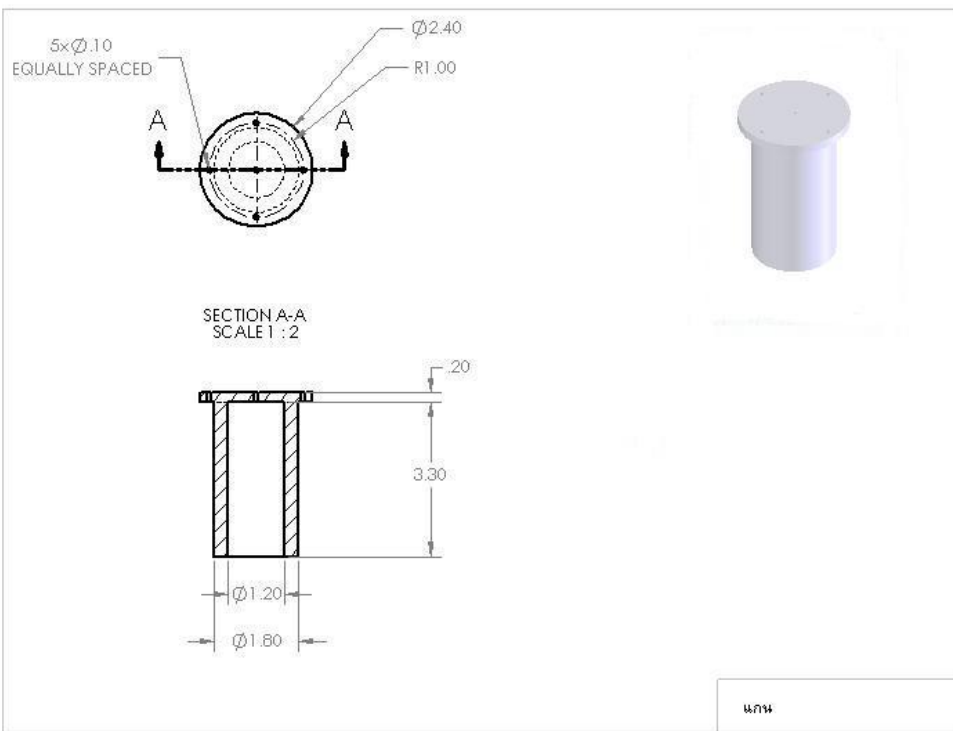
5.2 ข้อเสนอแนะ

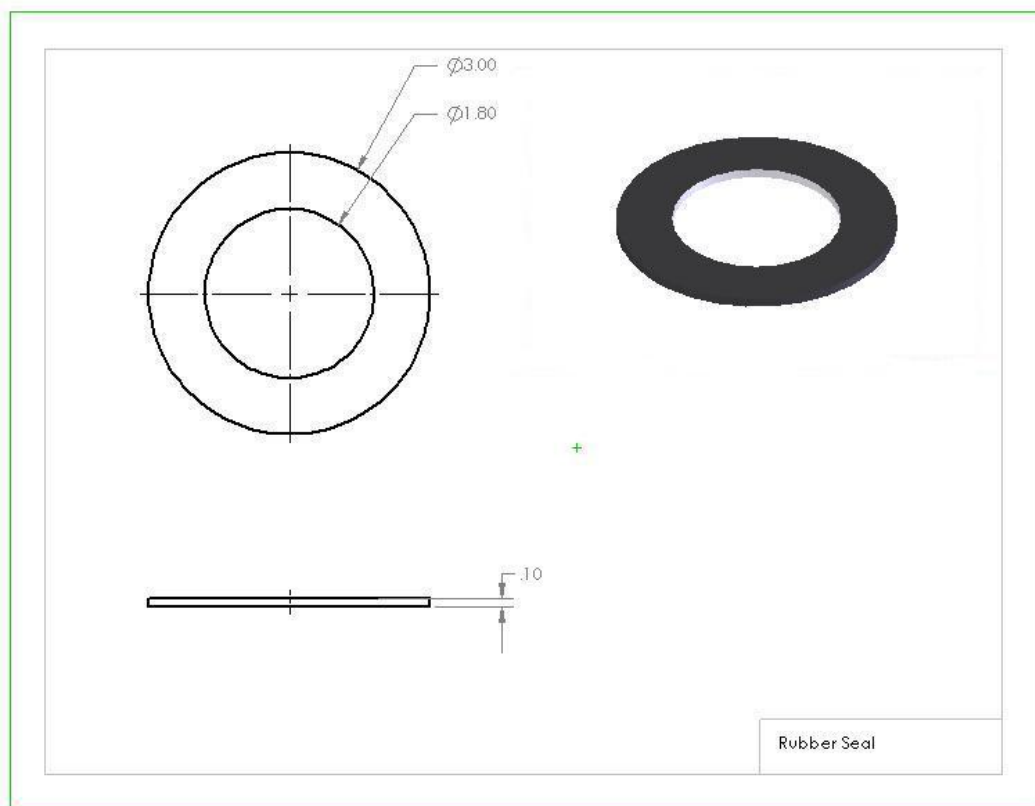
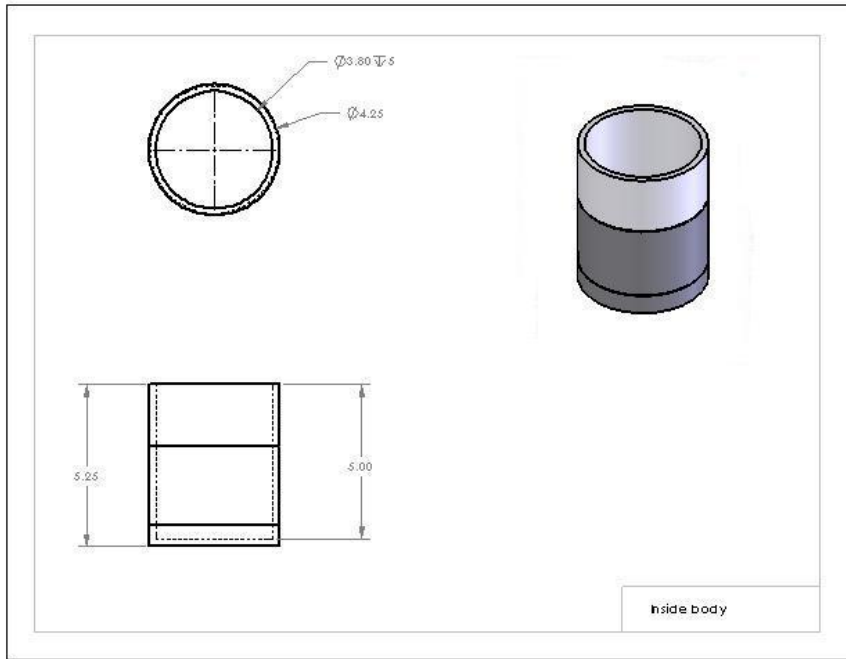
จากการดำเนินการที่ผ่านมาทางผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อให้ผู้ที่สนใจในการที่จะทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิจัยนี้ ได้เตรียมความพร้อมสำหรับการขยายขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1. การสร้างเครื่องมือต้นแบบ ต้องมีช่างผู้ชำนาญการและเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง จึงจะสามารถสร้างเครื่องมือให้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ได้
2. การสร้างแกนกลางการเคลื่อนที่ ควรทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูง น้ำหนักเบา แม้ว่าจะมีราคาแพง ปัจจุบันมีวัสดุให้เลือกอยู่หลายอย่าง ดูเอกสารอ้างอิงประกอบ เพราะการเลือกวัสดุที่เหมาะสมแม้มีราคาสูง จะทำให้งานวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ได้ดียิ่งขึ้น
3. เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ที่มีคุณภาพจะมีราคาแพงและมีความละเอียดอ่อนสูง การใช้งานเครื่องมือเหล่านี้จำเป็นต้องมีผู้ที่มีความเข้าใจในเครื่องมืออย่างแท้จริง ดังนั้นก่อนที่จะเริ่มงานวิจัยในด้านการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการวัดและเครื่องมือวัดละเอียด ควรแน่ใจว่ามีบุคลากรที่มีความรู้และความเข้าใจในระบบการวัดเป็นอย่างดี
4. การสร้างเครื่องต้นแบบ เป็นงานที่ใช้งบประมาณสูง และมีการสูญเสียเนื่องจากการสร้างและการออกแบบสูง ดังนั้นจึงควรมีการเตรียมงบประมาณเพื่อในส่วนต่างเหล่านี้ด้วย

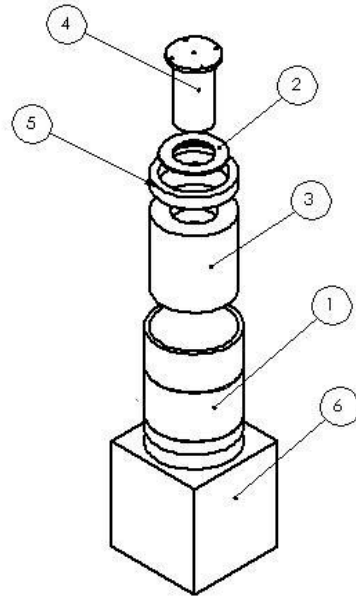
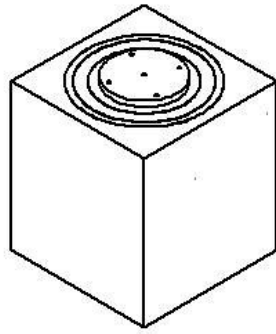
ภาคผนวก







ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Inside body	1
2	Rubber seal	1
3	Magnetic	1
4	แกน	1
5	ฉนวน	1
6	Outside body	1



Assamby Parts



ผลการทดลอง

กราฟในรูปที่ 4.6

frequency Hz	Acceleration g
5.00	50.00
6.00	40.00
7.00	38.00
8.00	35.00
9.00	30.00
10.00	28.00
20.00	12.00
30.00	8.00
40.00	6.00
50.00	4.00
60.00	3.80
70.00	3.50
80.00	3.50
90.00	3.60
100.00	3.80
200.00	7.50
300.00	10.00
400.00	14.00
500.00	14.00
600.00	7.00
700.00	2.80
757.14	2.50
800.00	4.00
900.00	10.00
1000.00	30.00

กราฟในรูปที่ 4.7

Frequency	Bare table	50 gramme	75 gramme	100 gramme
5.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7.50	1.40	1.30	1.35	1.30
10.00	2.60	2.50	2.55	2.60
12.50	3.60	3.40	3.50	3.50
15.00	5.50	5.60	5.55	5.45
17.50	6.50	6.40	6.60	6.45
20.00	11.00	12.00	12.00	11.00
22.50	13.00	13.00	13.50	13.40
25.00	15.00	15.00	14.50	16.00
27.50	16.00	17.00	16.50	16.00
30.00	21.00	20.00	22.00	20.00
32.50	24.00	25.00	26.00	19.50
35.00	30.00	29.00	30.00	20.50
37.50	33.00	32.00	31.00	19.00
40.00	34.00	35.00	29.00	21.00
42.50	37.00	37.00	31.00	19.00

Frequency	Bare table	50 gramme	75 gramme	100 gramme
45.00	39.00	40.00	29.00	21.00
50.00	45.00	44.00	30.50	18.50
55.00	47.00	48.00	28.50	20.50
60.00	50.00	50.00	31.00	19.00
65.00	56.00	51.00	29.50	21.00
70.00	52.00	49.00	30.50	19.00
75.00	58.00	51.00	31.00	21.00
80.00	64.00	49.00	31.00	19.00
85.00	70.00	51.00	29.00	21.00
90.00	72.00	49.00	31.00	19.00
95.00	70.00	51.00	29.00	21.00
100.00	71.00	49.00	30.50	18.50
120.00	70.00	51.00	28.50	20.50
140.00	72.00	49.00	31.00	19.00
160.00	69.00	51.00	29.50	21.00
180.00	71.00	49.00	30.50	19.00
200.00	70.00	51.00	31.00	21.00
220.00	72.00	49.00	31.00	19.00
240.00	70.00	51.00	29.00	21.00
260.00	70.50	49.00	31.00	19.00
280.00	71.00	51.00	29.00	21.00
300.00	72.00	49.00	30.50	18.50
320.00	70.00	51.00	28.50	20.50
340.00	71.50	49.00	31.00	19.00
360.00	70.00	51.00	29.50	21.00
380.00	71.00	49.00	30.50	19.00
400.00	70.00	51.00	31.00	21.00
420.00	72.00	49.00	31.00	20.00
440.00	70.00	51.00	29.00	19.00
460.00	72.00	49.00	31.00	20.00
480.00	70.00	51.00	29.00	19.00
500.00	72.00	49.00	30.50	21.00
520.00	70.00	51.00	28.50	19.00
540.00	72.00	49.00	31.00	21.00
560.00	70.00	51.00	29.50	18.50
580.00	72.00	49.00	30.50	20.50
600.00	70.00	51.00	31.00	19.00
620.00	72.00	49.00	31.00	21.00
640.00	70.00	51.00	29.00	19.00
660.00	72.00	49.00	31.00	21.00
680.00	70.00	51.00	29.00	20.00
700.00	72.00	49.00	30.50	19.00
720.00	70.00	51.00	28.50	21.00
740.00	72.00	49.00	31.00	19.00
760.00	70.00	51.00	29.50	21.00
780.00	72.00	49.00	30.50	18.50
800.00	70.00	51.00	31.00	20.50
820.00	72.00	49.00	31.00	19.00
840.00	70.00	51.00	29.00	21.00
860.00	72.00	49.00	31.00	19.00
880.00	70.00	51.00	29.00	21.00

Frequency	Bare table	50 gramme	75 gramme	100 gramme
900.00	72.00	49.00	30.50	20.00
920.00	70.00	51.00	28.50	19.00
940.00	72.00	50.00	31.00	21.00
960.00	70.00	49.00	29.50	19.00
980.00	72.00	51.00	30.50	21.00
1000.00	70.00	49.00	31.00	19.50

