

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง
การศึกษาการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
A STUDY OF VIBRATION IN INDUCTION MOTOR



โดย

นาย ธนิต ภาวรุติการต์
นาย นนทพัทธ์ งามสอาด
นาย อาทิตย์ สระทองคง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62573
วัน,เดือน,ปี 19 ต.ค. 2549

b. 41626318
i.

ปฏิญานิตพจน์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
A STUDY OF VIBRATION IN INDUCTION MOTOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.พิชิต ล้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการสั้นสะท้อนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

นาย ธนิต ถาวรยุติการต์

นาย นนทพัทธ์ งามสอาด

นาย อาทิตย์ สระทองคง

รศ.พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้นำเสนอการศึกษาการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การสั่นสะเทือนนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลาเมื่อเราใช้งานมอเตอร์ และ ขนาดของการสั่นสะเทือนจะขึ้นกับสภาพของมอเตอร์ซึ่งมีหลายสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเช่นความไม่สมดุลทางกล ความไม่สมดุลทางไฟฟ้า แบร์ริงที่ชำรุดเสียหาย และใช้ห้วงวัดอัตราเร่งในการวัดค่าการสั่นสะเทือนซึ่งจะเก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาและสามารถแปลงเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ได้โดยการใช้วิธี Fast Fourier Transform (FFT) วิธี FFT นี้ถูกใช้เพื่ออธิบายปรากฏการณ์การสั่นสะเทือน และ ใช้จำแนกสาเหตุต่างๆของความผิดปกติของมอเตอร์

A STUDY OF VIBRATION IN INDUCTION MOTOR

Thanit Thavornyutikarn

Nontapat Gnamsaard

Artit Srathongkhong

Assoc. Prof. Phichit Lamyong Advisor

2005

ABSTRACT

In this project, A study of vibration in a Induction Motor is proposed. Vibration will happen all times when we operate Induction Motor whose vibration's magnitude depends on motor's condition. Many causes make Induction Motor vibrated such as Unbalance Mechanic, Unbalance Electric, Damageable bearing, Misalignment of coupling ,and Electromagnetic Force ,etc. This project focuses on Unbalance Mechanical case and Unbalance Electrical case. Vibration values are stored in time – domain by using an Accelerometer. Fast Fourier Transform (FFT) converts data in time-domain to frequency - domain for analysis. FFT method was used to explain vibration phenomenon and Signal from FFT can use to separate different causes of vibration.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการนุรักษ์ชาบซึ่งต่อความกรุณาที่ รศ.พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณพี่ๆปริญญาโท พี่บ๊อด พี่เทป พี่ก้อย พี่จูน และอาจารย์เปี่ยมภูมิ ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่างๆ และผู้จัดทำต้องขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ(Lab) ที่คอยเอาใจใส่คอยถามไถ่ตลอดเวลา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยส่งเสียเงินทองให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญรูป.....	III
สารบัญตาราง.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 มอเตอร์อินดักชัน.....	3
2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส (Induction Motor Construction).....	3
2.1.2 หลักการทำงาน (Principle of Operation).....	5
2.2 สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating field).....	6
2.3 การสั่นสะเทือน.....	10
2.3.1 ประเภทของการสั่นสะเทือน.....	10
2.3.2 ชนิดของสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	10
2.3.3 การสั่นสะเทือนเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุล.....	11
2.3.4 การสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากความไม่สมดุลของ แรงดันไฟฟ้า.....	13
2.4 การแก้ปัญหาทางด้าน Signal Processing.....	14
2.4.1 บทนำเกี่ยวกับสัญญาณและระบบ.....	14
2.4.2 คณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	14
2.4.3 คณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time signal).....	17
2.4.4 Discrete – time signal processing (DSP).....	19
2.4.5 สัญญาณและการจัดกลุ่ม.....	19
2.4.6 การวิเคราะห์สัญญาณโดยทฤษฎี Fourier.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.7 การชักตัวอย่าง (Sampling) ของสัญญาณ.....	23
2.4.8 การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform).....	25
2.4.9 Fast Fourier Transform.....	26
2.4.10 การคำนวณ fft ใน MATLAB.....	27
2.4.11 การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม.....	28
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	32
3.1 Unbalance Mechanic.....	32
3.2 การติดตั้งหัววัดอัตราเร่งและการติดตั้ง Photo switch.....	34
3.3 ใส่ความไม่สมดุลทางกลจากภายนอกให้มอเตอร์เหนี่ยวนำขั้ว.....	35
3.3.1 ปรับเปลี่ยนค่าทั้ง มวล m และ รัศมี r	35
3.3.2 ให้รัศมี r คงที่ปรับค่า มวล m	37
3.3.3 ให้มวล m คงที่ปรับค่ารัศมี r	38
3.3.4 ติดหัววัดแกนตั้ง.....	40
3.4 การใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ทำให้ไม่สมดุลทางกลจากภายในตัวมอเตอร์.....	41
3.4.1 ใส่ล้อ 1 และ 2 ตัวตามลำดับภายในโรเตอร์.....	41
3.4.2 ทำการติดมวลเพิ่มที่ครีบบระบายความร้อน.....	42
3.5 วิธีทดลองการที่มอเตอร์ได้รับไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล.....	43
3.5.1 การทดลองเปลี่ยนค่าแรงดันเฟส A เพิ่มและลดโดยให้เฟส B,C คงที่.....	43
3.6 วิธีการทดลองแบร์ริงชำรุด.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	45
4.1 Unbalance Mechanic.....	45
4.1.1 กรณีใส่ภาระจากภายนอก (Fly wheel).....	45
4.1.2 ให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล.....	51
4.1.3 เปลี่ยนรัศมีและให้มวลคงที่.....	56
4.1.4 ติดหัววัดแกนตั้ง.....	61
4.2 กรณีความไม่สมดุลจากภายในมอเตอร์ (ใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์).....	64
4.2.1 ใส่ล้อเพิ่มเข้าที่ช่องของโรเตอร์.....	64
4.2.2 ใส่มวลเพิ่มที่ครีบบระบายความร้อน.....	67
4.3 แสดงตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่า F ทางทฤษฎี และ F จากการทดลอง.....	68
4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง Unbalance Mechanic.....	69
4.5 ผลการทดลอง Unbalance Electrical.....	74
4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง Unbalance Electrical.....	87
4.7 ผลการทดลองแบร์ริงชำรุด.....	89
4.8 สรุปผลการทดลองแบร์ริงชำรุด.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์อินดักชัน.....	3
2.2 แสดงสเตเตอร์ของมอเตอร์อินดักชัน.....	3
2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก.....	4
2.4 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์.....	4
2.5 Stator coil and rotor coil of ac machine.....	6
2.6 แสดงภาพคลื่นของการกระจายสนามแม่เหล็ก.....	7
2.7 แสดงขดลวดแต่ละเฟสจะวางทำมุมห่างกันเท่ากับ 120.....	8
2.8 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟส.....	9
2.9 แสดงการหมุนของ Rotor ที่มีมวลถ่วงน้ำหนัก.....	12
2.10 แสดงตำแหน่งที่มวลหมุนมาอยู่ในแนวระดับเดียวกับหัววัดอัตราเร่ง.....	13
2.11 แสดงระบบของการประมวลผลสัญญาณ.....	15
2.12 แสดงการกรองแบบเชิงเส้น (Linear filtering).....	16
2.13 แสดงการคอนโวลูชันของสัญญาณ.....	16
2.14 แสดงการ Sampling สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	17
2.15 แสดงการแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transforms (DFT)).....	17
2.16 แสดงการคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	18
2.17 แสดงการคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาโดยใช้การแปลงแบบแซด.....	18
2.18 สัญญาณ Sine ที่เป็นรายคาบ.....	19
2.19 สัญญาณพัลส์ที่ไม่เป็นรายคาบ.....	20
2.20 สัญญาณที่มีความแน่นอน.....	20
2.21 สัญญาณแรนดัม.....	20
2.22 แสดงการแซมปลิงสัญญาณอนาลอก.....	23
2.23 แสดงสัญญาณ $s(t)$ เฉพาะช่วงเวลาหนึ่ง.....	24
2.24 แสดงการ Instantaneous sampling.....	24
2.25 แสดงขบวนการ DFT.....	25
2.26 แสดงผลลัพธ์ของกระบวนการ DFT คือ $S(NF)$	26
2.27 การแปลงสัญญาณ Sine wave จากโดเมนเวลามาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่.....	28
2.28 การแปลงสัญญาณ Square wave จากโดเมนเวลามาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่.....	29
2.29 การแปลงสัญญาณ ที่ประกอบด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50 , 150, 250, 350 Hz จากโดเมนเวลามาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่.....	30

2.30 แสดงตัวอย่างของการแสดงขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อมอเตอร์เกิดการ Unbalance mechanic บนโดเมนเวลาและโดเมนความถี่.....	31
3.1 แสดง Fly wheel และ นี้อดที่นำมาต่อเข้ากับมอเตอร์ (กรณีใส่ภาระทางกลที่ไม่สมดุลจากภายนอก).....	32
3.2 แสดงการติดตั้ง หัววัดอัตราเร่ง Photo switch เมื่อนำภาระทางกลที่ไม่สมดุลจากภายนอกมาต่อเข้ากับมอเตอร์.....	33
3.3 ก และข แสดงการติดมวลเพิ่มเข้าไปที่ช่องของโรเตอร์.....	33
3.4 แสดงแทนทดสอบที่ใช้ทดลองและการติดตั้งหัววัดอัตราเร่ง.....	34
3.5 แสดงการหมุนของมวลเมื่อหมุนมาตรงแนวของหัววัดอัตราเร่ง.....	34
3.6 แสดงลำดับการติดนี้อดที่ Fly wheel จาก 1 – 5 ตัวเมื่อปรับเปลี่ยนค่าทั้ง มวล m และ รัศมี r	36
3.7 แสดงลำดับการติดนี้อดและแหวน ให้รัศมี r คงที่ปรับค่า มวล m	38
3.8 แสดงลำดับการติดนี้อด ให้มวล m คงที่ปรับค่ารัศมี r	39
3.9 แสดงการติดตั้งหัววัดอัตราเร่งแกนตั้ง.....	40
4.1 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 1 ตัว.....	45
4.2 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 1 ตัว.....	45
4.3 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 2 ตัว.....	46
4.4 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 2 ตัว.....	46
4.5 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 3 ตัว.....	47
4.6 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 3 ตัว.....	47
4.7 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 4 ตัว.....	48
4.8 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 4 ตัว.....	48
4.9 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 5 ตัว.....	49
4.10 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 5 ตัว.....	49
4.11 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 1 ตัว.....	51
4.12 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อรัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 1 ตัว.....	51
4.13 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2 ตัว.....	52
4.14 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อรัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2 ตัว.....	52
4.15 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2 แหวนรวม 4 ตัว.....	53
4.16 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2 แหวนรวม 4 ตัว.....	53
4.17 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2 แหวนรวม 6 ตัว....	54
4.18 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2 แหวนรวม 6 ตัว.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.19 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมี ที่รัศมี 5.2 cm.....	56
4.20 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมีที่ รัศมี 5.2 cm.....	56
4.21 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมี ที่รัศมี 6 cm.....	57
4.22 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมีที่ รัศมี 6 cm.....	57
4.23 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมี ที่รัศมี 7 cm.....	58
4.24 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมีที่ รัศมี 7 cm.....	58
4.25 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมี ที่รัศมี 7.5 cm.....	59
4.26 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมีที่ รัศมี 7.5 cm.....	59
4.27 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้ง นี้อด 1 ตัว.....	61
4.28 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้ง นี้อด 3 ตัว.....	61
4.29 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้ง นี้อด 5 ตัว.....	62
4.30 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ นี้อด 1 ตัว.....	64
4.31 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ นี้อด 1 ตัว.....	64
4.32 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ นี้อด 2 ตัว.....	65
4.33 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ นี้อด 2 ตัว.....	65
4.34 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อ ติดมวลเข้าที่cribระบายความร้อน.....	67
4.35 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อติดมวลเข้าที่cribระบายความร้อน.....	67
4.36 แสดงตำแหน่งพัลส์ของ Photo switch เป็นบวกซึ่งตรงกันกับ จังหวะที่มีการสั่นสะเทือนมากที่สุด.....	69
4.37 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดัน 3 เฟสสมดุล.....	74
4.38 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดัน 3 เฟสสมดุล.....	74
4.39 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส A เท่ากับ 198 โวลต์.....	75
4.40 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 198 โวลต์.....	75
4.41 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส A เท่ากับ 176 โวลต์.....	76
4.42 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 176 โวลต์.....	76
4.43 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส A เท่ากับ 242 โวลต์.....	77
4.44 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 242 โวลต์.....	77
4.45 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส A เท่ากับ 264 โวลต์.....	78
4.46 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 264 โวลต์.....	78
4.47 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส B เท่ากับ 198 โวลต์.....	79
4.48 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส B เท่ากับ 198 โวลต์.....	79
4.49 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส B เท่ากับ 176 โวลต์.....	80
4.50 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส B เท่ากับ 176 โวลต์.....	80
4.51 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส B เท่ากับ 242 โวลต์.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.52	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส B เท่ากับ 242 โวลต์.....	81
4.53	แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส B เท่ากับ 264 โวลต์.....	82
4.54	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 264 โวลต์.....	82
4.55	แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส C เท่ากับ 198 โวลต์.....	83
4.56	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส C เท่ากับ 198 โวลต์.....	83
4.57	แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส C เท่ากับ 176 โวลต์.....	84
4.58	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส C เท่ากับ 176 โวลต์.....	84
4.59	แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส C เท่ากับ 242 โวลต์.....	85
4.60	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส C เท่ากับ 242 โวลต์.....	85
4.61	แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส C เท่ากับ 264 โวลต์.....	86
4.62	แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส C เท่ากับ 264 โวลต์.....	86
4.63	แสดงความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นฟลักแม่เหล็ก.....	88
4.64	แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวเล็กชำรุด.....	89
4.65	แสดงสเปกตรัมการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวเล็กชำรุด.....	89
4.66	แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวใหญ่ชำรุด.....	90
4.67	แสดงสเปกตรัมการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวใหญ่ชำรุด.....	90
4.68	แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวใหญ่และตัวเล็กชำรุด.....	91
4.69	แสดงสเปกตรัมการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวใหญ่และตัวเล็กชำรุด.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	14
4.1 บันทึกผลการทดลองใส่ล้อที่ Fly wheel เมื่อทำการเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี คำนวณค่า F ทางทฤษฎี.....	50
4.2 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อทำการเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี.....	50
4.3 บันทึกผลการทดลองใส่ล้อที่ Fly wheel เมื่อทำการเพิ่มมวลรัศมีคงที่คำนวณค่า F ทางทฤษฎี.....	55
4.4 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อทำการเพิ่มมวลรัศมีคงที่.....	55
4.5 บันทึกผลการทดลองใส่ล้อที่ Fly wheel เมื่อทำการเปลี่ยนรัศมีมวลคงที่คำนวณ ค่า F ทางทฤษฎี.....	60
4.6 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัด เมื่อทำการเปลี่ยนรัศมีมวลคงที่.....	60
4.7 บันทึกผลการทดลองใส่ล้อที่ Fly wheel เมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้งคำนวณค่า F ทางทฤษฎี.....	62
4.8 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้ง.....	63
4.9 บันทึกผลการทดลองใส่ล้อที่เพิ่มเข้าที่ช่องของโรเตอร์ คำนวณค่า F ทางทฤษฎี.....	66
4.10 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อใส่ล้อเพิ่มเข้าที่ช่อง ของโรเตอร์.....	66
4.11 บันทึกผลการทดลอง ใส่มวลเพิ่มที่ครีประบายความร้อนคำนวณค่า F ทางทฤษฎี.....	67
4.12 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อใส่มวลเพิ่มที่ครีประบายความร้อน.....	67
4.13 แสดงค่าความถี่และขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อเพิ่มขนาดของมวลโดยรัศมีคงที่ $r = 7.8 \text{ Cm}$	72
4.14 แสดงค่าความถี่และขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อ เพิ่มรัศมีโดยที่มวลคงที่ $m = 80.8 \text{ g}$	72
4.15 แสดงค่าความถี่และขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อรัศมีและมวลเปลี่ยน.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในวงการอุตสาหกรรม อินดักชันมอเตอร์เป็นเครื่องจักรไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อระบบการผลิตเป็นอย่างมาก ซึ่งการที่เครื่องจักรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา ก็จะเป็นผลดีกับระบบแต่ในความเป็นจริงเครื่องจักรอาจเกิดความผิดปกติขึ้นมาได้ ดังนั้นหากเกิดเหตุการณ์ผิดปกติกับอินดักชันมอเตอร์อันเป็นเหตุให้ระบบการผลิตของโรงงานต้องหยุดชะงักลง สูญเสียทั้งกำลังการผลิต และ เวลา หากเสียหายรุนแรงก็อาจเกิดอันตรายต่อพนักงานในโรงงานได้ เพราะฉะนั้นหากสามารถแก้ไขปัญหาคความผิดปกติของอินดักชันมอเตอร์ได้ตั้งแต่เนิ่นๆก็สามารถลดความเสียหายทั้งทรัพย์สินและเวลาลงได้

สาเหตุที่ทำให้การใช้งานอินดักชันมอเตอร์มีปัญหาหลายประการดังนี้

- การขั้วไหลดที่ไม่มีความสมดุล (Unbalance Mechanical)
- การที่มอเตอร์ได้รับไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุล (Unbalance voltage)
- ความเสียหายของชิ้นส่วนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเช่น แบร็งชัวร์

เป้าหมายของโครงการนี้ต้องการหาที่มา หรือ สาเหตุที่ทำให้ อินดักชันมอเตอร์ไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติซึ่งเกิดจากการเกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ โดยจะใช้เทคนิคการวัดการสั่นสะเทือนของอินดักชันมอเตอร์ โดยใช้หัววัดอัตราเร่ง (Accelerometer) วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปของอัตราเร่ง แล้วนำสัญญาณที่วัดได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของความผิดปกติของอินดักชันมอเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงความผิดปกติของ อินดักชันมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ
2. เพื่อศึกษาการใช้งานหัววัดอัตราเร่ง (Accelerometer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนในอินดักชันมอเตอร์
3. เพื่อศึกษารูปแบบสัญญาณการสั่นสะเทือน , แรงดัน และ กระแส ที่สภาวะเหตุการณ์ต่างๆโดยจำลองเหตุการณ์สมมุติให้มอเตอร์ผิดปกติว่าจะได้ ค่า และ รูปสัญญาณของการสั่นสะเทือน , แรงดัน และกระแสลักษณะใด
4. เพิ่มทักษะในการประยุกต์ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการจำลองเหตุการณ์ผิดปกติของอินดักชันมอเตอร์
5. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนความถี่เพื่อจำแนกสาเหตุการผิดปกติของอินดักชันมอเตอร์

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. จำลองสาเหตุของความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลักษณะต่างๆ
คือ

- การขั้วไหลดที่ไม่มีความสมดุล (Unbalance Mechanic)
- การที่มอเตอร์ได้รับไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุล (Unbalanced voltage)
- ความเสียหายของชิ้นส่วนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเช่น แบริ่งชำรุด

2. ศึกษาสาเหตุที่ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานผิดปกติซึ่งทำให้เกิดการ
สั่นสะเทือนขึ้น

3. วิเคราะห์สัญญาณที่วัดได้จาก หัววัดอัตราเร่ง (Accelerometer) โดยใช้
โปรแกรม MATLAB วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อัน
เนื่องมาจากความผิดปกติต่าง ๆ และสามารถทำการจำแนกสัญญาณการสั่นสะเทือนของความ
ผิดปกติแต่ละรูปแบบได้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาการใช้งาน หัววัดอัตราเร่ง (Accelerometer) ที่ใช้วัดสัญญาณ
การสั่นสะเทือน
2. ทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้า
เหนี่ยวนำ
3. ออกแบบการทดลองโดยการจำลองความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
อันเนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ
4. ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วบันทึกผลการทดลอง
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลอง

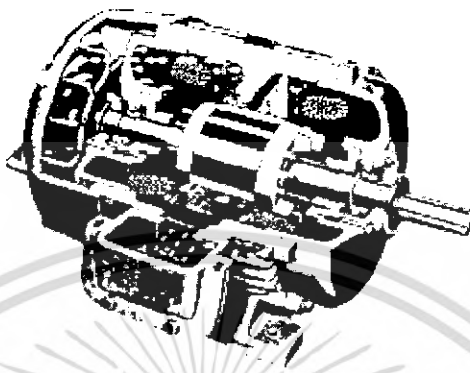
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. มีความเข้าใจถึงหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
2. มีความชำนาญในการใช้อุปกรณ์การวัดทางไฟฟ้า
3. มีความเข้าใจถึงความผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้า
เหนี่ยวนำ
4. สามารถใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์สัญญาณต่าง ๆ ได้
5. สามารถจำแนกสัญญาณการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากความผิดปกติใน
ลักษณะต่างๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์อินดักชัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์อินดักชัน

อินดักชัน หมายถึง การเหนี่ยวนำ การหมุนของมอเตอร์เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำในโรเตอร์

มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากเป็นอินดักชัน 3 เฟส เพราะมอเตอร์ชนิดนี้ราคาไม่แพงมากนัก ต้องการการดูแลรักษาน้อยและมีความเร็วเกือบคงที่ คือ ความเร็วลดลงจากสภาพไม่มีโหลดจนกระทั่งขับโหลดเต็มทีเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์

2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส (Induction Motor Construction)

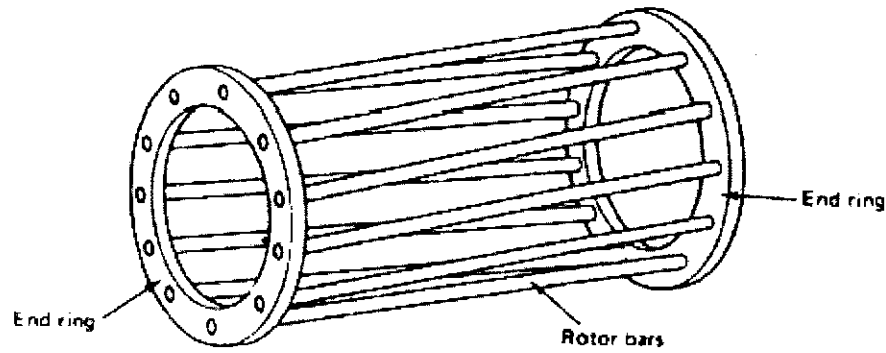
มอเตอร์อินดักชันมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุน (Rotor)

- **สเตเตอร์** มีหน้าที่ยึดขดลวดอาเมเจอร์ที่บรรจุอยู่ในสลีต ทำด้วยแผ่นลามิเนตบาง ๆ จัดเป็นรูปทรง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงสเตเตอร์ของมอเตอร์อินดักชัน

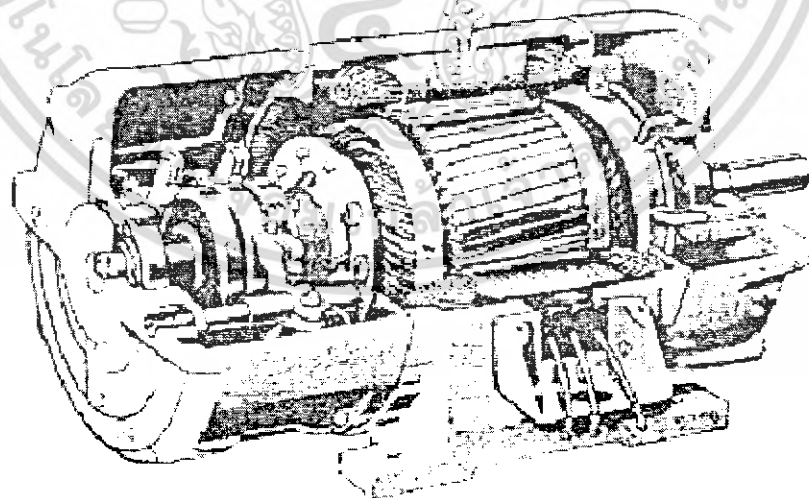
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก

-โรเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. แบบกรงกระรอก (squirrel cage) ที่แท่งตัวนำ (rotor bar) คล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ในโรเตอร์ ที่ปลายทั้ง 2 ด้านของแท่งตัวนำถูกมัดด้วยตัวนำรูปวงแหวน (End ring) ดังรูปที่ 2.3 แท่งตัวนำของโรเตอร์มักมีลักษณะเฉียงเพราะจะทำให้โรเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียงฮัมของแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างจากแบบกรงกระรอก คือ มีขดลวดทองแดงพันรอบตัวโรเตอร์ ส่วนปลายของขดนี้จะต่อกับสลิปริงซึ่งมีแปลงถ่านติดตั้งอยู่ดังรูปที่ 2.4 และมีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์

2.1.2 หลักการทำงาน (Principle of Operation)

ถ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำและเนื่องจากโรเตอร์ถูกลัดวงจรจึงเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิดเป็นผลให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุน

สนามแม่เหล็กหมุน ดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (N_s) ซึ่งหาค่าได้จาก

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad \dots (2.1)$$

เมื่อ f = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

P = จำนวนขั้วของมอเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ตัวนำของโรเตอร์ (e_{ind}) หาค่าได้ดังนี้

$$e_{ind} = (v * B_s) * l \quad \dots (2.2)$$

เมื่อ v = ความเร็วของโรเตอร์

B_s = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดที่สเตเตอร์

l = ความยาวของโรเตอร์

โรเตอร์ของมอเตอร์อินดักชัน จะหมุนไปทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ แต่ไม่ได้หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส (N_s) กับความเร็วของโรเตอร์ (N_r) นำมาหาค่าสลิปคือ

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad \dots (2.3)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในตัวนำของโรเตอร์ (B_R) และเกิดปฏิสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่สเตเตอร์จึงเกิดแรงบิดที่โรเตอร์ (T_{dR}) ซึ่งหาค่าได้ดังนี้

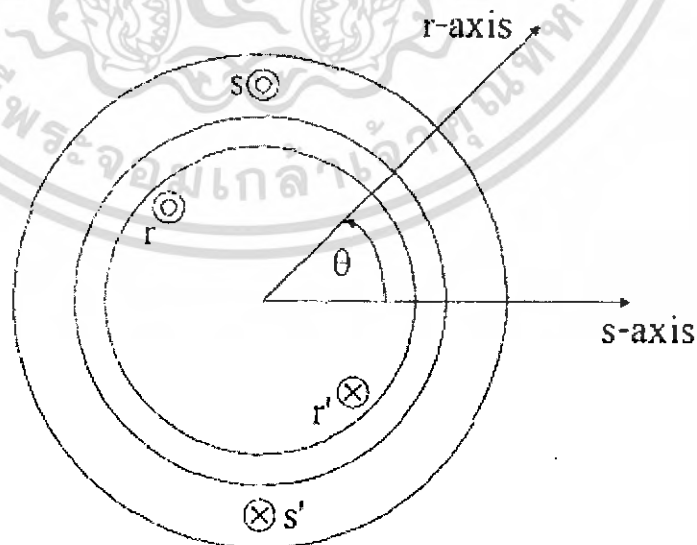
$$T_{dR} = k B_R * B_s \quad \dots(2.4)$$

แรงบิดจะทำให้โรเตอร์หมุนไปได้ด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ถ้าความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วของซิงโครนัส ค่า e_{ind} และ T_{dR} จะเท่ากับศูนย์ โรเตอร์จึงหยุดหมุน ดังนั้นการเร่งความเร็วของมอเตอร์อินตักชันจึงไม่สามารถทำให้ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้

2.2 สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating field)

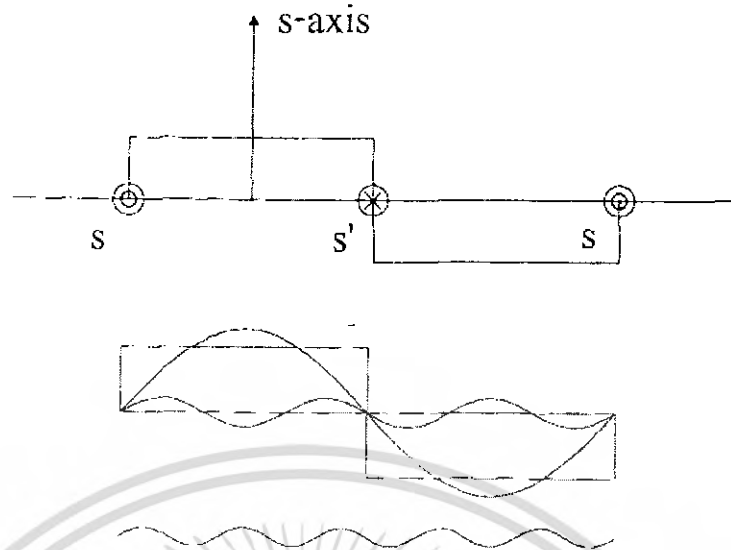
สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อมีกระแสไฟฟ้าระบบ 3 เฟสจ่ายให้กับขดลวด 3 เฟส เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์นั้น สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำในโรเตอร์นั้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ และจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ เพราะที่โรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับที่สเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์นั้นจะเกิดการผลัด และติดกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน ผลที่ได้ของการติดและผลัดระหว่างขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

เมื่อทำการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่ตัวหมุนที่มีลักษณะทรงกระบอก (Cylindrical rotor) ดังแสดงตามรูปที่ 2.5 ซึ่งขดลวดที่พันเป็นแบบอัดเป็นก้อน (Concentrated coil)



รูปที่ 2.5 Stator coil and rotor coil of ac machine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงภาพคลื่นของการกระจายสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กที่กระจายโดยรอบของอากาศจะมีขนาดคงที่ สามารถแสดงภาพคลื่นของการกระจายสนามแม่เหล็กดังภาพที่ 2.6 ซึ่ง mmf ที่เกิดจากขดลวดเดี่ยวจะเป็นแบบ Square wave จาก Fourier series

$$F(\theta) = \frac{4}{\pi} K \left[\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \frac{1}{7} \cos 7\theta + \dots \right] \quad \dots (2.5)$$

กำหนดให้แกนของขดลวดเฟส a เป็นแกนอ้างอิงอยู่ที่ 0° และป้อนกระแส i_a ที่ขดลวดเฟส a โดยที่

$$i_a(t) = I_m \cos(\omega t) \quad \dots (2.6)$$

ซึ่งจะได้แรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก $F_a(\theta, t)$ ที่มุม θ และเวลา t ใดๆ

$$F_a(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta) \cos(\omega t)$$

$$F_a(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad \dots (2.7)$$

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph} I_m}{P} \quad \dots (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$: Traveling wave in positive direction
 $F_{\max} \cos(\theta + \omega t)$: Traveling wave in negative direction

เมื่อ $F_o(\theta, t)$ = เป็นค่าแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กของเฟส a ที่มุม θ และเวลา t ใดๆ
 F_{\max} = เป็นค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กของขดลวด
 I_m = ค่าสูงสุดของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กในแต่ละเฟส
 P = เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็ก
 θ = เป็นตำแหน่งของมุมใดๆในมอเตอร์
 ω = เป็นความเร็วเชิงมุม

ในระบบ 3 เฟส ขดลวดแต่ละเฟสจะวางทำมุมห่างกันเท่ากับ 120° โดยกำหนดให้

แกนของขดลวดเฟส a อยู่ที่ตำแหน่ง 0°

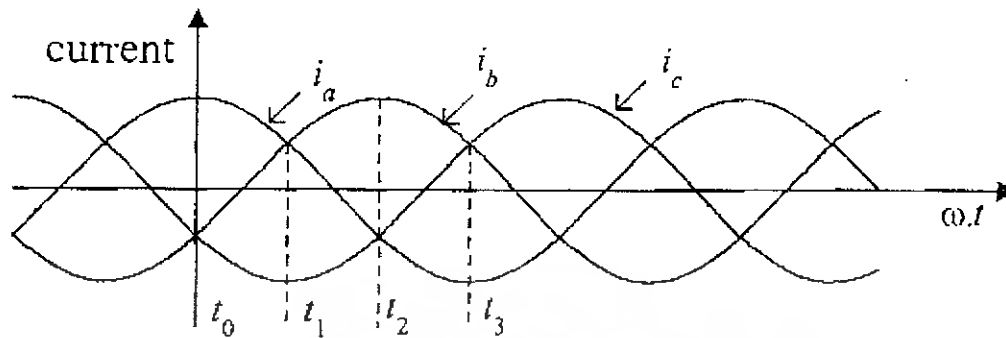
แกนของขดลวดเฟส b อยู่ที่ตำแหน่ง 120°

แกนของขดลวดเฟส c อยู่ที่ตำแหน่ง 240°



รูปที่ 2.7 แสดงขดลวดแต่ละเฟสจะวางทำมุมห่างกันเท่ากับ 120°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟส

และมีกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดแต่ละเฟสดังนี้

$$i_a(t) = I_{m,a} \cos(\omega t) \quad \dots (2.9)$$

$$i_b(t) = I_{m,b} \cos(\omega t - 120^\circ) \quad \dots (2.10)$$

$$i_c(t) = I_{m,c} \cos(\omega t - 240^\circ) \quad \dots (2.11)$$

ถ้า $I_{m,a} = I_{m,b} = I_{m,c} = I_m$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส I_a เข้าที่ขดลวดเฟส a

$$F_a(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad \dots (2.12)$$

$$F_a(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad \dots (2.12)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส I_b เข้าที่ขดลวดเฟส b

$$F_b(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \quad \dots (2.13)$$

$$F_b(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) \quad \dots (2.13)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแส I_c เข้าที่ขดลวดเฟส c

$$F_c(\theta, t) = F_{\max} \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) \quad \dots (2.14)$$

$$F_c(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \quad \dots (2.14)$$

แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กลัพธ์ที่เกิดจากการป้อนกระแสเข้าขดลวดทั้ง 3 เฟส

$$F_r(\theta, t) = F_a(\theta, t) + F_b(\theta, t) + F_c(\theta, t) \quad \dots (2.15)$$

$$F_r(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad \dots (2.15)$$

เมื่อ $F_r(\theta, t)$ = เป็นค่าของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กหมุนที่มุม θ และเวลา t ใดๆ

2.3 การสั่นสะเทือน

2.3.1 ประเภทของการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนมีหลายรูปแบบ แต่แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

1. การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration) คือการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลภายในระบบ ภายใต้การกระทำของแรงภายในระบบโดยปราศจากแรงภายนอกมากระทำ

2. การสั่นสะเทือนแบบกระตุ้น (Forced Vibration) คือการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลภายในระบบ อันเกิดจากแรงภายนอก และการสั่นสะเทือนนี้จะเป็นไปตามลักษณะของแรงภายนอกและความถี่ของแรงที่มากระตุ้นระบบ

ลักษณะของแรงภายนอกที่มากระทำมีได้หลายรูปแบบ แต่ในเครื่องจักรแบบหมุนการกระตุ้นของระบบมักจะอยู่ในรูปของแรงกระตุ้นแบบคาบ และเนื่องจากแรงกระตุ้นแบบคาบนั้นจะสามารถแยกย่อยออกเป็นผลรวมของการกระตุ้นแบบฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่างๆ ได้ ดังนั้นจึงนิยมพิจารณาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนโดยใช้แบบจำลองในรูปแบบของแรงกระตุ้นแบบฮาร์มอนิก เมื่อระบบถูกกระตุ้นด้วยแรงภายนอกแบบฮาร์มอนิก การสั่นสะเทือนของระบบจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันกับแรง คือ จะสั่นสะเทือนด้วยความถี่เดียวกันกับความถี่ของแรงที่มากระตุ้น

2.3.2 ชนิดของสัญญาณการสั่นสะเทือน

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องจักรจะสามารถนำมาช่วยในการบ่งบอกถึงสภาพหรือข้อบกพร่องของเครื่องจักร พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดประกอบด้วย ความถี่ ขนาดของการสั่นสะเทือน มุมเฟส

1. ความถี่ ในที่นี้หมายถึงความถี่ของการสั่นสะเทือน ซึ่งหากพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาก็จะหมายถึง จำนวนรอบของการสั่นสะเทือนต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้จะเป็น CPM (Cycle per Minute) พารามิเตอร์ความถี่นี้จะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงสภาพความเสียหายได้ถ้าหากนำพารามิเตอร์นี้ไปใช้กับสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

2. ขนาดของการสั่นสะเทือน เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้บ่งบอกสภาพของเครื่องจักร โดยทั่วไปแล้วถ้าหากขนาดของการสั่นสะเทือนมีขนาดใหญ่ย่อมหมายถึงเครื่องจักรมีปัญหา ขนาดของการสั่นสะเทือนในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์หลักที่นิยมใช้ได้แก่

- การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement)
- ความเร็ว (Velocity)
- อัตราเร่ง (Acceleration)

การจัดหรือระยะเวลาการเคลื่อนที่คือ ระยะเวลาเคลื่อนที่ของมวลจากจุดสมดุลหรือขนาด $x(t)$ ในผลเฉลยของการสั่นสะเทือนของระบบมวลเดี่ยว หรือในกรณีที่ว่าค่าจากค่าสูงสุดไปยังค่าต่ำสุด (Peak to Peak) จะเป็นค่าระยะทางทั้งหมดที่ตัวมวลเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดไปสู่จุดต่ำสุดในแต่ละรอบ

ความเร็วของการสั่นสะเทือน คือความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวล ดังนั้นมวลจะมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อมวลเคลื่อนที่อยู่ที่จุดสูงสุดและต่ำสุด และจะมีความเร็วสูงสุดในขณะที่มวลเคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ค่าการจัดจะสัมพันธ์กับค่าความเร็วเป็น

$$v = \frac{dx}{dt} \quad \dots (2.16)$$

อัตราเร่งในการสั่นสะเทือนก็คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมวลในขณะที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาโดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลอยู่ในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดจากจุดสมดุล

$$a = \frac{dv}{dt} \quad \dots (2.17)$$

จะพบว่าในกรณีของการสั่นสะเทือนของระบบมวลเดี่ยว ความสัมพันธ์ของการจัด ความเร็ว และอัตราเร่งสามารถเขียนได้เป็น

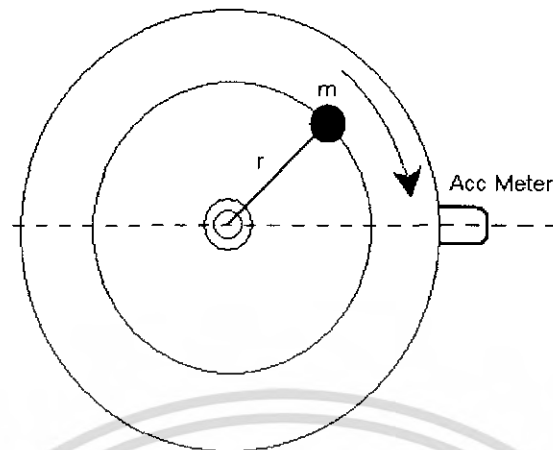
$$\begin{aligned} x &= X \sin \omega t \\ v &= \omega X \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ a &= \omega^2 X \sin(\omega t + \pi) \end{aligned} \quad \dots (2.18)$$

3. มุมเฟส จะเป็นค่าความแตกต่างของตำแหน่งส่วนที่มีการสั่นสะเทือน เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง มุมเฟสจะใช้เป็นข้อมูลบอกลักษณะการเคลื่อนที่บนตำแหน่งต่างๆบนเครื่องจักร มุมเฟสจะมีหน่วยเป็นองศา

2.3.3 การสั่นสะเทือนเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุล

ความไม่สมดุลของเครื่องจักรที่ต้องหมุนเป็นแหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้ง่าย ซึ่งการทดสอบนี้ได้จำลองเหตุการณ์ที่ทำให้การหมุนของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นไปอย่างไม่สมดุล ดังนี้

1. Unbalanced Load นำโหลดที่มีความไม่สมดุลมาต่อเข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. การเพิ่มน้ำหนักเข้าไปที่ Rotor ซึ่งได้ทดสอบโดยการ
 - ใส่ถนัดเข้าไปที่ Rotor
 - ติดมวลเพิ่มเข้าไปที่ครีบบระบายความร้อน



รูปที่ 2.9 แสดงการหมุนของ Rotor ที่มีมวลถ่วงน้ำหนัก

พิจารณารูปที่ 2.9 เราติดหัววัดอัตราเร่งในแนวระดับ เพื่อวัดแนวสั่นสะเทือนในแนวแกนนอนซึ่งสอดคล้องกับระบบที่ได้อัตราเร่งที่สามารถสั่นได้อย่างอิสระในแนวระดับซึ่งจะได้ค่าอัตราเร่งที่ถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุด

มวล m หมุนเป็นวงกลมรอบรัศมี r สมการการสั่นสะเทือนที่ได้เป็นดังนี้

$$m\omega^2 r \cos(\omega t) = Ma \quad \dots (2.19)$$

M : มวลรวมของมอเตอร์และโหลดที่มอเตอร์ขับเคลื่อน (Kg)

M : มวลรวมของโหลดไม่สมดุล (Kg)

r : รัศมีจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึง m หรือ จุดศูนย์กลางมวล (m)

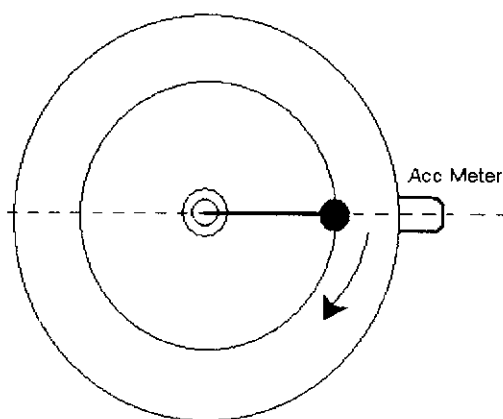
ω : ความเร็วรอบของโรเตอร์ (rad / sec)

a : อัตราเร่งที่วัดได้จากหัววัดอัตราเร่ง (m / s^2)

ωt : มุมที่วัดเทียบตำแหน่งของมวลกับแนวระดับ

Ma เราได้ค่า a จากหัววัดอัตราเร่งเราสามารถตรวจสอบความถูกต้องจากการวัดโดยอาศัยสมการนี้ พูดยได้ว่าทางซ้ายมือของสมการเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

$m\omega^2 r \cos \omega t$ เป็นค่าที่ได้จากทางทฤษฎีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องที่ได้จากการวัด จากสมการ เห็นได้ว่าเมื่อตำแหน่งที่มวล m หมุนมาอยู่ในแนวระดับตรงกันกับแนวที่หัววัดอัตราเร่งติดตั้งจะมีขนาดของการสั่นสะเทือนสูงที่สุดเพราะมุม $\omega t = 0$ องศา



รูปที่ 2.10 แสดงตำแหน่งที่มวลหมุนมาอยู่ในแนวระดับเดียวกับหัววัดอัตราเร่ง

2.3.4 การสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

เมื่อเราจ่ายไฟฟ้าสามเฟสกระแสสลับ เข้าที่ ขดลวดทั้งสามของขดลวดสเตเตอร์ ก็จะเหนี่ยวนำ ให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นโดยที่ฟลักซ์นี้จะเหนี่ยวนำกระแสขึ้นในขดลวดโรเตอร์สร้างทอร์กทางไฟฟ้าทำให้ตัวโรเตอร์เกิดหมุน ฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะเป็นสนามแม่เหล็กหมุนโดยจะหมุนเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ซึ่งจะมีค่ามากกว่า ความเร็วในการหมุนของตัวโรเตอร์

ด้วยสาเหตุนี้หากเราจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุลให้กับขดลวดสเตเตอร์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นสนามแม่เหล็กที่ไม่สมดุลทั้งสามเฟส ส่งผลทำให้การเหนี่ยวนำกระแสที่โรเตอร์มีค่าเปลี่ยนไปตลอดจนทอร์กของโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงการหมุนของโรเตอร์มีความผิดปกติ มอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น

หากเป็นสภาวะปกติที่เราจ่ายไฟฟ้าสมดุลทั้ง 3 เฟสให้กับมอเตอร์เช่น จ่ายไฟฟ้า 220 โวลต์ ทั้งสามเฟสให้กับมอเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนั้นแต่ละเฟสก็จะมีขนาดเท่ากัน และมี Phase Shift = 120 องศาไฟฟ้า

แต่หากเราจ่ายไฟฟ้าที่ไม่สมดุลให้กับมอเตอร์ คือ จ่ายไฟฟ้าสามเฟสด้วยค่าไม่เท่ากันอาจมีเฟสใดเฟสหนึ่งที่เกินหรือต่ำกว่าพิกัดแรงดันของมอเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนั้นก็จะมีขนาดแตกต่างกันและจะมีมุม Phase Shift เปลี่ยนไปไม่เป็น 120 องศา เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแต่ละเฟสนั้นจะมีผลของ positive sequence และ negative sequence

2.4 การแก้ปัญหาด้าน Signal Processing

2.4.1 บทนำเกี่ยวกับสัญญาณและระบบ

กล่าวคร่าว ๆ ถึงวิชา Signal processing อย่างกว้าง ๆ เพื่อเป็นพื้นฐานซึ่งวิชา มีหัวข้อหลัก ๆ คือ สัญญาณดังนี่คือระบบและคณิตศาสตร์ที่ใช้ใน signal processing นั้น สามารถแบ่งสัญญาณได้เป็น 2 พวกใหญ่

1. สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา (Continuous-time signal)
2. สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete-time signal)

สามารถสรุปถึงหัวข้อหลัก ๆ ที่เกี่ยวกับสัญญาณ 2 ประเภทดังกล่าวได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

	สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา	สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา
การแทน	ODE	DE (difference equation)
การ transform	Laplace Transform	Z-transform
โดเมนเวลา	Convolution	Discrete Convolution
โดเมนความถี่	Fourier transform	Discrete Fourier transform +Fast Fourier transform

2.4.2 คณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา

ในการศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณนั้นจำเป็นต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาอันหนึ่งอาจแสดงในรูป Ordinary differential equation จากนั้นก็จะมีวิธีการแปลงสัญญาณจากโดเมนหนึ่งเช่นโดเมนเวลาไปอยู่ในอีกโดเมนหนึ่ง (โดเมนความถี่) การแปลงดังกล่าวช่วยให้การวิเคราะห์สัญญาณง่ายขึ้น

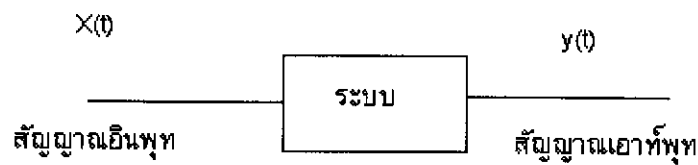
- การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform)

เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่แมปเอาสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา $x(t)$ ไปเป็น $X(s)$ หรืออยู่ใน s โดเมน (โดย $s = \sigma + j\omega$)

$$X(s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-st) dt \quad \dots(2.20)$$

นั่นคือการแปลงลาปลาซสามารถแทนสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตได้

- การแทนสัญญาณที่ต่อเนื่องทางโดเมนความถี่



รูปที่ 2.11 แสดงระบบของการประมวลผลสัญญาณ

นอกจาก $X(t)$ สามารถแทนด้วยการแปลงลาปลาซแล้ว มันยังสามารถแมปเข้าสู่โดเมนความถี่โดยใช้ฟูเรียร์ซีรีส์ (Fourier series) และฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier Transform) ซึ่งจะกล่าวในภายหลังในรายละเอียด

- การแทนสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาในโดเมนเวลา

ก่อนอื่นมาพิจารณาระบบ (System) ซึ่งบางครั้งในวิชา signal processing จะอ้างถึงเป็น Filter ดังรูปที่ 2.11

สามารถแบ่งคร่าว ๆ ได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ

1. ระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear) และระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear)
ระบบที่เป็นเชิงเส้นนั้นสามารถใช้หลักการวางซ้อน (Superposition) ได้ ส่วนระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะไม่สามารถใช้ได้

2. ระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time invariant) และระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time Varying)

ในระบบที่เป็นแบบ Time invariant นั้น ถ้ามีการเลื่อนหรือล่าช้าทางเวลาด้านอินพุตของระบบ จะมีการเลื่อนหรือล่าช้าทางเวลาในด้านเอาต์พุตของระบบที่เท่ากัน ส่วนระบบแบบ Time varying จะไม่เป็นเช่นนั้น

3. ระบบที่มีความจำ (Memory) และระบบที่ไม่มีความจำ (memory less)

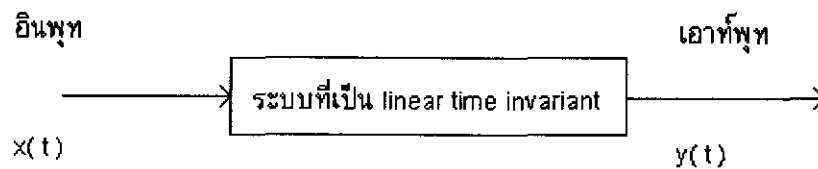
ระบบที่มีความจำ เช่น Network ทางไฟฟ้า ที่มีตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจำเป็นต้องทราบเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ส่วนระบบที่ไม่มีความจำ เช่น network ทางไฟฟ้า ที่มีแต่ความต้านทานอย่างเดียว

4. ระบบ Causal หรือ nonanticipatory และระบบ non - causal หรือ anticipatory

ในระบบแบบ Causal นั้นอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอินพุต ส่วนระบบ non-causal นั้น สัญญาณเอาต์พุตอาจจะมีการเปลี่ยนแปลง ได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตก็ตามดังนั้นโดยทั่วไปแล้วระบบที่เราพิจารณาจะถือเป็นระบบแบบ linear time - invariant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การคอนโวลูชัน (Convolution)



รูปที่ 2.12 แสดงการกรองแบบเชิงเส้น (Linear filtering)

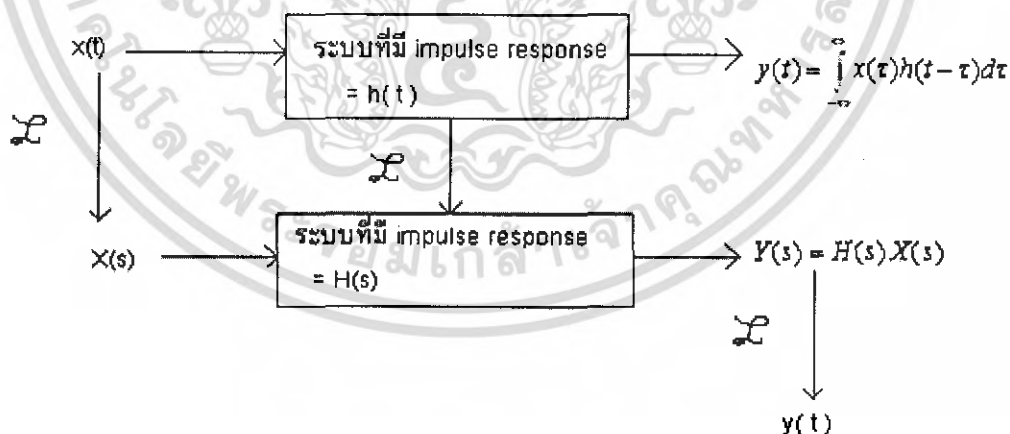
เป็นหลักการที่สำคัญอันหนึ่งใน Signal processing บางครั้งจะถูกเรียกว่า การกรองแบบเชิงเส้น (linear filtering) ถ้าพิจารณาระบบที่เป็น linear time invariant ดังรูปที่ 2.12

ณ เวลาที่ $t = \tau$ และระบบมีการตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) $= h(t)$ จะได้

$$\text{ว่า } y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad \dots (2.21)$$

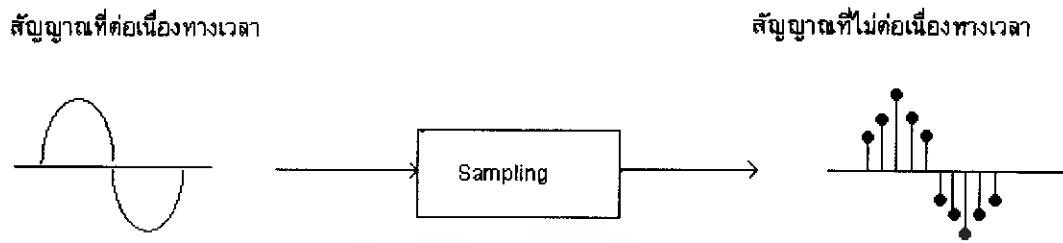
หรือจะได้ว่า $y(t) = h(t) * x(t) \quad \dots (2.22)$

ข้อสังเกต จะเห็นได้ว่า การคอนโวลูชันของสัญญาณนั้นจะมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ แต่การใช้การแปลงลาปลาซจะช่วยทำให้การคำนวณง่ายขึ้น (เป็นแค่การคูณ) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการคอนโวลูชันของสัญญาณ

2.4.3 คณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time signal)



รูปที่ 2.14 แสดงการ Sampling สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา

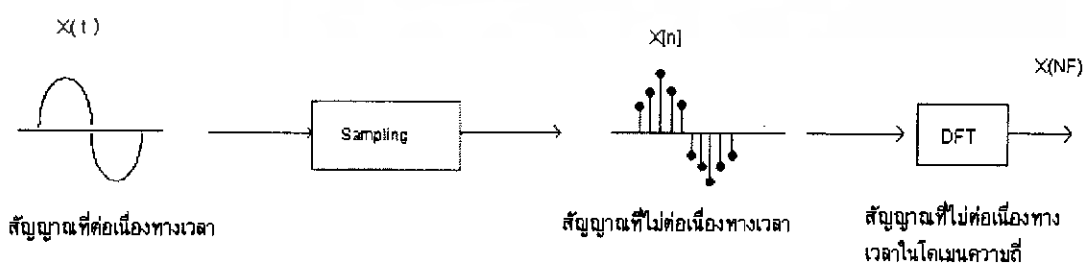
จากที่กล่าวมาข้างต้นสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาสามารถใช้แบบจำลองของ ODE และจากนั้นอาจถูกแทนด้วยการแปลงลาปลาซ หรือ การแปลงฟูเรียร์ เพื่อการวิเคราะห์เชิงสัญญาณเช่นกัน เราสามารถใช้ ODE แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete ODE) และการแปลงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete transform) กับสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา

- การแปลงแบบแซด (Z-transform)

สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Digital) นั้นเริ่มได้รับความสนใจประมาณ 50 ปีที่แล้วและ พบว่าการแปลงลาปลาซนั้นไม่เหมาะสมกับสัญญาณแบบนี้ ดังนั้นการแปลงแบบแซดจึงถูกนำมาใช้แทน

- การแทนสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางโดเมนความถี่

จากที่กล่าวไว้ว่าการแปลงฟูเรียร์สามารถแปลงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่ได้ แต่บางครั้งสัญญาณดังกล่าว ซึ่งเมื่อมีสัญญาณรบกวนผสมอยู่ด้วย อาจทำให้การแปลงฟูเรียร์นั้นไม่สามารถนำมาใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ การใช้การแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform (DFT)) จึงถูกนำมาใช้แทน โดยมีขั้นตอนคร่าว ๆ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transforms (DFT))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นจากการที่นาย Cooley และ turkey ได้ค้นพบวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform (FFT)) ซึ่งเป็นการดัดแปลง DFT ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถทำให้เกิดผลหรือทำได้ในทางคณิตศาสตร์ และนำมาวิเคราะห์สัญญาณได้เป็นอย่างดี อาจนับได้ว่า FFT เป็นพื้นฐานของ Discrete-time signal processing (DSP)

- การแทนสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาในโดเมนเวลา

เช่นกันกับสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา เราจะพิจารณาถึงการคอนโวลูชัน แต่เป็นคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time convolution) อาจสรุปคร่าว ๆ ได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา

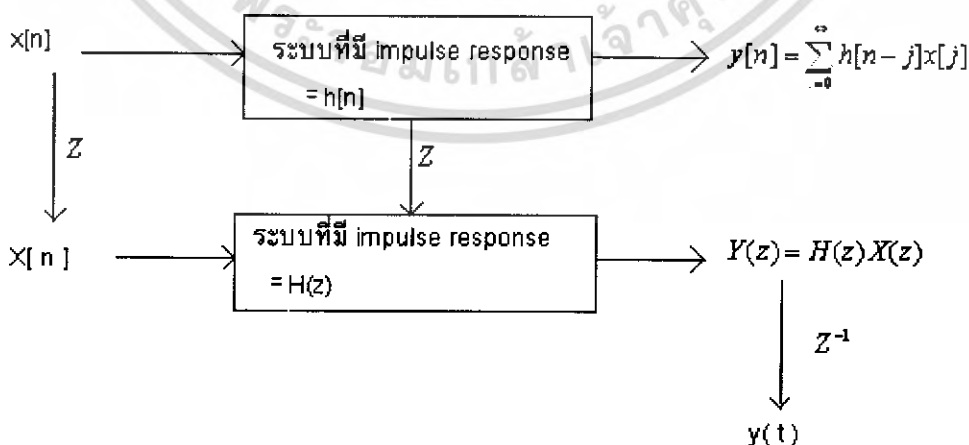
ณ $n=j$ และระบบมีการตอบสนองอิมพัลส์ = $h[n]$ จะได้

$$y[n] = \sum_{j=0}^{\infty} h[n-j]x[j] \quad \dots (2.23)$$

หรือเขียนย่อเป็น $y[n] = h[n] * x[n] \quad \dots (2.24)$

โดย * = การคอนโวลูชัน (ของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา)

ข้อสังเกต จะเห็นได้ชัดว่าการคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลานั้นมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์แต่การแปลงแบบแซด จะช่วยทำให้การคำนวณง่ายขึ้น (เป็นแค่การคูณ) ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงการคอนโวลูชันแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาโดยใช้การแปลงแบบแซด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 Discrete – time signal processing (DSP)

ในสมัยนั้นเรื่องของ signal processing จะเป็นสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา อุปกรณ์ที่ใช้อาจเป็นตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ จนไปถึงแอมพลิไฟเออร์ ซึ่งการทำและการเปลี่ยนแปลงแก้ไขด้านฮาร์ดแวร์นั้นเป็นไปได้ยาก เช่น เส้นประวง ใน DSP จะเป็นแค่ชิพพีซีจีเตอร์ ซึ่งทำได้ง่าย แต่ในสมัยก่อนจะต้องเป็นเส้นตัวนำที่มีความยาวค่าหนึ่ง ดังนั้น DSP จึงถูกนำมาใช้แทนที่และได้รับความนิยม และถูกนำมาใช้งานในหลาย ๆ ด้าน เช่น การสื่อสารแบบดิจิทัล เรดาร์ การส่งสัญญาณวิทยุ โทรศัพท์ การควบคุม การกรองสัญญาณ การวิเคราะห์สัญญาณ ในช่วงชั่วคราว และช่วงอิมพัลส์ และอื่น ๆ อีกมากมาย นอกจากนี้ DSP ยังมีความยืดหยุ่นในลักษณะที่ว่าสามารถทำได้ โดยใช้ซอฟต์แวร์ โดยเฉพาะในแง่ของการโปรแกรมการสร้างลักษณะวงจรที่ไม่สามารถทำได้ในแบบอนาลอก

ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวคร่าว ๆ ถึงหัวใจหลัก ๆ ของ DSP คือ ชนิดของสัญญาณการวิเคราะห์หาสเปกตรัมของสัญญาณ โดยใช้ DFT และ FFT และ Digital filter

อึ่ง DSP เป็นเรื่องเกี่ยวกับสัญญาณที่เป็นตัวเลขเดี่ยว ๆ ไม่ต่อเนื่อง MATLAB สามารถนำมาใช้ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะทำให้ผู้เรียนสามารถได้ลงมือปฏิบัติจริง และเห็นผลลัพธ์จริงอันจะนำมาสู่ความเข้าใจในวิชา DSP อย่างได้ผล นอกจากนี้ MATLAB มีฟังก์ชันที่เรียกมาใช้กับ signal processing เท่านั้น ผู้ที่สนใจรายละเอียดที่ลึกลงไปสามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้จากหนังสือด้าน signal processing ใหม่ ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีคำสั่ง MATLAB มาด้วย

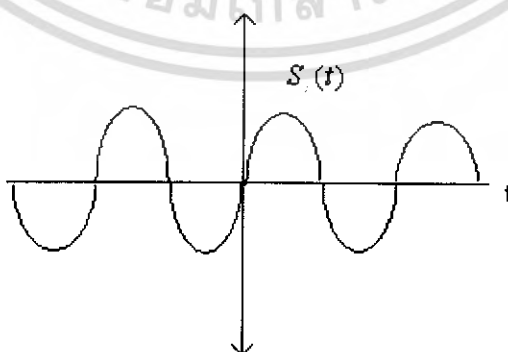
2.4.5 สัญญาณและการจัดกลุ่ม

ในการวิเคราะห์สัญญาณนั้น โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว สามารถแบ่งกลุ่มของสัญญาณได้เป็น

- สัญญาณรายคาบ (Periodic signal) และ สัญญาณไม่เป็นรายคาบ (non periodic signal)

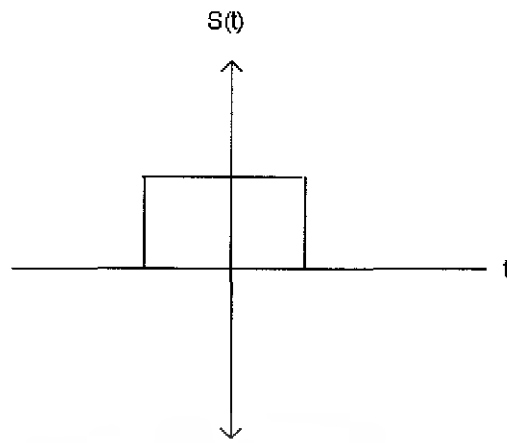
ให้สัญญาณรายคาบ มีรูปสมการเป็น $S_p(t) = s(t + T_0), \forall T_0$

และสำหรับสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ $S(t) \neq s(t + T_0), \exists T_0$



รูปที่ 2.18 สัญญาณ Sine ที่เป็นรายคาบ

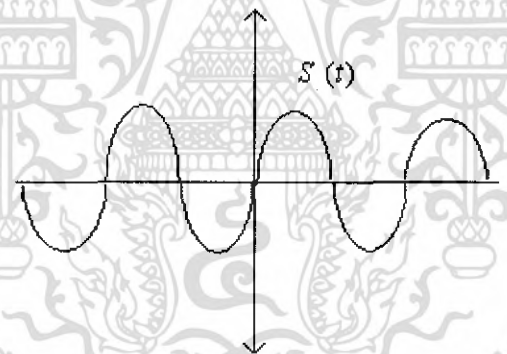
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



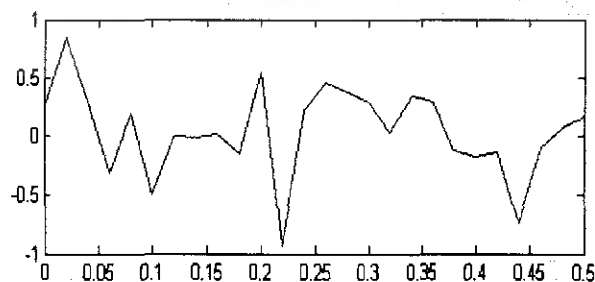
รูปที่ 2.19 สัญญาณพัลส์ที่ไม่เป็นรายคาบ

- สัญญาณที่มีความแน่นอน (Deterministic signal) และ สัญญาณแรมดัม (Random signal)

สัญญาณที่มีความแน่นอนในทุกละเวลา ก็คือ สัญญาณที่สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ สัญญาณแรมดัม คือสัญญาณที่ไม่มีความแน่นอน การหาค่าของสัญญาณจึงจำเป็นต้องพิจารณาจากกลุ่มของส่วนที่จัดมาพิจารณาโดยใช้หลักทางสถิติและความน่าจะเป็น (Probability)



รูปที่ 2.20 สัญญาณที่มีความแน่นอน
(เช่น $x(t) = \cos(2\pi ft)$)



รูปที่ 2.21 สัญญาณแรมดัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณอนาลอก (Analog signal) และสัญญาณดิจิทัล (digital signal)

สัญญาณอนาลอก เป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องทางเวลา

สัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete-time signal)

และถูก quantize

2.4.6 การวิเคราะห์สัญญาณโดยทฤษฎี Fourier

จากที่ทราบมาแล้วในทาง Signal processing นั้น นอกจากจะสนใจสัญญาณใน time domain แล้ว ยังต้องศึกษาถึงสัญญาณใน frequency spectrum ของสัญญาณด้วย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สัญญาณด้วยทฤษฎีของ Fourier ซึ่งแบ่งเป็น หัวเรื่องใหญ่ๆ ได้เป็น 2 ลักษณะ คือ Fourier series และ Fourier transform

ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว Fourier series ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณรายคาบ และ Fourier transforms ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ

กำหนดให้ $S_p(t)$ = สัญญาณรายคาบที่มีเวลา T_0 (p แทน periodic)

$S(t)$ = สัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ

ใช้อักษรตัวเล็กใน Time Domain เช่น $S_p(t)$ หรือ $S(t)$ ใช้อักษรตัวใหญ่ใน Frequency Domain เช่น $S_p(f)$ หรือ $S(f)$

- Fourier series

ให้ $S_p(t)$ เป็น Periodic Signal ที่มี period = T_0 สัญญาณ $S_p(t)$ นี้สามารถ แทนได้ด้วยผลรวมของ sine และ cosine ดังนี้

$$S_p(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) \right] \quad \dots (2.25)$$

โดยที่

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} S_p(t) dt \quad \dots (2.26)$$

$$a_n = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} S_p(t) dt \cos\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) dt, n = 1, 2, \dots \quad \dots (2.27)$$

$$b_n = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} S_p(t) dt \sin\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) dt, n = 1, 2, \dots \quad \dots (2.28)$$

Fourier series ในสมการ (2.25) นั้น สามารถทำให้อยู่ในรูปง่ายขึ้นในรูปของ complex exponential ด้วยได้ โดยแทน

$$\cos\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) = \frac{1}{2} \left[\exp\left(\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) + \exp\left(\frac{-j2\pi nt}{T_0}\right) \right] \quad \dots (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) = \frac{1}{2j} \left[\exp\left(\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) - \exp\left(-\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) \right] \quad \dots (2.30)$$

ลงในสมการ และจัดรูปใหม่จะได้

$$S_p(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[(a_n - jb_n) \exp\left(\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) + (a_n + jb_n) \exp\left(-\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) \right] \quad \dots (2.31)$$

หรือ

$$S_p(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n \exp\left(\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) \quad \dots (2.32)$$

โดยที่

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} S_p(t) dt \exp\left(-\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) dt \quad \dots (2.33)$$

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

- Fourier transform

ถ้า Periodic signal มี $T_0 \rightarrow \infty$ จะกลายเป็น Nonperiodic Signal

$$s(t) = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} S_p(t) \quad \dots (2.34)$$

$$\text{จาก } S_p(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n \exp\left(\frac{j2\pi nt}{T_0}\right) \quad \dots (2.35)$$

ถ้ากำหนดให้ $\Delta f = 1/T_0$, $f_n = n/T_0$ และ $s(f_n) = c_n T_0$ จะได้

$$s(t) \Rightarrow s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) \exp(j2\pi ft) df \quad \dots (2.36)$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad \dots (2.37)$$

ข้อสังเกต

1. Frequency-domain \Rightarrow ตัวอักษรใหญ่

Time domain \Rightarrow ตัวอักษรเล็ก

2. จาก $s(f) \Rightarrow s(t)$ และ $s(f)$ คือ Fourier Transform ของ $s(t)$

3. จาก $s(t) \Rightarrow s(f)$ และ $s(t)$ คือ Inverse Fourier transforms ของ $s(f)$

$s(t)$ และ $s(f)$ คือ Fourier Transform Pair

4. ความสัมพันธ์ระหว่าง Laplace Transform กับ Fourier Transform

$$\text{Fourier Transform คือ } S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad \dots (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

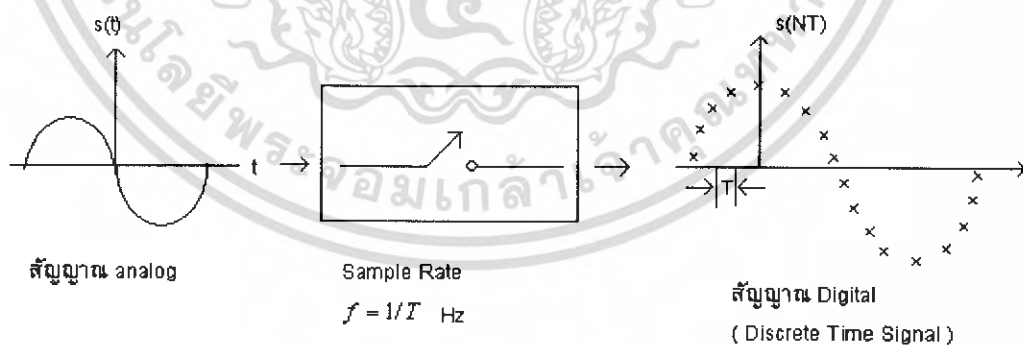
$$\text{Laplace Transform คือ } S(s) = \int_0^{\infty} s(t) \exp(-st) dt \quad \dots (2.39)$$

โดยที่ $s = \sigma + j\omega$ จะเห็นได้ว่า Fourier Transform อาจหาได้จาก Laplace Transform โดยให้ $s = j\omega = 2\pi f$

โดยทั่วไปแล้ว Fourier Transform จะเพียงพอต่อการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ เช่นในวิชาด้านสื่อสาร (ซึ่งสนใจเฉพาะช่วง steady state) แต่ Laplace Transform นั้นจะใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีเรื่องของ transient มาเกี่ยวข้องด้วย

2.4.7 การชักตัวอย่าง (Sampling) ของสัญญาณ

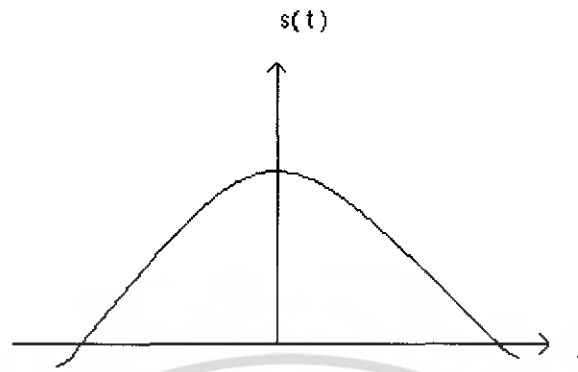
จากการแบ่งกลุ่มของสัญญาณที่กล่าวมาแล้ว สัญญาณ อนุาลอก คือ สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา เช่น สัญญาณเสียง สัญญาณที่วัดจากอุปกรณ์ sensor (อย่างต่อเนื่อง) ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาในด้านของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์การสื่อสาร ซึ่งแนวโน้มจะหันมาใช้ระบบดิจิทัลมากขึ้นด้วยข้อดีของมัน เช่น ทนต่อสัญญาณรบกวน ยืดหยุ่นต่อการใช้งาน โดยเข้าได้กับระบบดิจิทัลอื่น ๆ มีรูปแบบที่รวมกันอยู่ ทำให้สามารถส่งไปได้หลายแบบสามารถใช้แบนด์วิธได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงเรื่องของการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing) และการเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูลได้โดยการใส่รหัส (Encryption) สัญญาณดิจิทัล ก็คือสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา เช่น ข้อมูลไบนารีที่ได้จากเอาท์พุทของคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็น 0 กับ 1 หรืออีกแง่หนึ่งก็คือ สัญญาณ analog ที่ถูกแซมเปิล (sample) ด้วยอัตราแซมปลิง (sampling rate) $1/T$ Hz (และ T คือคาบเวลาการแซมปลิง) ซึ่งได้สัญญาณที่มีค่าเดี่ยว ๆ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า discrete-time signal



รูปที่ 2.22 แสดงการแซมปลิงสัญญาณอนุาลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทฤษฎีพื้นฐานการแซมปลิง



รูปที่ 2.23 แสดงสัญญาณ $s(t)$ เฉพาะช่วงเวลาหนึ่ง

ขบวนการแซมปลิง (Sampling process) เป็นขบวนการพื้นฐานอันหนึ่งของ digital signal processing, digital communications และงานอื่น ๆ ที่ใช้สัญญาณดิจิทัล โดยสัญญาณอนาลอก จะถูกแปลงไปเป็นลำดับของการแซมเปิล (sequences of sampling) ที่มีระยะเท่า ๆ กันพิจารณาสัญญาณหนึ่ง $s(t)$ เฉพาะช่วงเวลาหนึ่ง

ถ้าสัญญาณ $s(t)$ นี้ถูกแซมเปิลด้วยอัตราที่สม่ำเสมอคือ 1 ครั้ง ใน T วินาที ผลที่ได้จะเป็นลำดับของการแซมเปิลที่มีช่วงห่าง 1 วินาที (แทนด้วย $s(NT)$)

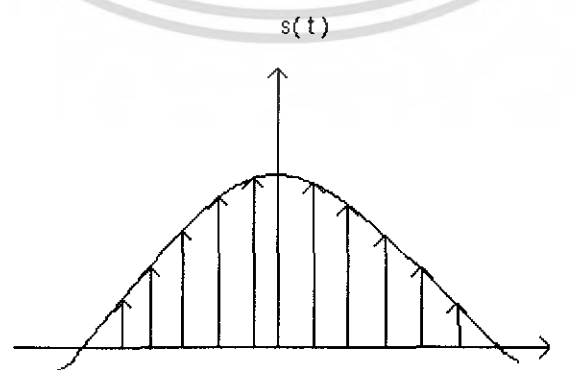
โดยที่

N = จำนวนเต็ม

T = คาบเวลาการแซมปลิง (sampling period)

$F = 1/T$ = อัตราการแซมปลิง (sampling rate)

รูปแบบของการแซมปลิงในอุดมคติ นั้น มีชื่อเรียกว่า Instantaneous sampling ถ้าให้ $s(t)$ = สัญญาณที่ได้จากการแซมปลิงสัญญาณ $s(t)$ จะมีผลดังรูป 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงการ Instantaneous sampling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่มีแบนด์วิดท์จำกัด และมีองค์ประกอบความถี่ไม่เกิน f Hz สามารถแทนค่าได้ด้วยค่าแซมเปิลของตัวมันโดยมีช่วงที่สม่ำเสมอไม่เกินหรือแทนค่าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$T \leq 1/(2f) \quad \dots (2.40)$$

และ $2f =$ อัตราในควิสท์ (Nyquist Rate)

$T = 1/(2f) =$ ช่วงในควิสท์ (Nyquist interval)

นั่นคือตรวจดูที่แซมเปิลสัญญาณ $s(t)$ ด้วยช่วงไม่เกินความช่วงในควิสท์ ($1/2f$ วินาที) สัญญาณ analog $s(t)$ เดิมสามารถหาค่ากลับคืนมาได้จากลำดับของแซมเปิล $s(nT)$ $n=0, \dots$ โดยไม่มีความผิดพลาด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ในการแซมเปิลสัญญาณที่มีค่าความถี่ f จะต้องแซมเปิลสัญญาณนั้นด้วยอัตราแซมปลิง f_s โดยที่

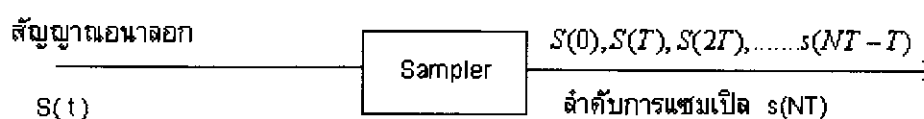
$$f_s \geq 2f \quad \dots (2.41)$$

และความถี่ที่เท่ากับ $f_s/2$ จะเรียกว่า ความถี่ในควิสท์ (Nyquist Frequency)

เหตุผลของการที่ต้องมีเงื่อนไขข้างต้น เนื่องจาก ถ้าแซมเปิลด้วย (ซ้ำเกินไป) แล้วจะเกิดการเคลือบแฝง (Aliasing) ของสัญญาณ นั่นคือ จะไม่สามารถนำสัญญาณเดิมกลับคืนมาได้ เช่น สัญญาณรูปไซน์ (sine wave) ที่มีความถี่ $f=50$ Hz เพื่อป้องกันกรเคลือบแฝงของสัญญาณ จะต้องแซมปลิงดังกล่าวด้วยอัตรา นั่นคือ มากกว่าหรือ เท่ากับ 100 Hz ขึ้นไป และความถี่ในควิสท์ของกรณีนี้คือ 50 Hz

2.4.8 การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform)

จากพื้นฐานความรู้เรื่อง Fourier transform นั้นสัญญาณที่ใช้ถือว่ามีค่าต่อเนื่องทางเวลา (continuous signal) ปัจจุบันมีการนำระบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา (ระบบ digital) มาใช้จึงได้มีการพัฒนาเป็น discrete fourier transform (DFT) ซึ่งใช้เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลใน time domain ให้เป็นเซตของจุดใน frequency domain ขบวนการ DFT ก็จะเริ่มจากการแซมปลิงสัญญาณอนาล็อก $s(t)$ ให้เป็นลำดับของแซมเปิล ดังนี้

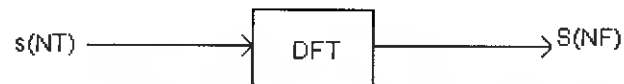


รูปที่ 2.25 แสดงขบวนการ DFT

T = คาบเวลาการแซมปลิง

N = จำนวนการแซมเปิล

และให้ขบวนการแซมปลิงมีอัตราแซมปลิงมากกว่า หรือเท่ากับความถี่สูงสุดของสัญญาณ จากนั้นก็ป้อน $s(NT)$ เข้าสู่ขบวนการ DFT และได้ผลลัพธ์ คือ $S(NF)$



รูปที่ 2.26 แสดงผลลัพธ์ของกระบวนการ DFT คือ $S(NF)$

$S(NF)$ จะแสดงถึงลำดับของ N แซมเปิลที่อยู่ห่างกันใน frequency domain อยู่ f_s Hz เทคนิค Numerical Computation นั้นสามารถทำได้เป็นอย่างดีกับ Discrete fourier transform ดังนั้น จึงสามารถใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ DFT ของสัญญาณเพื่อหาสเปกตรัมของสัญญาณหรือการจำลองแบบ (simulation) ต่าง ๆ ได้อย่างไรก็ตาม DFT มีอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างซับซ้อน โดยเฉพาะเมื่อ อันดับค่า N มีค่ามาก แต่ทั้ง $s(NT)$ กับ $S(NF)$ มีลักษณะเป็น discrete และ periodic ดังนั้นจะพบว่ารูปแบบการคำนวณใหม่จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการคำนวณได้ ซึ่งก็คือ Fast Fourier Transform (การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว)

2.4.9 Fast Fourier Transform

จุดมุ่งหมายของ fft ก็เพื่อลดเวลาการคำนวณของคอมพิวเตอร์ลง โดยใช้ข้อดีของการคำนวณร่วมประสิทธิผลของ DFT ที่สามารถกระทำได้ในลักษณะซ้ำ (iterative manner) ดังนั้นจึงช่วยลดเวลาในการคำนวณ วิธีการของ fft คือ การจัดแบ่งแล้วทำการคำนวณ (divide and conquer) และจะให้จำนวนข้อมูล N เป็นค่า 2 ยกกำลัง M ($N=2^M$) โดย M เป็นจำนวนเต็มบวก

ถ้าเปรียบเทียบการคำนวณ DFT จะมี

การคูณจำนวนเชิงซ้อน N^2 ครั้ง หรือความซับซ้อน $O(N^2)$

การบวกจำนวนเชิงซ้อน $N(N-1)$ ครั้ง หรือความซับซ้อน $O(N(N-1))$

ถ้าเปรียบเทียบการคำนวณ FFT จะมี

การคูณจำนวนเชิงซ้อน N ครั้ง หรือความซับซ้อน $O(N \log_2 N)$

การบวกจำนวนเชิงซ้อน $N \log_2 N$ ครั้ง หรือความซับซ้อน $O(N \log_2 N)$

*ที่มาและรายละเอียดของ fft สามารถหาดูได้จากตำราด้าน signal processing

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการใช้ fft จะลดการคำนวณลงไปได้เป็น $Factor = \frac{\log_2 N}{N}$

เพราะฉะนั้นถ้า N มีค่ามากก็จะมีผลต่อระยะเวลาในการคำนวณได้

2.4.10 การคำนวณ fft ใน MATLAB

MATLAB มีฟังก์ชัน fft ที่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณได้เลย และมีรูปแบบคือ

แบบ 1 อาร์กิวเมนต์

รูปแบบคือ $y = \text{fft}(x)$

X คือ input argument และเป็นเวกเตอร์ที่แทนจุดของสัญญาณใน time domain

Y คือ output argument และเป็นเวกเตอร์ขนาดเดียวกันที่มีค่า complex ที่แทนถึง frequency domain content ของสัญญาณ input

ถ้าจำนวนค่าของสัญญาณใน Time domain เป็นค้ายกกำลัง 2 MATLAB ใช้ fft algorithm ในการคำนวณ

ถ้าจำนวนค่าของสัญญาณใน Time domain ไม่เป็นค้ายกกำลัง 2 MATLAB ใช้ DFT algorithm ในการคำนวณ

แบบ 2 อาร์กิวเมนต์

รูปแบบคือ $y = \text{fft}(x, L)$

X คือ input argument และเป็นเวกเตอร์ที่แทนจุดของสัญญาณใน time domain

L คือ input argument เป็นจำนวนเต็มซึ่งแสดงถึงจำนวนจุดสำหรับเวกเตอร์เอาท์พุท

Y คือ output argument และเป็นเวกเตอร์ที่มีค่า complex ที่แทนถึง frequency domain content ของสัญญาณ input L ค่า

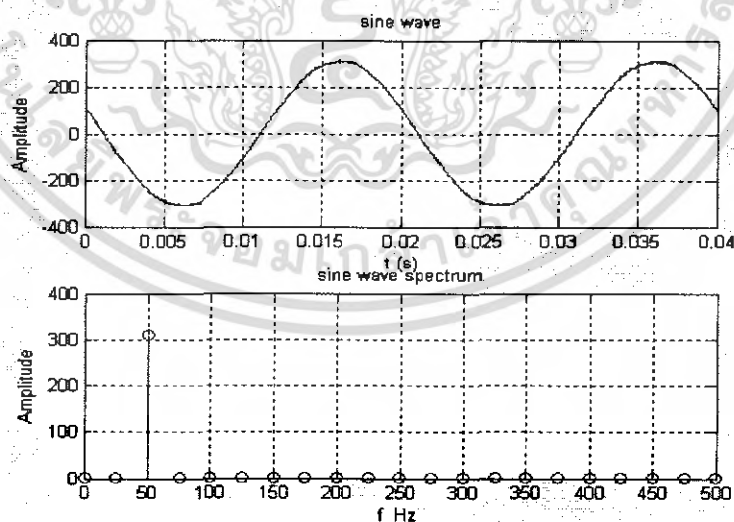
ถ้าค่า L มีค่าเป็นยกกำลัง 2 MATLAB ใช้ fft algorithm ในการคำนวณ

ถ้าค่า L มีค่าไม่เป็นยกกำลัง 2 MATLAB ใช้ DFT algorithm ในการคำนวณ

2.4.11 การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

สัญญาณการสั่นสะเทือนจะเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกซึ่งเป็นไปตามลักษณะของแรงที่มากกระตุ้นซึ่งเป็นแบบฮาร์โมนิกด้วยและเป็นสัญญาณที่ถูกแสดงอยู่บนโดเมนเวลา การวินิจฉัยสภาพหรือข้อบกพร่องของเครื่องจักรจะได้รับการพิจารณาขนาดของการสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียวถ้าหากแรงที่มากกระตุ้นไม่อยู่ในรูปของสัญญาณฮาร์โมนิกแต่เป็นสัญญาณลักษณะคาบแล้ว ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องใช้วิธีการที่จะแปลงสัญญาณลักษณะเป็นคาบออกมาเป็นสัญญาณเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงแบบฟูรีเยร์ และเมื่อได้ข้อมูลหรือผลเฉลยซึ่งประกอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ก็จะสามารถวินิจฉัยได้ละเอียดขึ้นถึงต้นเหตุการชำรุดได้ การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ก็คือ การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม โดยจะใช้การวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์ ซึ่งเป็น ซึ่งเป็นการแปลงสัญญาณลักษณะเป็นคาบมาเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่อง Signal processing และการนำหลักการแปลงของฟูรีเยร์มาใช้แปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาให้เป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม คือ การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ ซึ่งการวิเคราะห์ลักษณะนี้หากนำมาใช้กับเครื่องจักรจะให้ข้อมูลของการสั่นสะเทือนได้มากกว่าข้อมูลจากการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา เพื่อเป็นการทำความเข้าใจให้ดีขึ้นสำหรับการวิเคราะห์แบบสเปกตรัมนี้สัญญาณคลื่นรูปไซน์บนโดเมนเวลาจะถูกพิจารณาเป็นกรณีแรก สัญญาณดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ สัญญาณนี้จะมีค่าความถี่ค่าเดียวซึ่งก็คือ 50 Hz ดังนั้นเมื่อแปลงสัญญาณดังกล่าวนี้ไปเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ก็จะมีสัญญาณเพียงค่าเดียว (50Hz) บนแกนความถี่ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การแปลงสัญญาณ Sine wave จากโดเมนเวลามาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

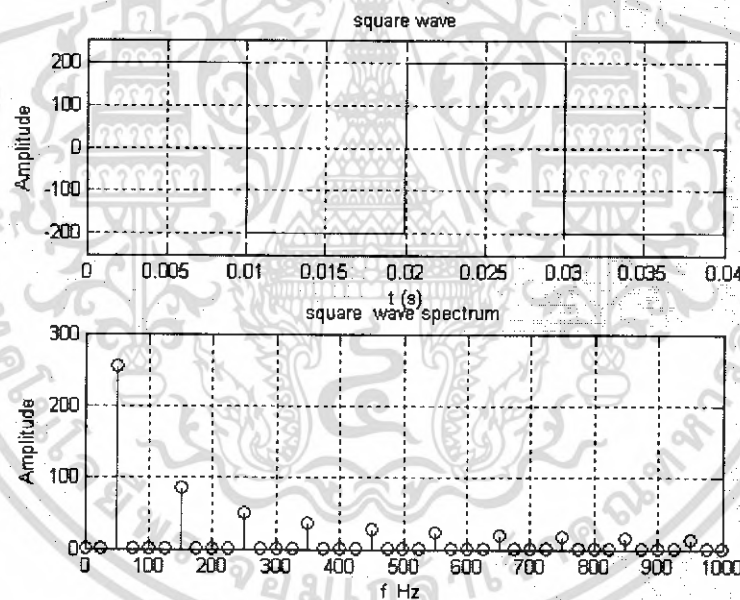
$$v(t) = v_m \sin(\omega t) \quad \dots (2.42)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \frac{v_m}{\sqrt{2}} \quad \dots (2.43)$$

ในกรณีที่สองเมื่อสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 50Hz เขียนบนโดเมนเวลา เมื่อใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) ค่าสัญญาณแบบเป็นคาบนี้จะสามารถถูกเขียนเป็นสัญญาณแบบฮาร์โมนิกได้หลายความถี่ โดยในแต่ละความถี่จะมีขนาดต่างกันดังรูปที่ 2.28

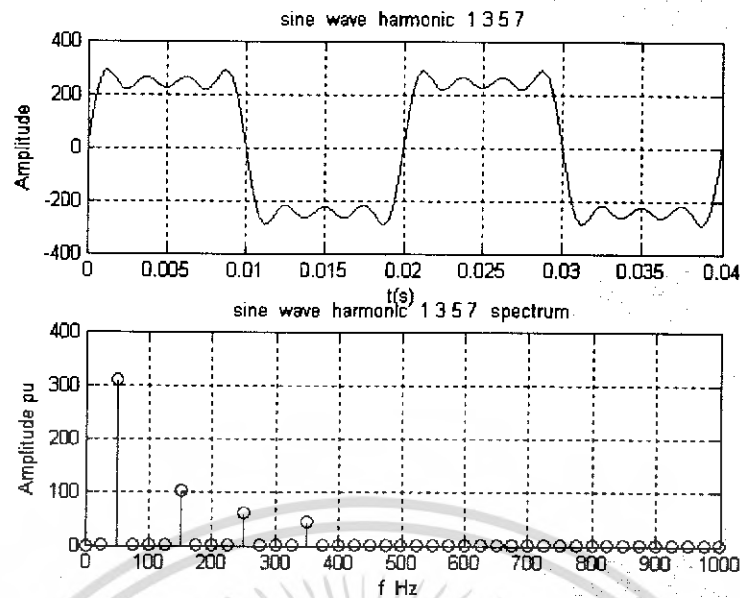
$$v(t) = \frac{4v_{dc}}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right] \quad \dots (2.44)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = v_{dc} \quad \dots (2.45)$$



รูปที่ 2.28 การแปลงสัญญาณ Square wave จากโดเมนเวลามาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



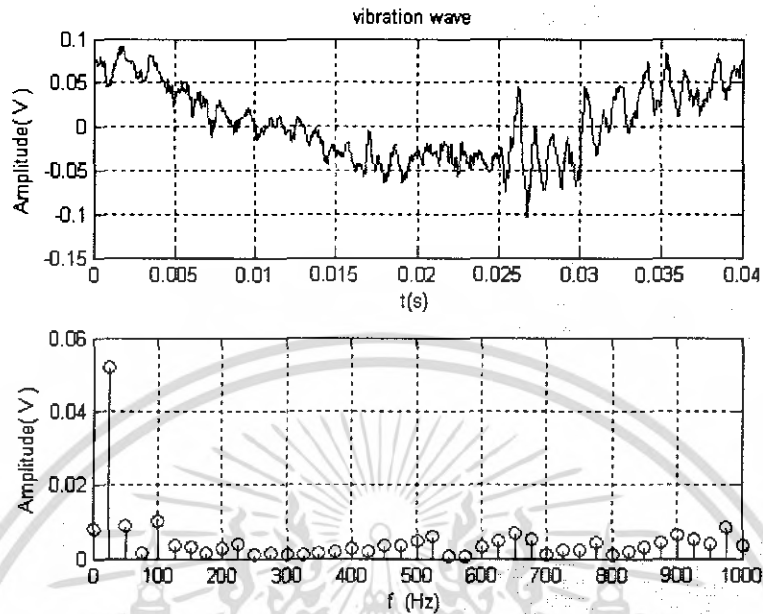
รูปที่ 2.29 การแปลงสัญญาณ ที่ประกอบด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50, 150, 250, 350 Hz จากโดเมนเวลามาเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่

$$v(t) = V_m \sin(\omega t) + \frac{V_m}{3} \sin(3\omega t) + \frac{V_m}{5} \sin(5\omega t) + \frac{V_m}{7} \sin(7\omega t) \dots \dots (2.)$$

ในกรณีที่สามเมื่อสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50 , 150, 250, 350 Hz เขียนบนโดเมนเวลาเมื่อใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) ค่าสัญญาณแบบเป็นคาบนี้จะสามารถถูกเขียนเป็นสัญญาณแบบฮาร์โมนิกได้ที่ความถี่ 50, 150, 250, 350 Hz โดยในแต่ละความถี่จะมีขนาดต่างกัน ดังรูปที่ 2.29

เมื่อนำการวิเคราะห์แบบสเปกตรัมมาใช้กับสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องจักร ก็จะทำให้ได้ข้อมูลในการบอกว่าขนาดการสั่นสะเทือนซึ่งถูกแสดงในรูปแบบของค่ารวม (Overall Value) โดยจะมีค่าเป็นตัวเลขค่าหนึ่งนั้น จริงแล้วจะประกอบด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีขนาดต่าง ๆ กันอยู่ที่แต่ละความถี่ ซึ่งที่บางความถี่ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีค่ามาก ที่บางความถี่ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีค่าน้อย จุดที่สัญญาณการสั่นสะเทือนมีค่ามากมักเป็นตัวบ่งบอกว่าถ้ามีปัญหาเกิดขึ้นก็จะเกิดจากชิ้นส่วนที่ทำงานเกี่ยวข้องกับค่าความถี่นั้น การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบรวม (overall vibration) จะเป็นการบอกลักษณะทั่วไปถึงขนาดการสั่นสะเทือนว่ามีขนาดอยู่ในเกณฑ์ที่จะยอมรับได้หรือไม่เท่านั้น แต่การวิเคราะห์แบบสเปกตรัมจะบอกถึงค่าความถี่ใดมีขนาดการสั่นสะเทือนผิดปกติจากข้อมูลเหล่านั้นมักจะสามารรถนำไปวิเคราะห์หาต้นเหตุของการเกิดการสั่นสะเทือนได้ ดังนั้นการ

วิเคราะห์แบบสเปกตรัมจึงให้ข้อมูลที่ละเอียดกว่าและมีความสามารถในการบ่งบอกสาเหตุการเกิดการสั่นสะเทือนได้มากกว่า



รูปที่ 2.30 แสดงตัวอย่างของการแสดงขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อมอเตอร์เกิดการ Unbalance mechanical บนโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

3.1 Unbalance Mechanic

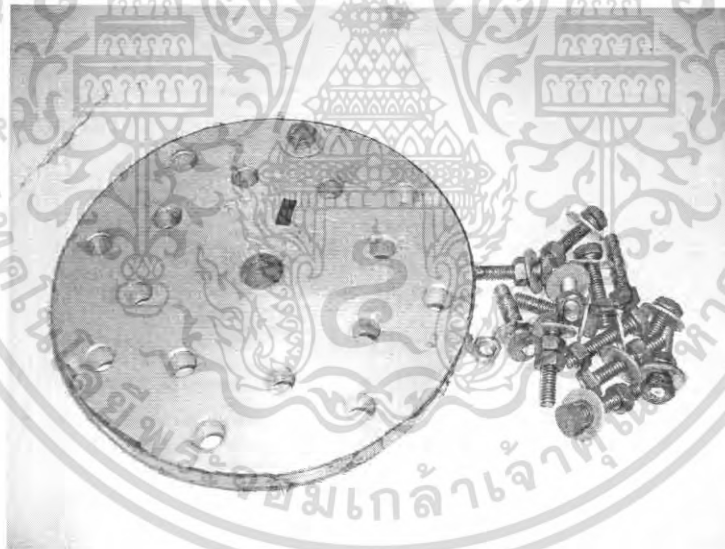
ในการทดลองความไม่สมดุลทางกลนี้เราสามารถออกแบบการทดลองให้มอเตอร์หมุนอย่างไม่สมดุลซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1. ใส่ภาระทางกลที่ไม่สมดุลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำขั้ว
2. ใส่มวลเพิ่มเข้าไปภายในตัวโรเตอร์เพื่อให้มวลของมอเตอร์ไม่สมดุลซึ่งได้ทำเป็น 2 แบบคือ
 - ใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่ช่องของโรเตอร์
 - ติดมวลเพิ่มเข้าไปที่ครีบบระบายความร้อน

ทั้งสองกรณีนี้จะเป็นลักษณะของการเหวี่ยงตุ่มน้ำหนักเป็นวงกลมเราจึงออกแบบการทดลองให้สอดคล้องกับสมการ

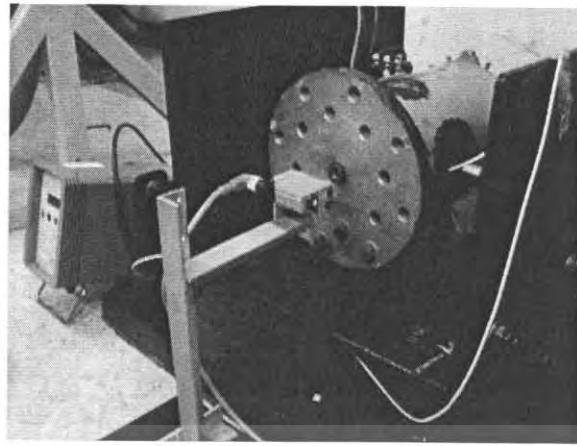
$$m\omega^2 r \cos \omega t = Ma$$

โดย $m\omega^2 r \cos \omega t$ เป็นค่าทางทฤษฎีได้มาจากการคำนวณ
และ Ma เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

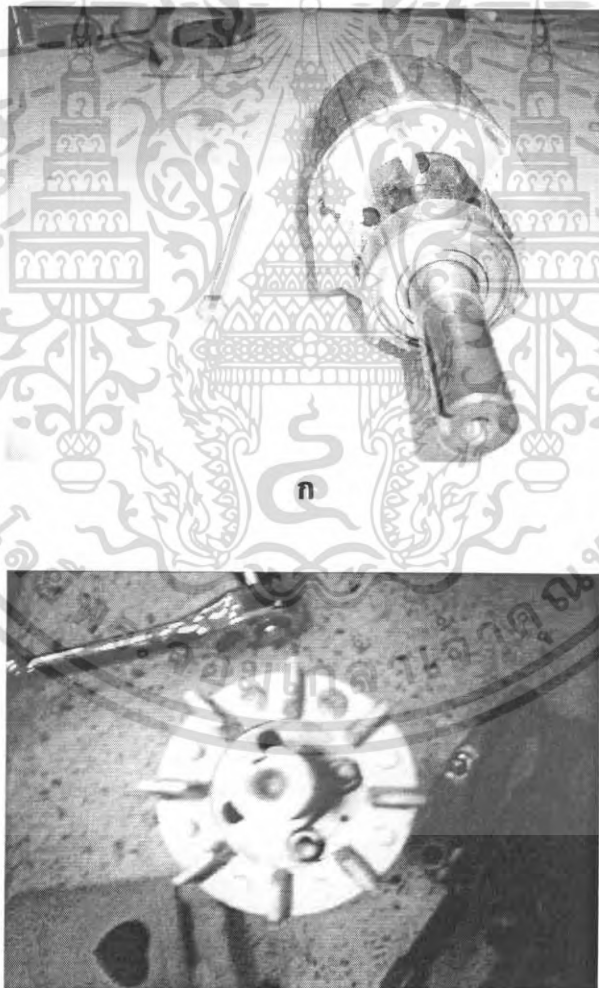


รูปที่ 3.1 แสดง Fly wheel และ น็อตที่นำมาต่อเข้ากับมอเตอร์ (กรณีใส่ภาระทางกลที่ไม่สมดุลจากภายนอก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้ง หัววัดอัตราเร่ง Photo switch เมื่อนำภาระทางกลที่ไม่สมดุลจากภายนอกมาต่อเข้ากับมอเตอร์

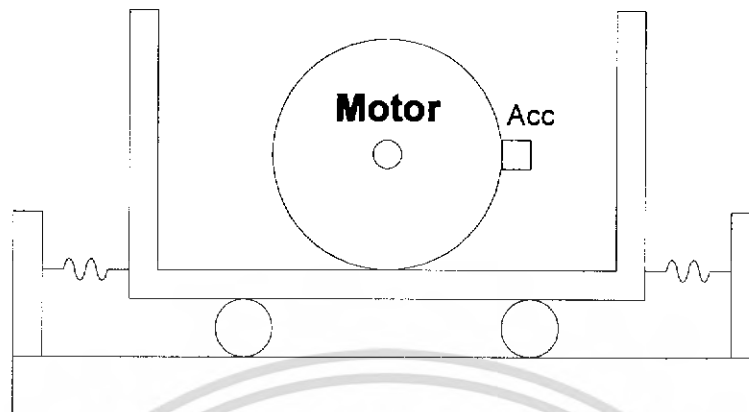


ข

รูปที่ 3.3 ก และข แสดงการติดมวลเพิ่มเข้าไปที่ช่องของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

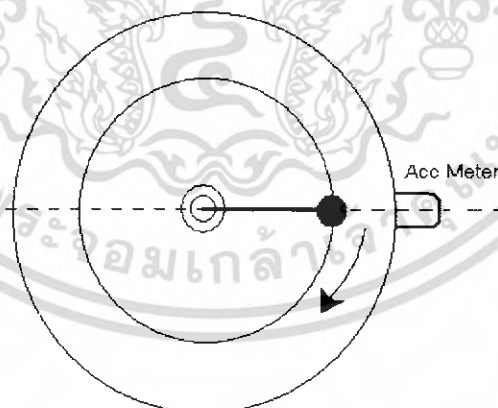
3.2 การติดตั้งหัววัดอัตราเร่งและการติดตั้ง Photo switch



รูปที่ 3.4 แสดงแท่นทดสอบที่ใช้ทดลองและการติดตั้งหัววัดอัตราเร่ง

การติดตั้งหัววัดอัตราเร่งจะมีความสำคัญมากเพราะจะเป็นตัวที่บอกได้ว่าเราสามารถวัดค่าการสั่นสะเทือนถูกต้องหรือไม่โดยแท่นทดสอบที่ใช้ทดลองเราออกแบบให้สามารถสั่นสะเทือนอย่างอิสระในแนวระนาบ ดังรูปที่ 3.4

จากรูปจะเห็นได้ว่าแท่นทดสอบมีการติดตั้งสปริงในแนวแกนนอนและติดตั้งล้อที่ด้านใต้แท่นมอเตอร์ ทำให้ระบบสามารถสั่นสะเทือนอย่างอิสระในแนวแกนนอนเราจึงติดตั้งหัววัดอัตราเร่งในแนวนี้เพื่อสามารถวัดค่า อัตราเร่งได้อย่างถูกต้องไม่มีการสูญเสีย เพราะสปริงจะช่วยให้ส่งผ่านแรงต่อไปได้



รูปที่ 3.5 แสดงการหมุนของมวลเมื่อหมุนมาตรงแนวของหัววัดอัตราเร่ง

เราสามารถรู้จังหวะที่มวลหมุนมาตรงกับหัววัดได้โดยการใช้ Photo switch ซึ่งทำให้เราสามารถเลือกค่าอัตราเร่งจากหัววัดได้ ณ ตำแหน่งนี้ได้ เราสามารถเรียกชื่อ Photo switch ได้อีกอย่างคือ พรอกซีมิติ

3.3 ใส่ความไม่สมดุลทางกลจากภายนอกให้มอเตอร์เหนี่ยวนำขั้ว

ภาระทางกลที่เราใส่จากภายนอกในที่นี้คือ Fly wheel โดยเราจะทำการเพิ่มขนาดมวลโดยการใส่น็อตเพิ่มเข้าไปที่ตำแหน่งต่างๆของ Fly wheel ซึ่งในส่วนการทดลองตอนนี้เราจะปรับพารามิเตอร์ของสมการ $m\omega^2 r \cos \omega t = Ma$ และดูว่าค่าที่หัววัดสามารถวัดได้ซึ่งก็คือ ค่า a จาก Ma เป็นอย่างไรสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีหรือไม่ และ ติดตั้งหัววัดแกนตั้งเปรียบเทียบกับการติดหัววัดแกนนอนซึ่งระบบสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแนวระนาบนี้ว่าจะวัดค่า a ได้แตกต่างกันอย่างไร จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวคือ

m มวลที่ใส่เพื่อทำให้ไม่สมดุล (เปรียบได้กับตุ้มน้ำหนัก)

r รัศมีโดยวัดจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึงจุดศูนย์กลางมวล

โดยที่ตัวแปร ω ไม่ได้ทำการควบคุม

จากการที่มอเตอร์สั่นสะเทือนอย่างอิสระในแนวแกนนอนจากแท่นทดสอบการทดลองที่ใช้ เราติดตั้ง Photo switch เพื่อตรวจจับที่มวลหมุนมาตรงกันกับหัววัดอัตราเร่งอันเป็นจังหวะที่เราจะวัดค่า a

เพื่อจะนำไปเปรียบเทียบค่าจากทางทฤษฎี ซึ่งสามารถแบ่งได้ทั้งหมด 4 หัวข้อดังนี้

1. ปรับเปลี่ยนค่าทั้ง มวล m และ รัศมี r
2. ให้รัศมี r คงที่ปรับค่า มวล m
3. ให้มวล m คงที่ปรับค่ารัศมี r
4. ติดหัววัดแกนตั้ง (นำอัตราเร่งที่ได้เปรียบเทียบกับหัวข้อ1 ปรับทั้ง มวล และ

รัศมี) ทำการทดลองดังนี้

3.3.1 ปรับเปลี่ยนค่าทั้ง มวล m และ รัศมี r

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์ 1 แรงม้า
2. Oscilloscope
3. Photo switch
4. Fly wheel และ น็อต
5. แท่นทดสอบ
6. หัววัดอัตราเร่ง และ ตัวแปรแรงสัญญาณทางกลเป็นไฟฟ้า

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักมวลของมอเตอร์และ Fly wheel
2. ทำการชั่งน้ำหนักน็อตที่จะใส่เพิ่มเข้าไปใน Fly wheel
3. ทำการใส่น็อตเพิ่มเข้าไปใน Fly wheel โดยติดตามลำดับตั้งรูปและวัดรัศมี

จากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึงจุดศูนย์กลางมวล

4. ต่อวงจรมอเตอร์ 3 เฟส โดยติดตั้ง Photo switch เพื่อดูตำแหน่งที่มวลหมุน มาตรงกันกับแนวการวัดของหัววัดอัตราเร็ว

5. Oscilloscope ใช้วัด

Ch1: สัญญาณจากหัววัดอัตราเร็ว

Ch2: สัญญาณจาก Photo switch

Ch3: แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์

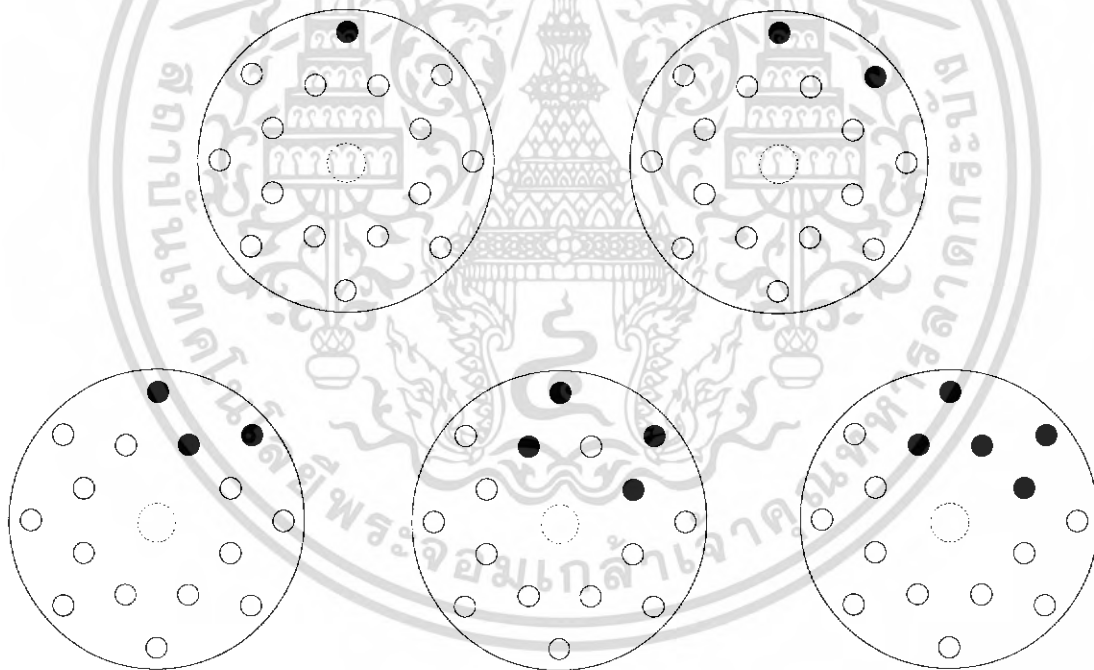
Ch4: กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์

6. บันทึกค่าจาก Oscilloscope ที่ 10 ms โดยบันทึกค่า จำนวน 10020 จุด (ซึ่งสามารถเลือกได้จาก Oscilloscope) เป็น ASCII ไฟล์ และ บันทึกรูปสัญญาณที่ได้

7. ทำการเพิ่มมวลโดยการใส่เม็ดที่ละครั้งจนเป็นจำนวน 2 3 4 5 ตัว และ ทดลองซ้ำตามข้อ 3-7

8. อ่านค่า ASCII ไฟล์ที่ได้จาก Oscilloscope เพื่อหาค่า อัตราเร็ว ณ ตำแหน่ง นั้น

9. นำมาคำนวณเปรียบเทียบทางทฤษฎีและการทดลอง



รูปที่ 3.6 แสดงลำดับการติดเม็ดที่ Fly wheel จาก 1 – 5 ตัวเมื่อปรับเปลี่ยนค่าทั้ง มวล m และ รัศมี r

3.3.2 ให้รัศมี r คงที่ปรับค่า มวล m

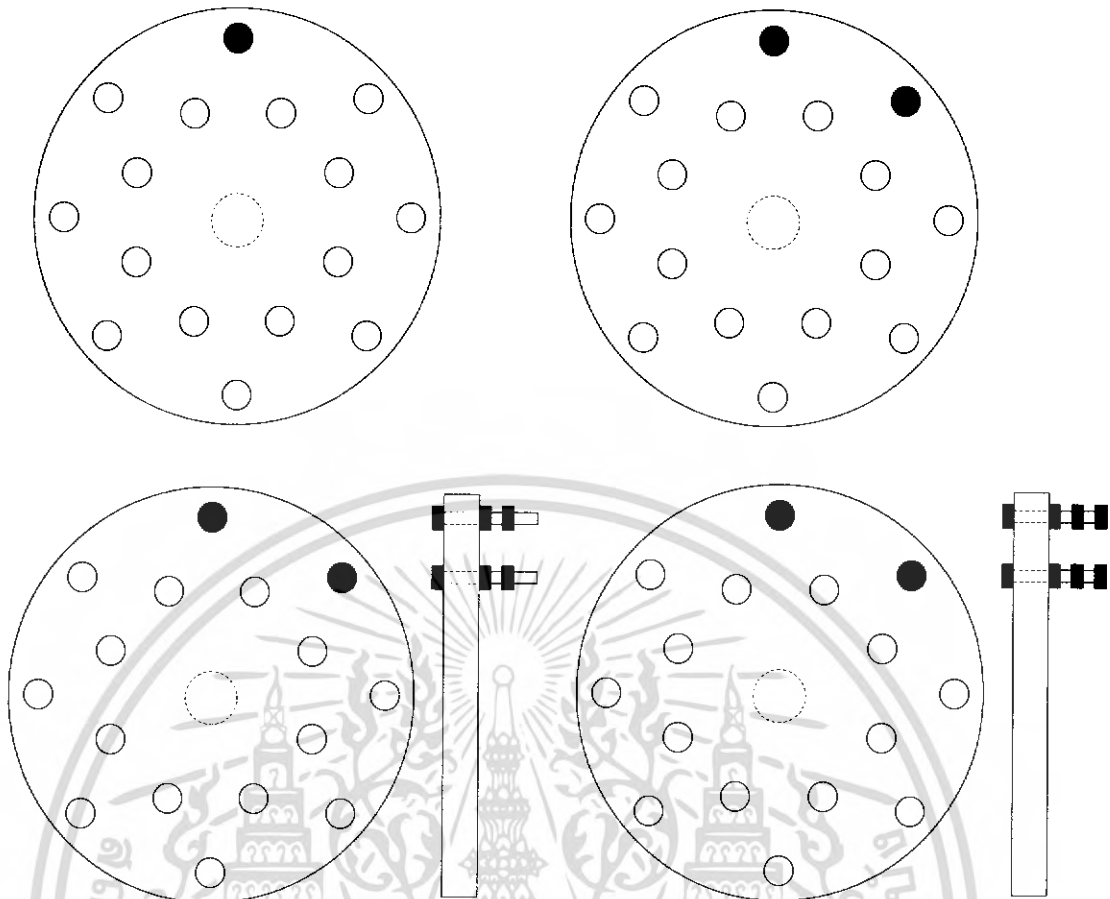
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ยังคงใช้อุปกรณ์การวัดเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1.1

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักมวลของมอเตอร์และFly wheel
2. ทำการชั่งน้ำหนักน็อตที่จะใส่เพิ่มเข้าไปในFly wheel
3. ทำการใส่น็อตเพิ่มเข้าไปในFly wheel ซึ่งการทดลองตอนนี้เราจะให้รัศมีคงที่ ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มจะค่อยๆเพิ่มเข้าไปทีละครั้ง วัดรัศมีจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึงจุดศูนย์กลางมวล
4. ต่อวงจรมอเตอร์ 3 เฟส โดยติดตั้ง Photo switch เพื่อดูตำแหน่งที่มวลหมุนมาตรงกันกับแนวการวัดของหัววัดอัตราเร็ว
5. Oscilloscope ใช้วัด
 - Ch1: สัญญาณจากหัววัดอัตราเร็ว
 - Ch2: สัญญาณจาก Photo switch
 - Ch3: แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์
 - Ch4: กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์
6. บันทึกค่าจาก Oscilloscope ที่ 10 ms โดยบันทึกค่า จำนวน 10020 จุด (ซึ่งสามารถเลือกได้ จาก Oscilloscope) เป็น ASCII ไฟล์ และ บันทึกรูปสัญญาณที่ได้
7. ทำการเพิ่มมวลโดยการใส่น็อตทีละครั้งจนเป็นจำนวน 2 3 4 5 ตัว และทดลองซ้ำตามข้อ3-7
8. อ่านค่า ASCII ไฟล์ที่ได้จาก Oscilloscope เพื่อหาค่า อัตราเร็ว ณ ตำแหน่ง
9. นำมาคำนวณเปรียบเทียบทางทฤษฎีและการทดลอง

นั้น



รูปที่ 3.7 แสดงลำดับการติดน็อตและแหวน ให้รัศมี r คงที่ปรับค่า มวล m

3.3.3 ให้มวล m คงที่ปรับค่ารัศมี r

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ยังคงใช้อุปกรณ์การวัดเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1.1

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักมวลของมอเตอร์และFly wheel
2. ทำการชั่งน้ำหนักน็อตที่จะใส่เพิ่มเข้าไปในFly wheel
3. ทำการใส่น็อตเพิ่มเข้าไปในFly wheel ซึ่งการทดลองตอนนี้เราจะให้มวลคงที่ ซึ่งจะทำการเปลี่ยนรัศมีโดยๆการเปลี่ยนตำแหน่งการวางมวลทีละครั้ง วัดรัศมีจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึงจุดศูนย์กลางมวล
4. ต่อวงจรมอเตอร์ 3 เฟส โดยติดตั้ง Photo switch เพื่อดูตำแหน่งที่มวลหมุนมาตรงกันกับแนวการวัดของหัววัดอัตราเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Oscilloscope ใช้วัด

Ch1: สัญญาณจากหัววัดอัตราเร่ง

Ch2: สัญญาณจาก Photo switch

Ch3: แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์

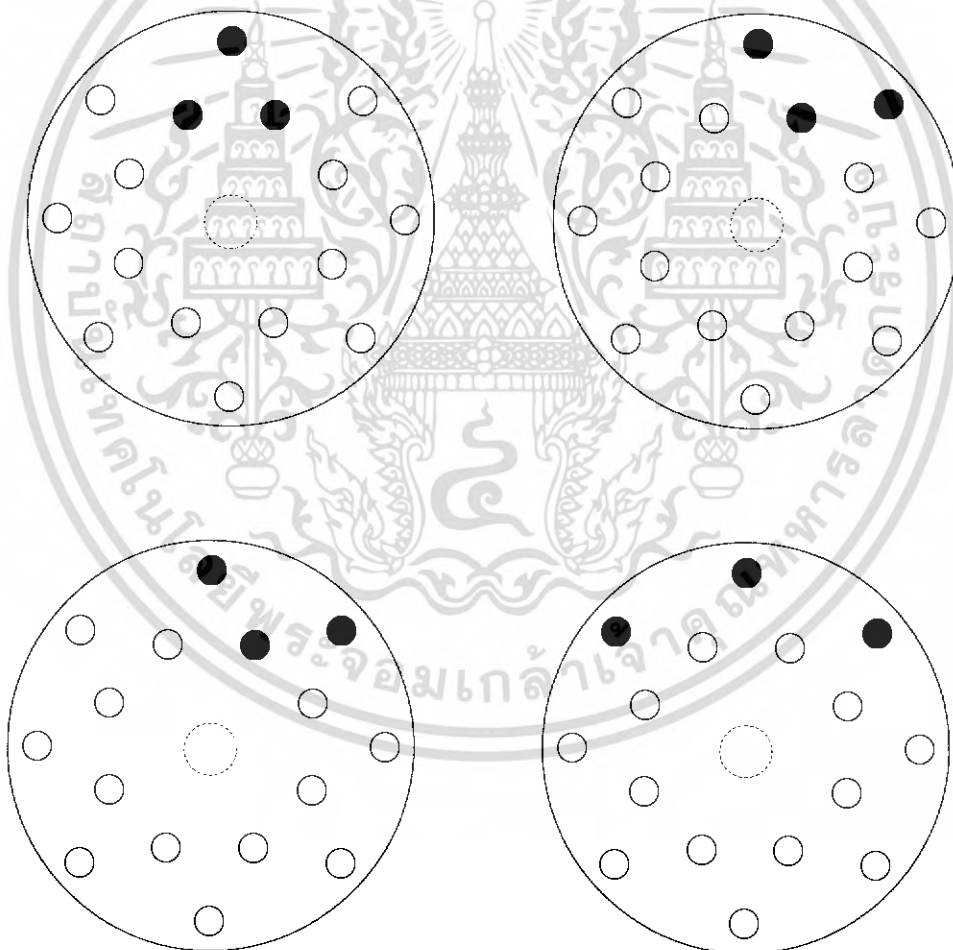
Ch4: กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์

6. บันทึกค่าจาก Oscilloscope ที่ 10 ms โดยบันทึกค่า จำนวน 10020 จุด (ซึ่งสามารถเลือกได้จาก Oscilloscope) เป็น ASCII ไฟล์ และ บันทึกรูปสัญญาณที่ได้

7. ทำการเพิ่มมวลโดยการใส่น้ำหนักทีละครั้งจนเป็นจำนวน 2 3 4 5 ตัว และทดลองซ้ำตามข้อ3-7

8. อ่านค่า ASCII ไฟล์ที่ได้จาก Oscilloscope เพื่อหาค่า อัตราเร่ง ณ ตำแหน่ง
นั้น

9. นำมาคำนวณเปรียบเทียบทางทฤษฎีและการทดลอง



รูปที่ 3.8 แสดงลำดับการติดน้ำหนักรวม m คงที่ปรับค่ารัศมี r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ติดหัววัดแกนตั้ง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ยังคงใช้อุปกรณ์การวัดเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1.1

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักมวลของมอเตอร์และFly wheel
2. ทำการชั่งน้ำหนักน็อตที่จะใส่เพิ่มเข้าไปในFly wheel
3. ทำการใส่น็อตเพิ่มเข้าไปในFly wheel ซึ่งการทดลองตอนนี้เราจะทำการเพิ่มมวลโดยใส่น็อตตำแหน่งเดียวกันกับ 3.1.1 วัดรัศมีจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึงจุดศูนย์กลางมวล
4. ต่อวงจรมอเตอร์ 3 เฟส โดยติดตั้ง Photo switch เพื่อดูตำแหน่งที่มวลหมุนมาตรงกันกับแนวการวัดของหัววัดอัตราเร็ว
5. Oscilloscope ใช้วัด
 - Ch1: สัญญาณจากหัววัดอัตราเร็ว
 - Ch2: สัญญาณจาก Photo switch
 - Ch3: แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์
 - Ch4: กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์
6. บันทึกค่าจาก Oscilloscope ที่ 10 ms โดยบันทึกค่า จำนวน 10020 จุด (ซึ่งสามารถเลือกได้จาก Oscilloscope) เป็น ASCII ไฟล์ และ บันทึกรูปสัญญาณที่ได้
7. ทำการเพิ่มมวลโดยการใส่น็อตทีละครั้งจนเป็นจำนวน 3 5 ตัว และ ทดลองซ้ำตามข้อ3-7
8. อ่านค่า ASCII ไฟล์ที่ได้จาก Oscilloscope เพื่อหาค่า อัตราเร็ว ณ ตำแหน่งนั้น
9. นำมาคำนวณเปรียบเทียบทางทฤษฎีและการทดลองและเปรียบเทียบกับการติดหัววัดแกนนอน



รูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งหัววัดอัตราเร็วแกนตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ทำให้ไม่สมดุลทางกลจากภายในตัวมอเตอร์

ลักษณะการทดลองยังคงออกแบบให้เหมือนกับไม่สมดุลจากภายนอก เพียงแต่เราเพิ่มมวลเข้าไปที่ตัวโรเตอร์แทนตามรูปข้างต้น เนื่องจากลักษณะของโรเตอร์เราจึงทำการทดลองได้จำกัด

ซึ่งสามารถเพิ่มมวลได้ไม่กี่ค่าจากการใส่เนื้อ แบ่งเป็น 2 หัวข้อคือ

1. ใส่เนื้อ 1 และ 2 ตัวตามลำดับภายในโรเตอร์
2. ทำการติดมวลเพิ่มที่ศรีบระบายความร้อน

3.4.1 ใส่เนื้อ 1 และ 2 ตัวตามลำดับภายในโรเตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์ 1 แรงม้า
2. Oscilloscope
3. Photo switch
4. มู่เล่
5. แท่นทดสอบ
6. หัววัดอัตราเร่ง และ ตัวแปรสัญญาณทางกลเป็นไฟฟ้า
7. เนื้อขนาดยาว

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักมวลของมอเตอร์และมู่เล่
2. ทำการชั่งน้ำหนักเนื้อที่จะใส่เพิ่มเข้าไปในโรเตอร์
3. ทำการใส่เนื้อเพิ่มเข้าไปในโรเตอร์ วัดระยะจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึงจุดศูนย์กลางมวล
4. ต่อวงจรมอเตอร์ 3 เฟส โดยติดตั้ง Photo switch เพื่อดูตำแหน่งที่มวลหมุนมาตรงกันกับแนวการวัดของหัววัดอัตราเร่งซึ่งตำแหน่งที่ Photo switch วัดต้องตรงกันกับมวล
5. Oscilloscope ใช้วัด
 - Ch1: สัญญาณจากหัววัดอัตราเร่ง
 - Ch2: สัญญาณจาก Photo switch
 - Ch3: แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์
 - Ch4: กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์
6. บันทึกค่าจาก Oscilloscope ที่ 10 ms โดยบันทึกค่า จำนวน 10020 จุด (ซึ่งสามารถเลือกได้จาก Oscilloscope) เป็น ASCII ไฟล์ และ บันทึกรูปสัญญาณที่ได้
7. ทำการเพิ่มมวลโดยการใส่เนื้อเพิ่มอีกตัว ทดลองซ้ำตามข้อ3-7

8.อ่านค่า ASCII ไฟล์ที่ได้จาก Oscilloscope เพื่อหาค่า อัตราเร่ง ณ ตำแหน่ง
นั้น

9.นำมาคำนวณเปรียบเทียบทางทฤษฎีและการทดลองและเปรียบเทียบกับ
การติดหัววัดแกนนอน

3.4.2 ทำการคิดมวลเพิ่มที่ครีบรรยายความร้อน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1.มอเตอร์ 1 แรงม้า
- 2.Oscilloscope
- 3.Photo switch
- 4.มู่เล่
- 5.แท่นทดสอบ
- 6.หัววัดอัตราเร่ง และ ตัวแปรสัญญาณทางกลเป็นไฟฟ้า
- 7.น็อตขนาดยาว

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักมวลของมอเตอร์และมู่เล่
2. ทำการชั่งน้ำหนักแผ่นเหล็กที่จะใส่เพิ่มเข้าไปที่ครีบรรยายความร้อนของโร
เตอร์
3. ทำการใส่แผ่นเหล็กเพิ่มเข้าไปในโรเตอร์ วัดรัศมีจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์
ถึงจุดศูนย์กลางมวล
4. ต่อวงจรมอเตอร์ 3 เฟส โดยติดตั้ง Photo switch เพื่อดูตำแหน่งที่มวลหมุน
มาตรงกันกับแนวการวัดของหัววัดอัตราเร่งซึ่งตำแหน่งที่ Photo switch วัดต้องตรงกันกับมวล
5. Oscilloscope ใช้วัด
Ch1: สัญญาณจากหัววัดอัตราเร่ง
Ch2: สัญญาณจาก Photo switch
Ch3: แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์
Ch4: กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์
- 6.บันทึกค่าจาก Oscilloscope ที่ 10 ms โดยบันทึกค่า จำนวน 10020 จุด (ซึ่ง
สามารถเลือกได้จาก Oscilloscope) เป็น ASCII ไฟล์ และ บันทึกรูปสัญญาณที่ได้
- 7.อ่านค่า ASCII ไฟล์ที่ได้จาก Oscilloscope เพื่อหาค่า อัตราเร่ง ณ ตำแหน่ง
นั้น
- 8.นำมาคำนวณเปรียบเทียบทางทฤษฎีและการทดลองและเปรียบเทียบกับ
การติดหัววัดแกนนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วิธีทดลองการที่มอเตอร์ได้รับไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล

จำลองเหตุการณ์ที่มอเตอร์ได้รับไฟฟ้าสามเฟสแบบไม่สมดุลโดยใช้ Auto Transformer 3 ตัวเป็นแหล่งจ่ายแต่ละเฟสโดยทำการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ที่แต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากันซึ่งได้ทำการออกแบบการทดลองดังนี้

3.5.1 การทดลองเปลี่ยนค่าแรงดันเฟส a เพิ่มและลด โดยให้เฟส b,c คงที่

1. ต่อวงจรป้อนไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยต่อผ่าน Variac เพื่อสามารถปรับขนาดแรงดันได้ตามต้องการ
2. ทำการต่อสายสัญญาณเข้ากับ Oscilloscope
3. ทำการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยในขั้นแรกนี้ จะป้อนทั้ง 3 เฟส 220V ซึ่งเป็นการจ่ายไฟแบบสมดุลแรงดัน บันทึกผลและรูปสัญญาณจาก Scope โดย จะบันทึกค่าของ สัญญาณจากหัววัดอัตราเร่ง กระแส 3 เฟส และ จะบันทึกค่าของ สัญญาณจากแรงดันทั้ง 3 เฟส เพื่อใช้แสดงค่า phase shift ของ แรงดันกับกระแสเฟส a บันทึกรูปสัญญาณ และ ASCII ไฟล์
4. รักษาระดับแรงดันของ เฟส b c ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของ เฟส a ให้มีขนาด -10%, -20% ของแรงดันที่พิกัด คือ 198, 176 V ซึ่งแต่ละค่าเราจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3
5. รักษาระดับแรงดันของ เฟส b c ให้คงที่ที่ 220 V แล้วทำการปรับขนาดแรงดันของ เฟส a ให้มีขนาด +10%, +20% ของแรงดันที่พิกัด คือ 242, 264 V ซึ่งแต่ละค่าเราจะทำการบันทึกผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 4 และ 5 แต่เปลี่ยนให้ เฟส a, c คงที่ ปรับเฟส b แทน
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 4 และ 5 แต่เปลี่ยนให้ เฟส a, b คงที่ ปรับเฟส c แทน
8. นำรูปสัญญาณและข้อมูลที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์แบบสเปกตรัม

3.6 วิธีการทดลองแบร็งชาร์ต

1. นำโรเตอร์ของมอเตอร์มาเปลี่ยนแบร็งจากตัวที่ไม่ชาร์ตให้เป็นตัวที่ชาร์ต โดยแบ่งเป็น 3 กรณีคือ

1.1 เปลี่ยนเฉพาะแบร็งตัวใหญ่ก่อน โดยตัวเล็กยังไม่เปลี่ยน (เป็นตัวที่มีสภาพอยู่)

1.2 เปลี่ยนเฉพาะแบร็งตัวเล็กก่อน โดยตัวใหญ่ยังไม่เปลี่ยน (เป็นตัวที่มีสภาพดีอยู่)

1.3 เปลี่ยนแบร็งเป็นตัวชาร์ตทั้งตัวเล็กและตัวใหญ่

2. ทำการติดตั้งมอเตอร์เข้ากับแท่นทดสอบการสั้นสะพานและต่ออุปกรณ์การวัดสัญญาณการสั้นสะพาน

3. จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้กับมอเตอร์ที่พิกัด (220V)

4. บันทึกรูปคลื่นการสั้นสะพาน , สัญญาณจากPhotoswitch, แรงดัน, กระแส

5. นำรูปคลื่นที่ได้ไปวิเคราะห์ผล



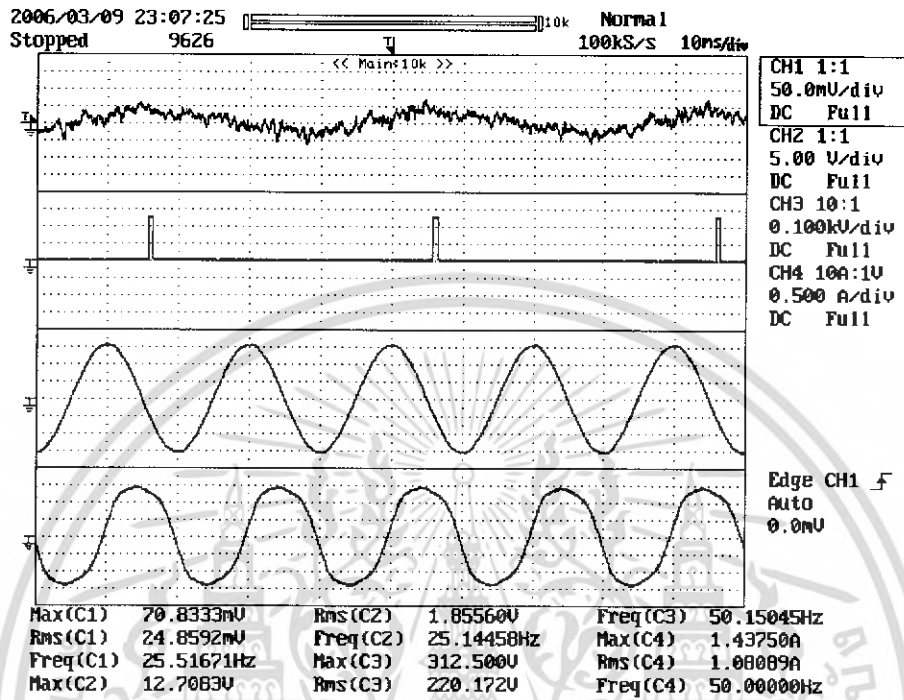
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

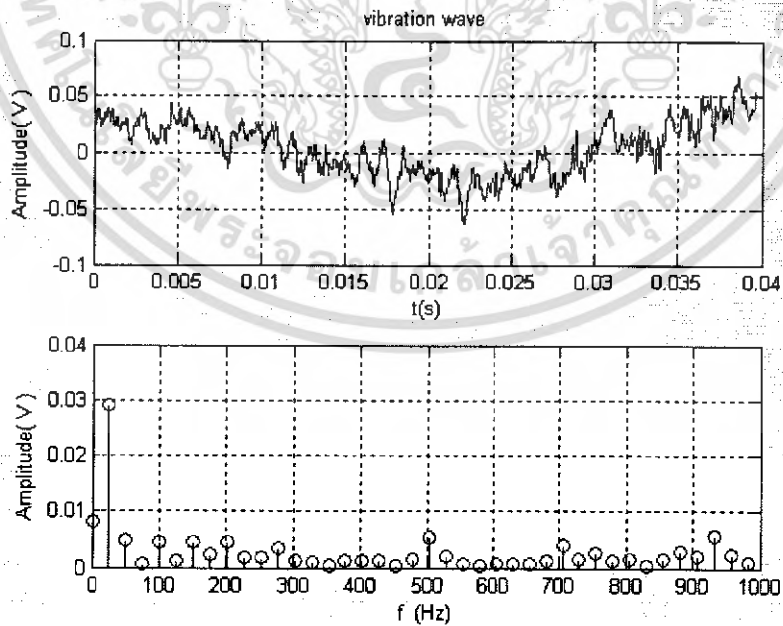
ผลการทดลอง

4.1 Unbalance Mechanic

4.1.1 กรณีใส่ภาระจากภายนอก (Fly wheel)

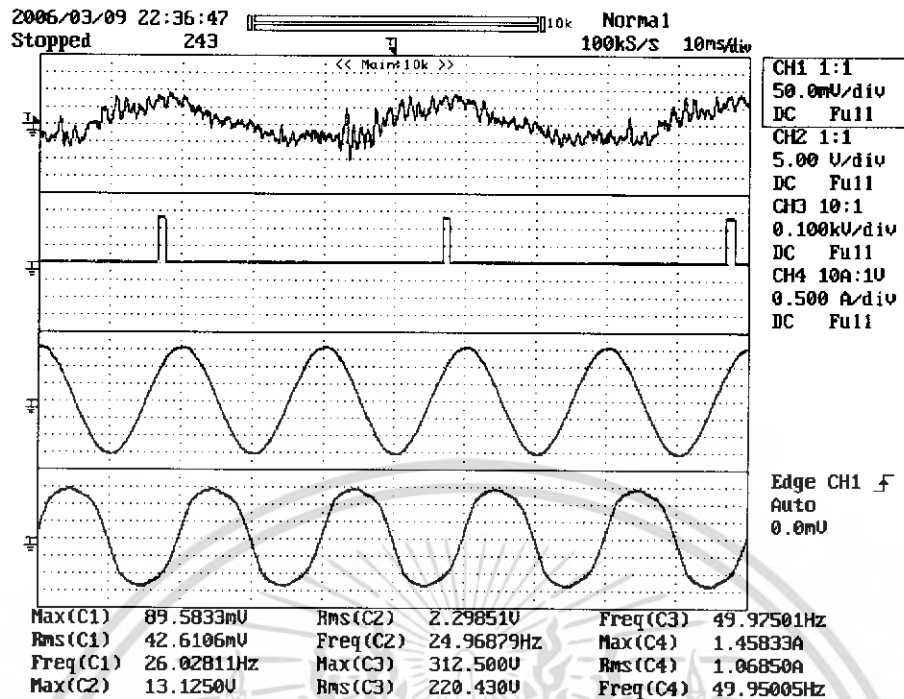


รูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 1 ตัว

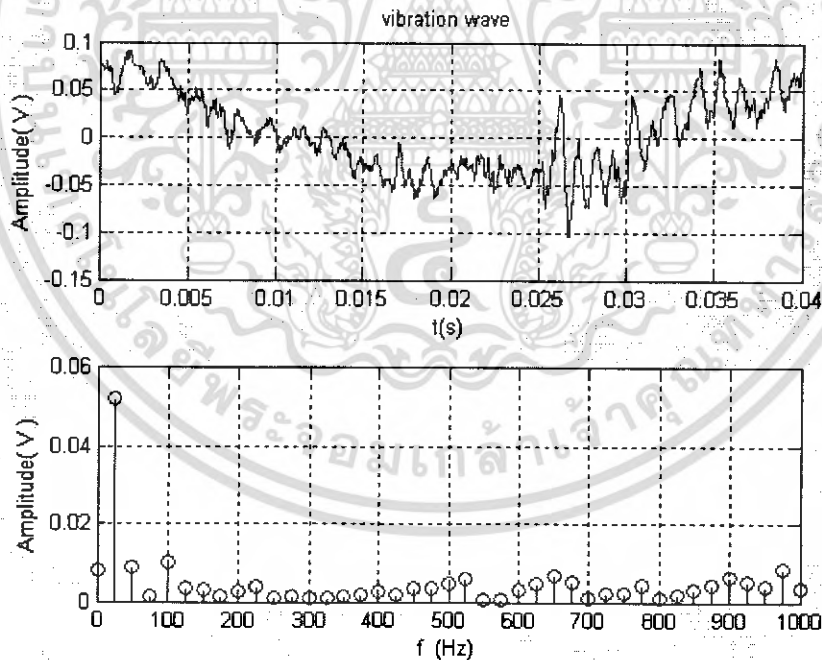


รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

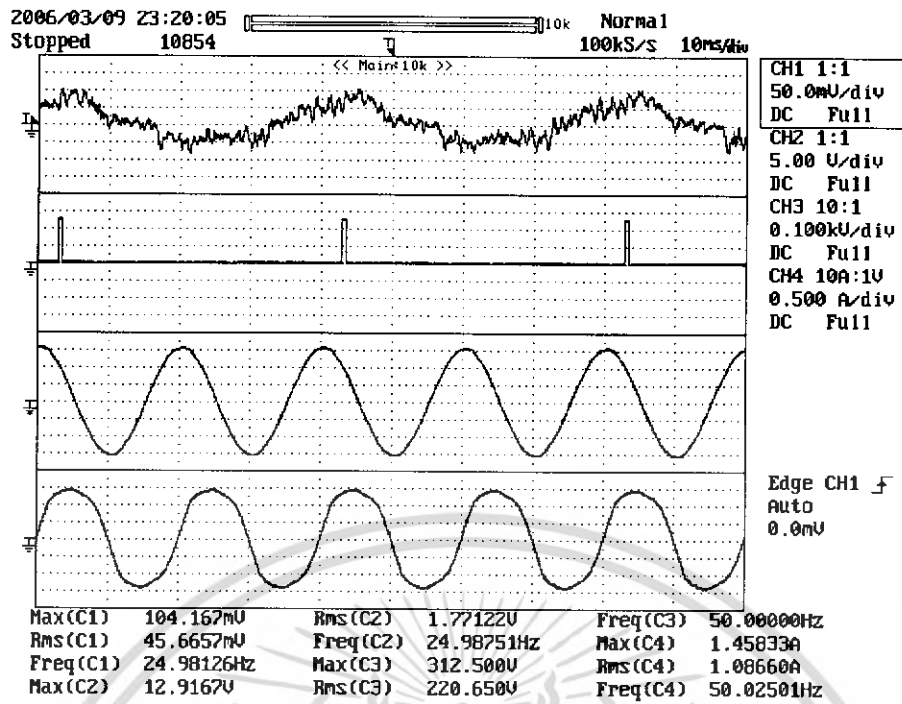


รูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อต 2 ตัว

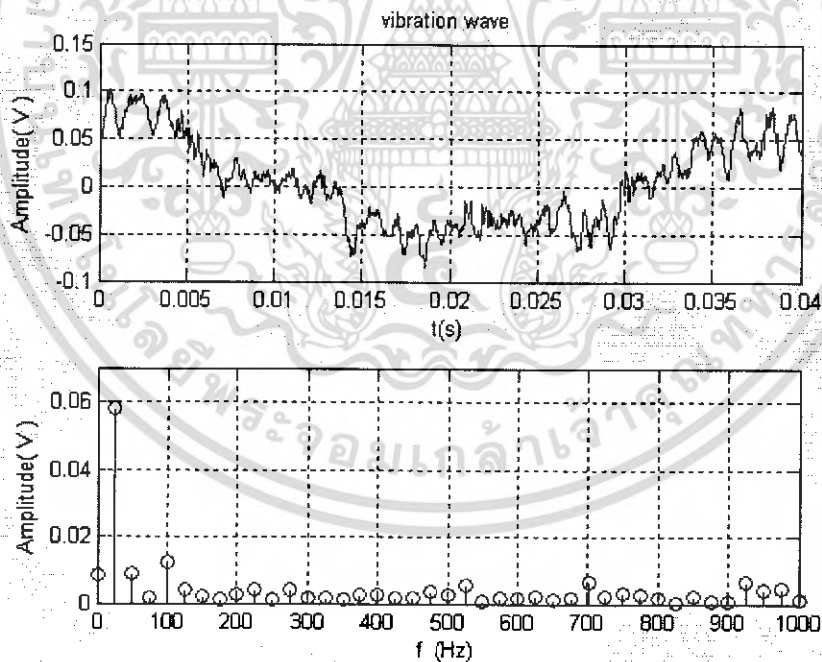


รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อต 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

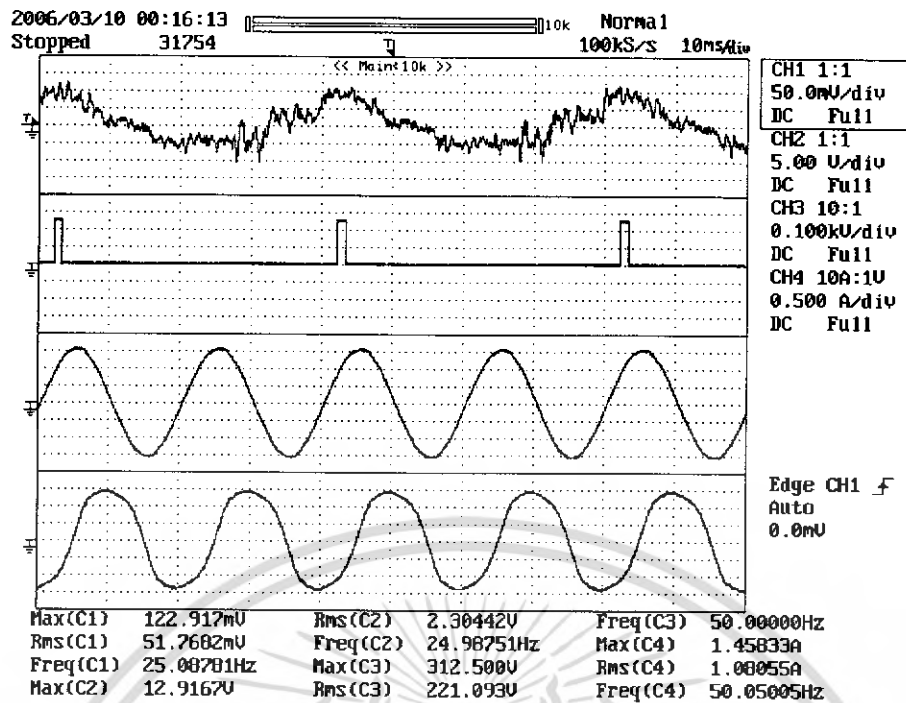


รูปที่ 4.5 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 3 ตัว

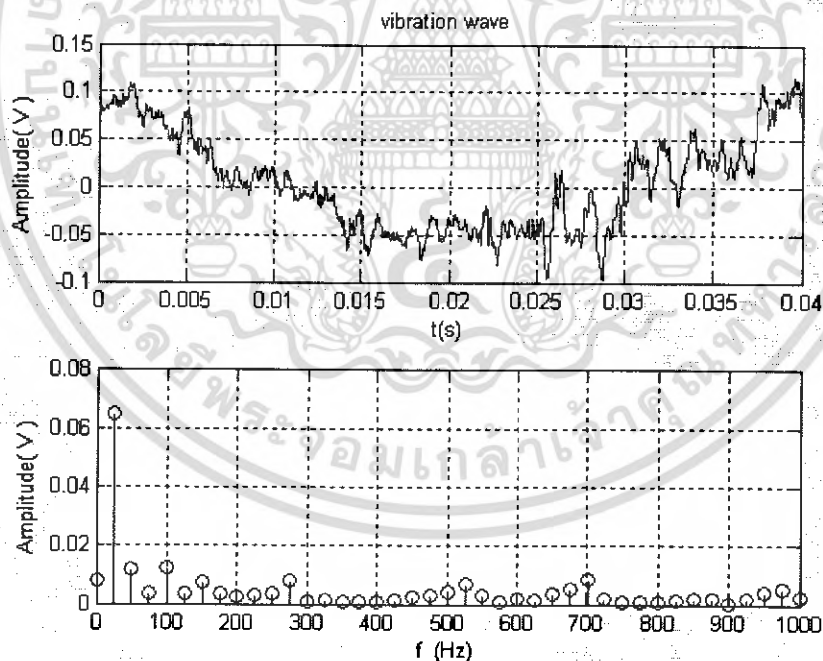


รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

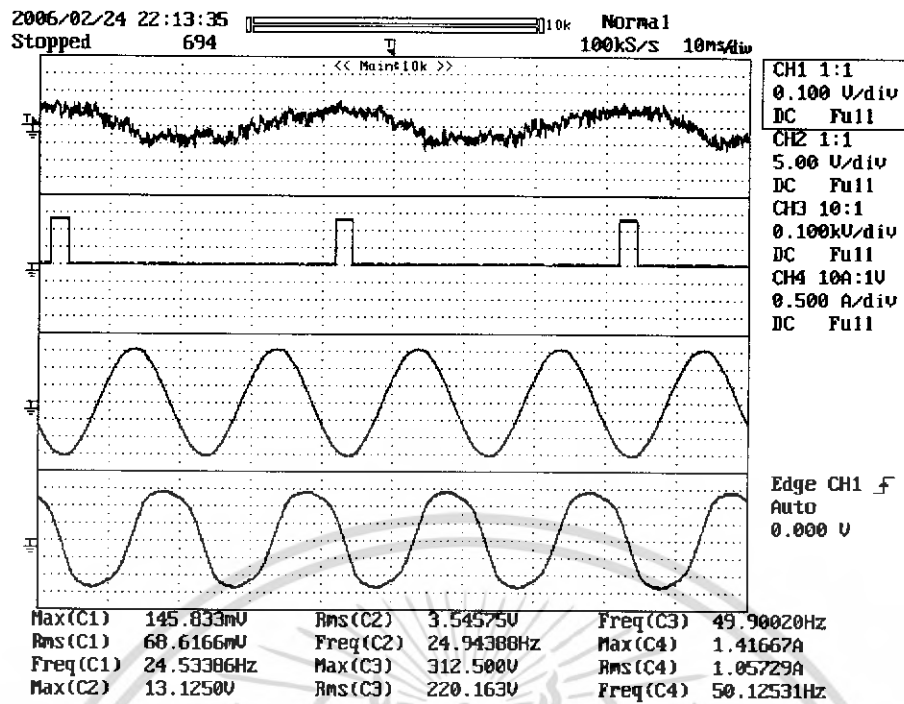


รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 4 ตัว

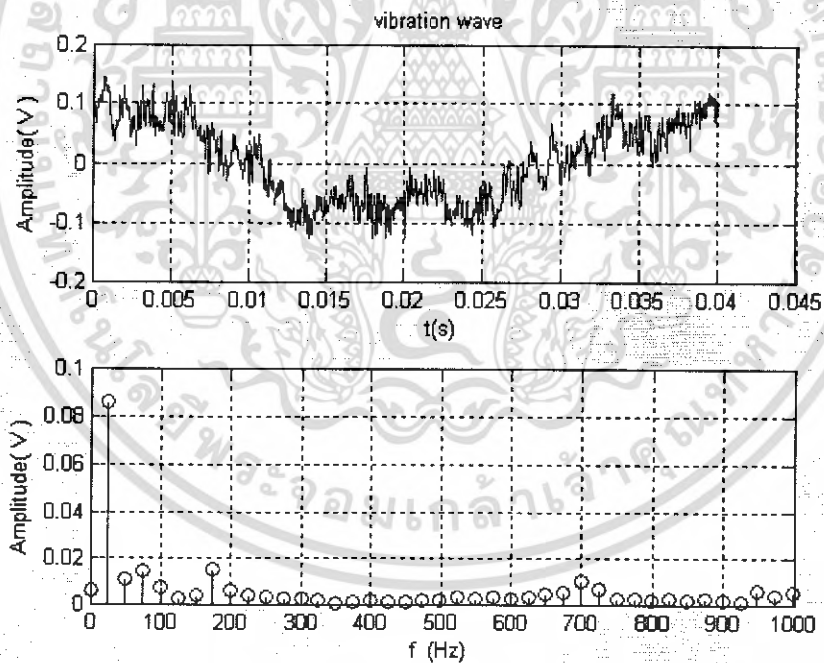


รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 5 ตัว



รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี นี้อด 5 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองใส่ล้อที่ Fly wheel เมื่อทำการเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี
คำนวณค่า F ทางทฤษฎี

จำนวนล้อ	มวลถ่วง	รัศมี	N_r (rpm)	ω (rad/s)	Fทฤษฎี (N)
1 ตัว	27 กรัม	7.8 cm	1499	156.98	51.89
2 ตัว	53.9 กรัม	7.8 cm	1498	156.87	103.46
3 ตัว	80.8 กรัม	6 cm	1498	156.87	119.3
4 ตัว	107.5 กรัม	5.5 cm	1498	156.87	145.3
5 ตัว	134.4 กรัม	5.5 cm	1497	156.77	181.66

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อทำการเปลี่ยนทั้งมวลและรัศมี

จำนวนล้อ	มวลรวม	a (mV)	a (m/s^2)	F จากหัววัด (N)
1 ตัว	11.277 Kg	43.8	4.3	47.8
2 ตัว	11.3039 Kg	81.3	7.976	90.16
3 ตัว	11.3308 Kg	100	9.81	111.15
4 ตัว	11.3575 Kg	113	11.0853	125.9
5 ตัว	11.3844 Kg	142	13.9302	158.6

*มวลถ่วง คือ มวลที่ใส่เข้าไป(ล้อ)ที่ทำให้มอเตอร์หมุนไม่สมดุล

*Fทางทฤษฎีมาจากสูตร $m\omega^2 r \cos\omega t$ ซึ่ง $\cos\omega t = 1$ เพราะวัดที่แกนนอน

*มวลรวม คือ มวลของมอเตอร์ รวม กับ Fly wheel และ ล้อที่ทำให้ไม่สมดุล
คือมวลทั้งหมดที่สั้นและหัววัดจับค่าได้

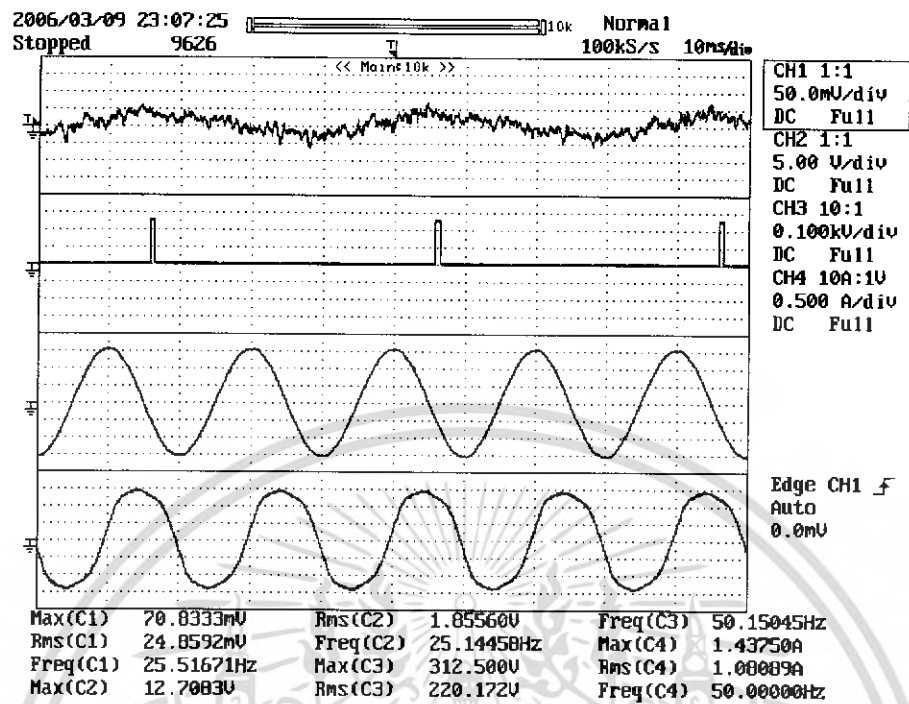
*a (mV) คือ อัตราเร่งที่วัดได้จากหัววัดซึ่งแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

*a (m/s^2) คือ อัตราเร่งที่แปลงค่าเป็นทางกลศาสตร์ ซึ่งหัววัดแปลงค่าได้
เท่ากับ 100mV/g โดย g คือ 9.81 (m/s^2)

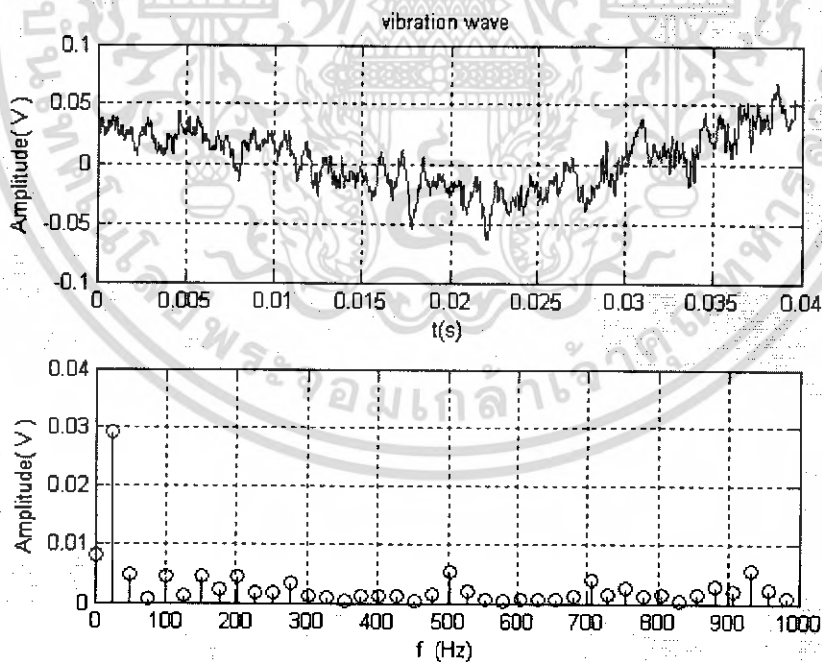
-มวลมอเตอร์ = 10 Kg

-มวลFly wheel = 1.25 Kg

4.1.2 ให้รีดิมคิงที่ทำการเพิ่มมวล

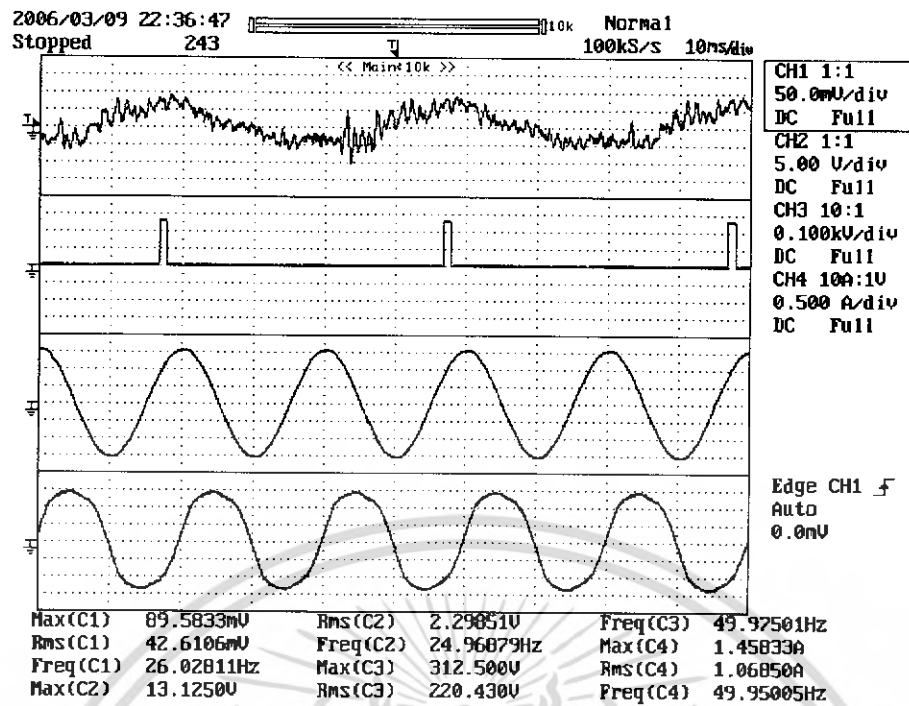


รูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้รีดิมคิงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 1 ตัว

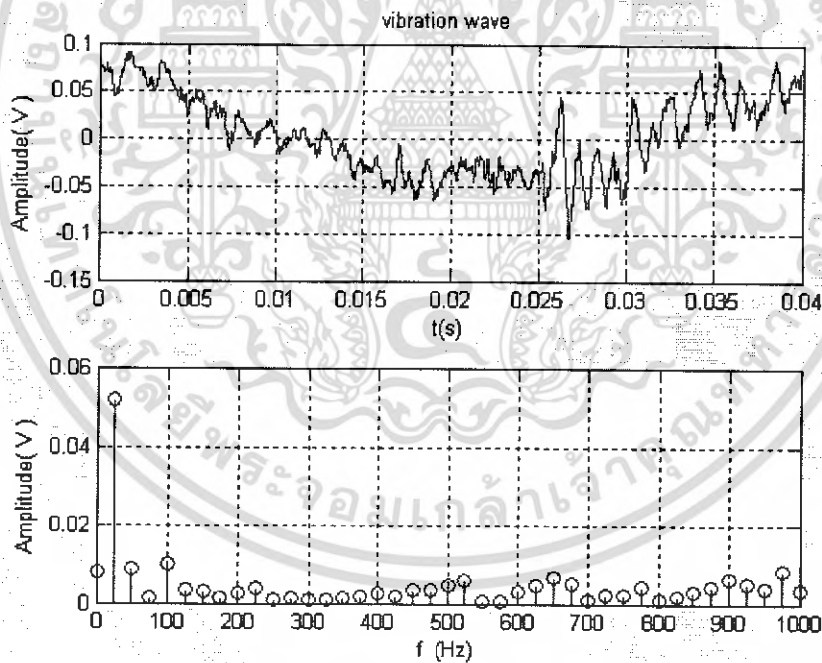


รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อรีดิมคิงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

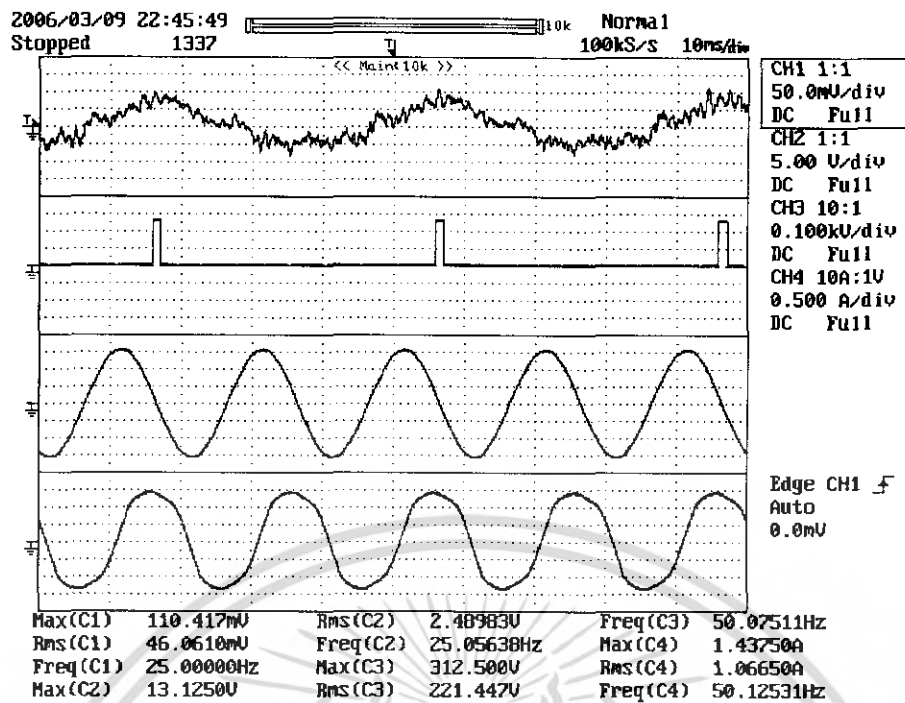


รูปที่ 4.13 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้รถมีดงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2 ตัว

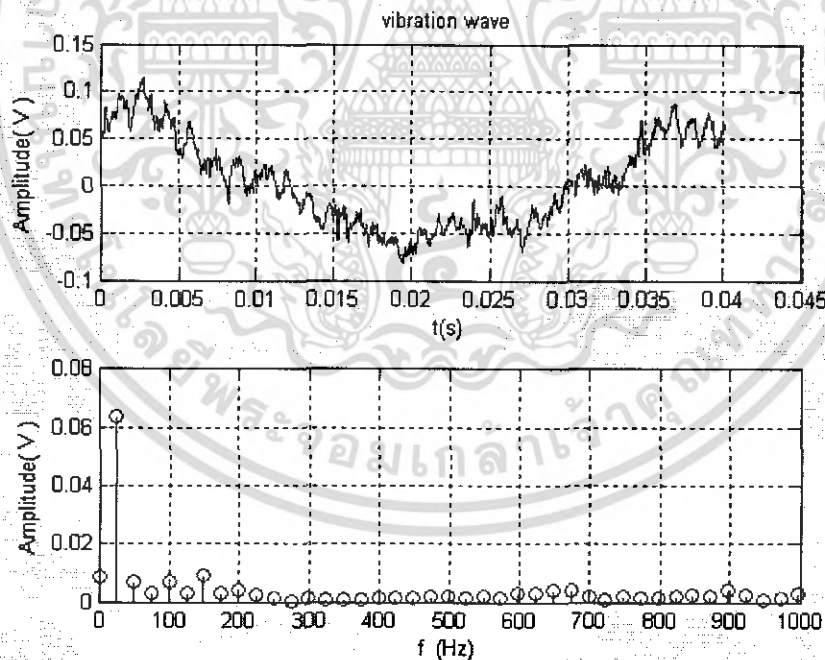


รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้รถมีดงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

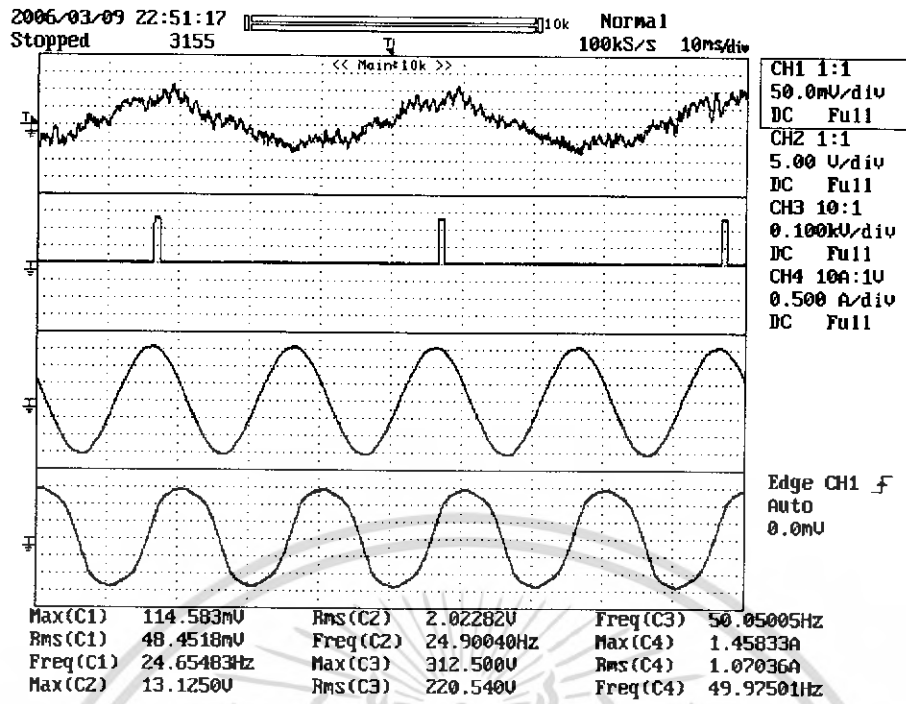


รูปที่ 4.15 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2
แหวนรวม 4 ตัว

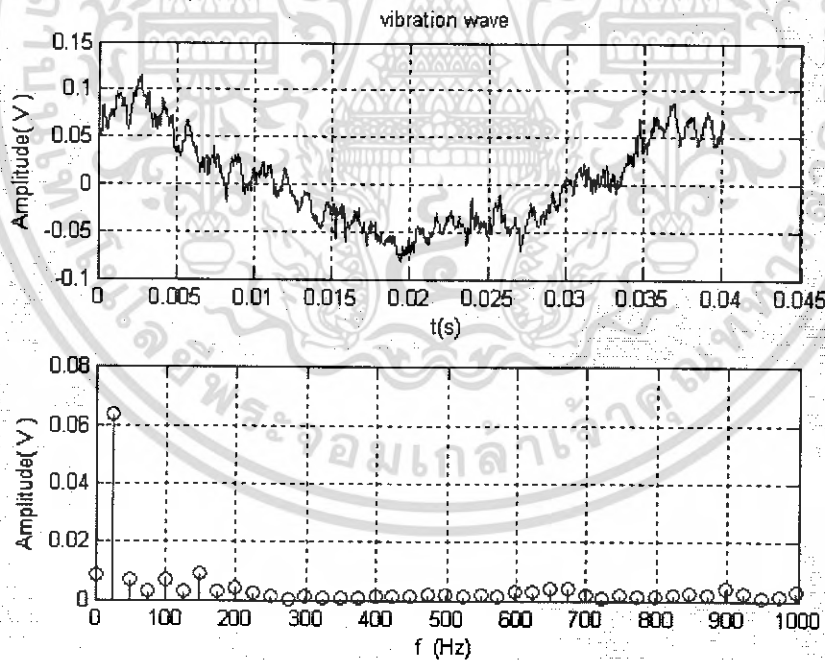


รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2
แหวนรวม 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2
แหวนรวม 6 ตัว



รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้รัศมีคงที่ทำการเพิ่มมวล นี้อด 2
แหวนรวม 6 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 บันทึกผลการทดลองใส่เนื้อที่ Fly wheel เมื่อทำการเพิ่มมวลระตมีคงที่คำนวณค่า F ทางทฤษฎี

จำนวนเนื้อ	มวลถ่วง	รัศมี	N_r (rpm)	ω (rad/s)	F ทฤษฎี (N)
1 ตัว	27 กรัม	7.8 cm	1499	156.98	51.89
2 ตัว	53.9 กรัม	7.8 cm	1498	156.87	103.46
3 ตัว	63.4 กรัม	7.8 cm	1498	156.87	121.69
4 ตัว	73.1 กรัม	7.8 cm	1498	156.87	140.31

ตารางที่ 4.4 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อทำการเพิ่มมวลระตมีคงที่

จำนวนเนื้อ	มวลรวม	a (mV)	a (m/s^2)	F จากหัววัด (N)
1 ตัว	11.277 Kg	43.8	4.3	47.8
2 ตัว	11.3039 Kg	81.3	7.976	90.15
3 ตัว	11.3134 Kg	95.8	9.4	106.346
4 ตัว	11.3231 Kg	115	11.3	127.95

*มวลถ่วง คือ มวลที่ใส่เข้าไป(เนื้อ)ที่ทำให้มอเตอร์หมุนไม่สมดุล

*Fทางทฤษฎีมาจากสูตร $m\omega^2 r \cos\omega t$ ซึ่ง $\cos\omega t = 1$ เพราะวัดที่แกนนอน

*มวลรวม คือ มวลของมอเตอร์ รวม กับ Fly wheel และ เนื้อที่ทำให้ไม่สมดุล คือมวลทั้งหมดที่สั้นและหัววัดจับค่าได้

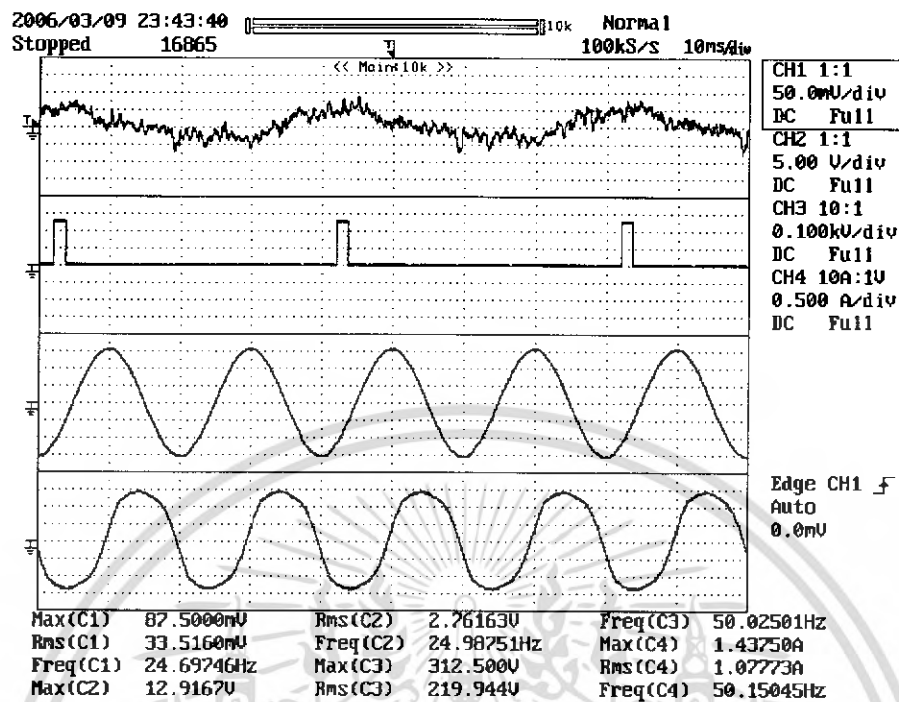
*a (mV) คือ อัตราเร่งที่วัดได้จากหัววัดซึ่งแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

*a (m/s^2) คือ อัตราเร่งที่แปลงค่าเป็นทางกลศาสตร์ ซึ่งหัววัดแปลงค่าได้เท่ากับ 100mV/g โดย g คือ 9.81 (m/s^2)

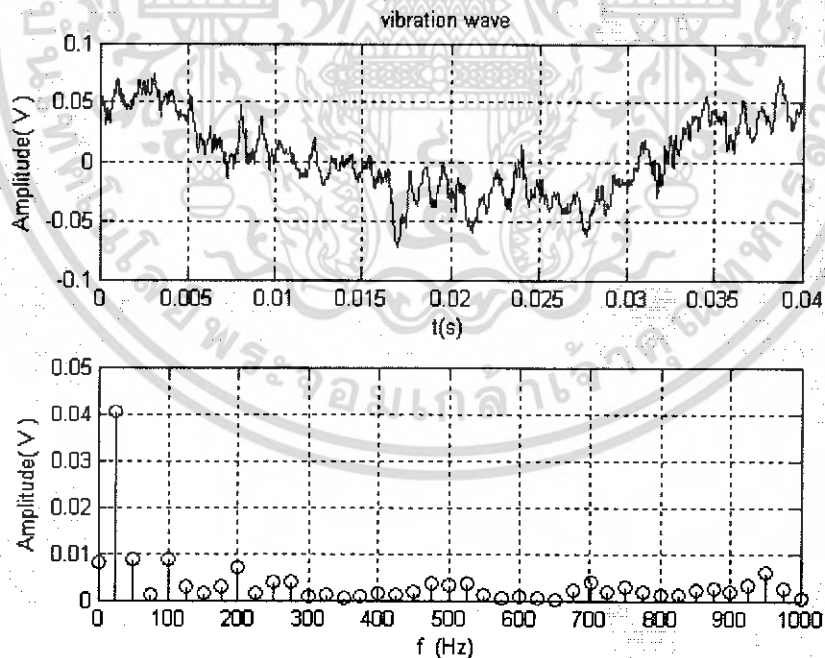
-มวลมอเตอร์ = 10 Kg

-มวลFly wheel = 1.25 Kg

4.1.3 เปลี่ยนรัศมีและให้มวลคงที่

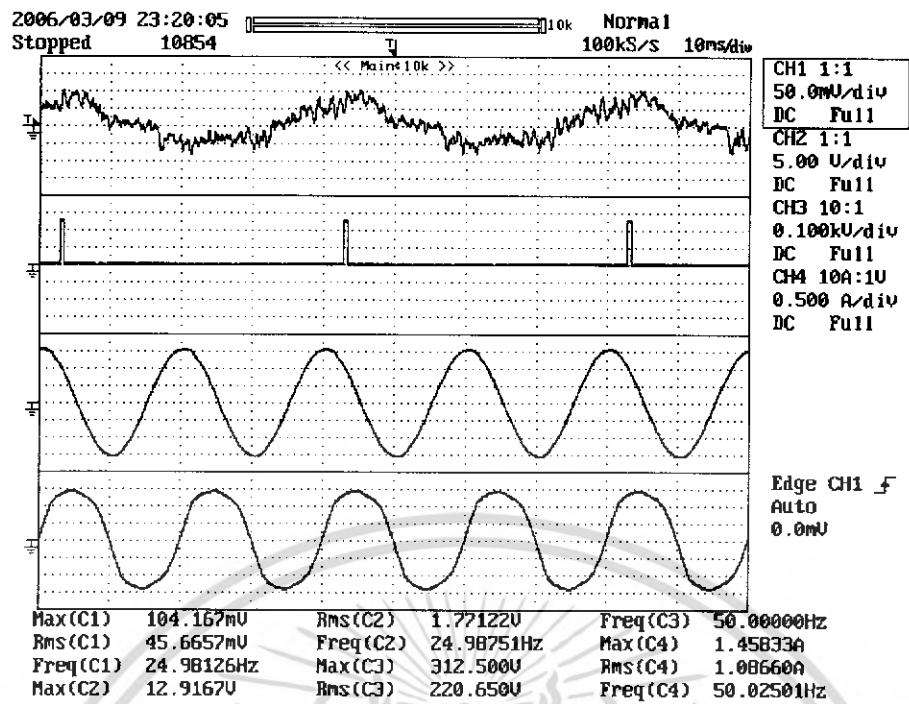


รูปที่ 4.19 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมี ที่รัศมี 5.2 cm

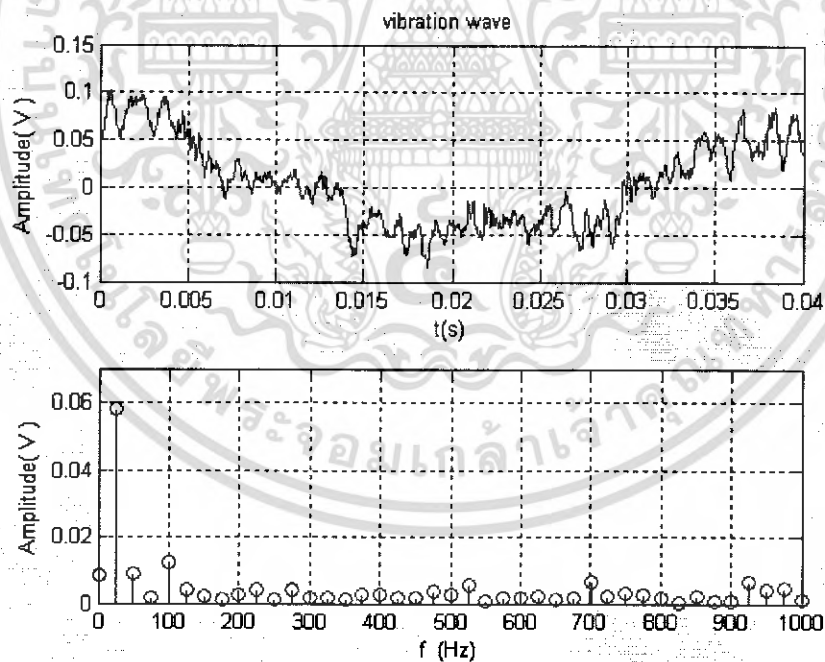


รูปที่ 4.20 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมีที่ รัศมี 5.2 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

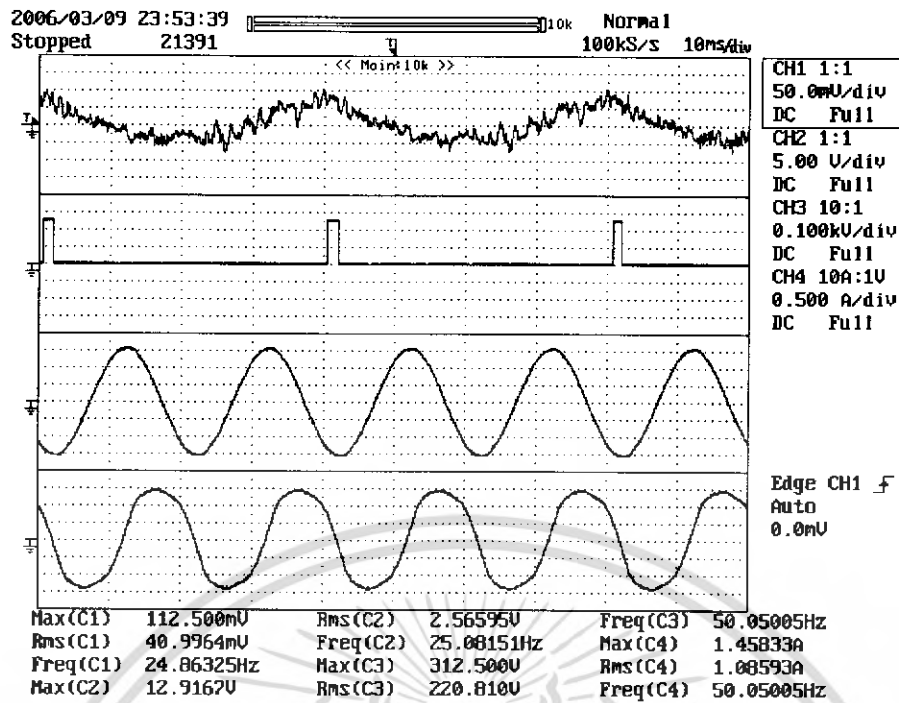


รูปที่ 4.21 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมี ที่รัศมี 6 cm

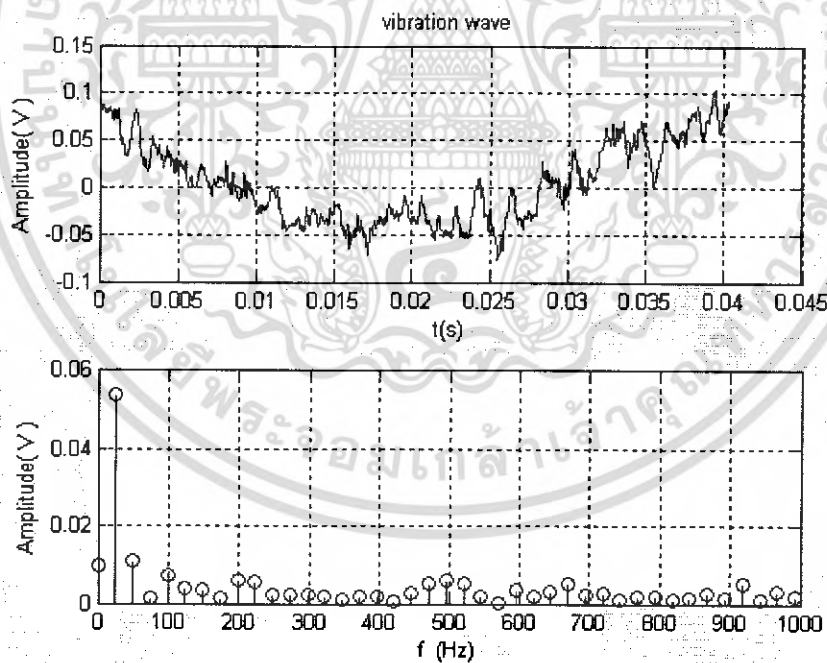


รูปที่ 4.22 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมีที่ รัศมี 6 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

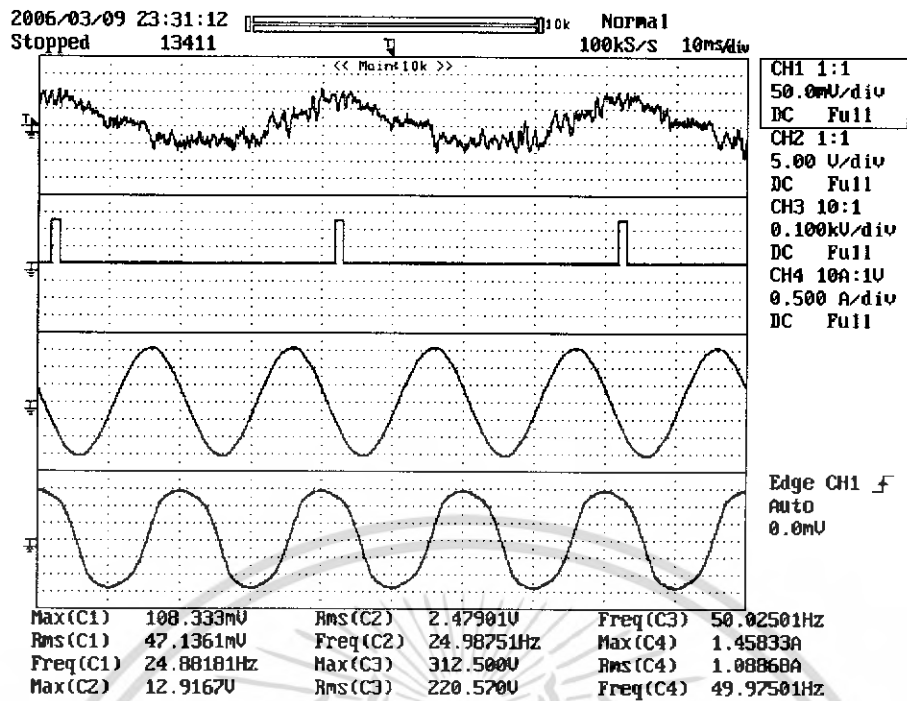


รูปที่ 4.23 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมี ที่รัศมี 7 cm

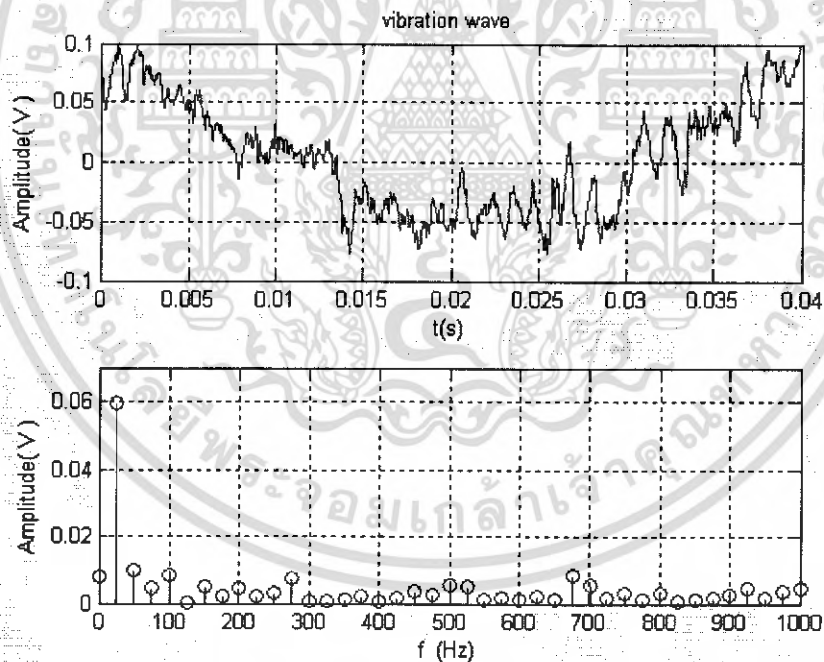


รูปที่ 4.24 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมีที่ รัศมี 7 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมี ที่รัศมี 7.5 cm



รูปที่ 4.26 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนเมื่อให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมีที่ รัศมี 7.5 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 บันทึกผลการทดลองใส่ล้อที่ Fly wheel เมื่อทำการเปลี่ยนรัศมีมวลคงที่คำนวณค่า F ทางทฤษฎี

มวลถ่วง	รัศมี	N_r (rpm)	ω (rad/s)	F ทฤษฎี (N)
80.8 กรัม	5.2 cm	1498	156.87	103.39
80.8 กรัม	6 cm	1498	156.87	119.3
80.8 กรัม	7 cm	1498	156.87	139.18
80.8 กรัม	7.5 cm	1498	156.87	149.12

ตารางที่ 4.6 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัด เมื่อทำการเปลี่ยนรัศมีมวลคงที่

รัศมี	มวลรวม	a (mV)	a (m/s ²)	F จากหัววัด (N)
5.2 cm	11.3308 Kg	79.2	7.77	88.04
6 cm	11.3308 Kg	85.4	8.3	94.04
7 cm	11.3308 Kg	91.7	9	101.97
7.5 cm	11.3308 Kg	108	10.2	115.57

*มวลถ่วง คือ มวลที่ใส่เข้าไป(ล้อ)ที่ทำให้มอเตอร์หมุนไม่สมดุล

*Fทางทฤษฎีมาจากสูตร $m\omega^2 r \cos \omega t$ ซึ่ง $\cos \omega t = 1$ เพราะวัดที่แกนนอน

*มวลรวม คือ มวลของมอเตอร์ รวม กับ Fly wheel และ ล้อที่ทำให้ไม่สมดุล คือมวลทั้งหมดที่สั้นและหัววัดจับค่าได้

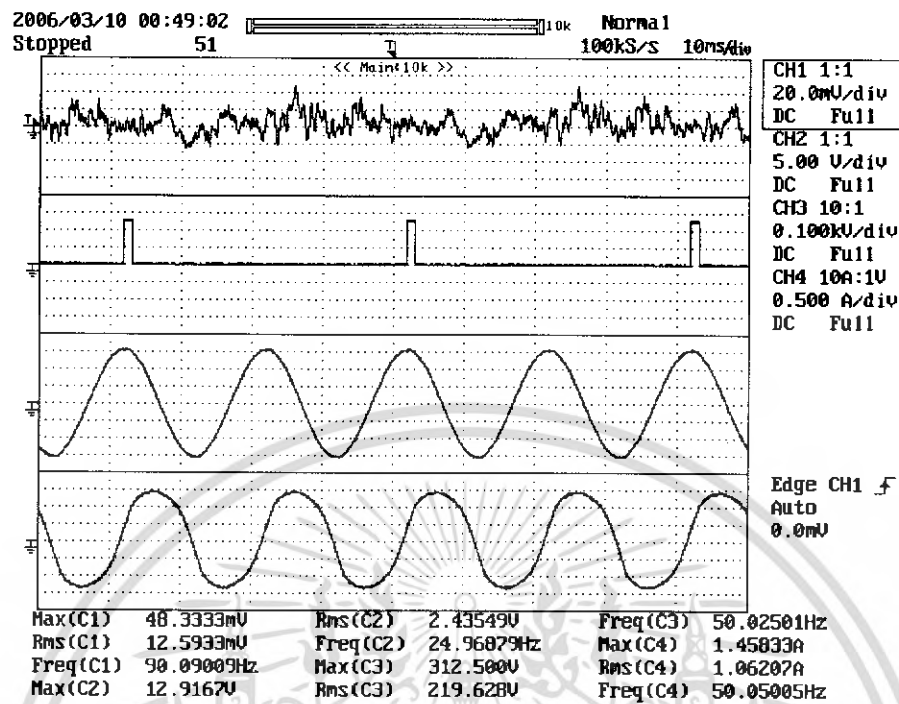
*a (mV) คือ อัตราเร่งที่วัดได้จากหัววัดซึ่งแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

*a (m/s²) คือ อัตราเร่งที่แปลงค่าเป็นทางกลศาสตร์ ซึ่งหัววัดแปลงค่าได้เท่ากับ 100mV/g โดย g คือ 9.81 (m/s²)

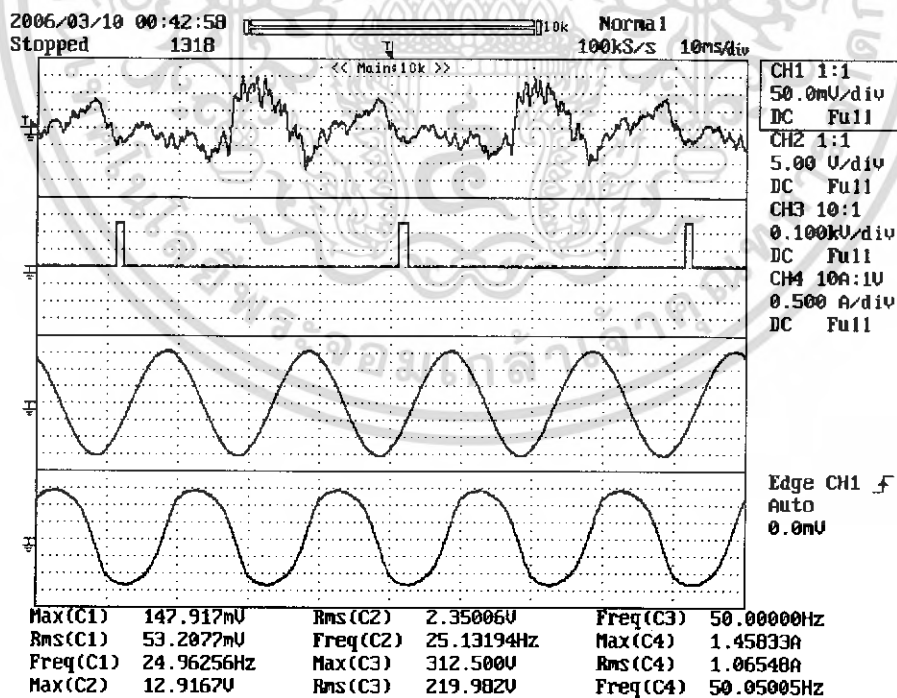
-มวลมอเตอร์ = 10 Kg

-มวลFly wheel = 1.25 Kg

4.1.4 ติดหัววัดแกนตั้ง

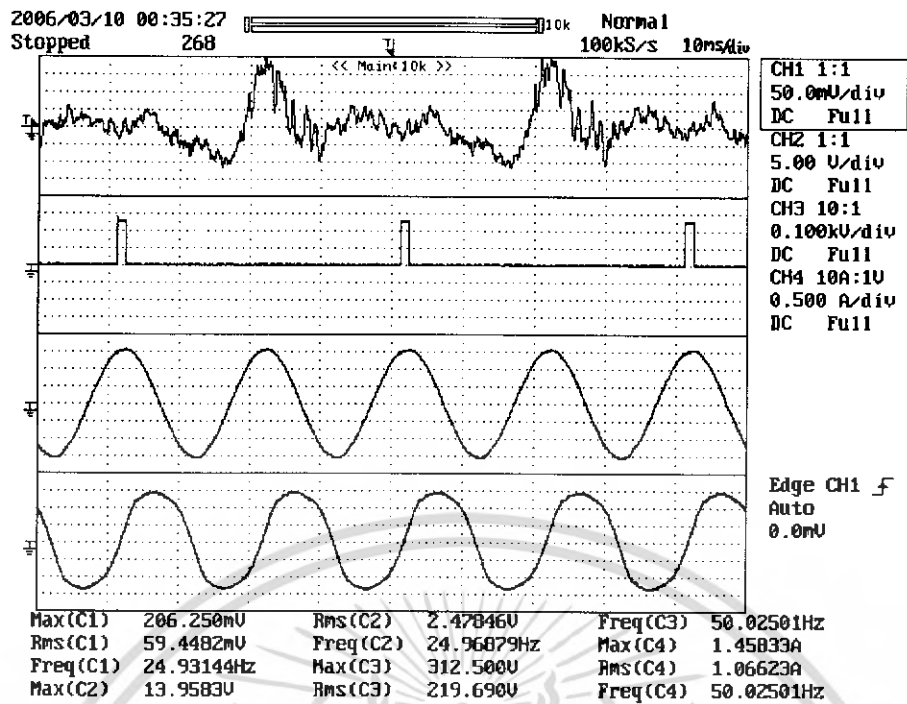


รูปที่ 4.27 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้ง นี้อด 1 ตัว



รูปที่ 4.28 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้ง นี้อด 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้ง นี้อด 5 ตัว

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลองใส่ นี้อด ที่ Fly wheel เมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้งค่า F ทางทฤษฎี

จำนวนนี้อด	มวลถ่วง	รัศมี	N_r (rpm)	ω (rad/s)	F ทฤษฎี (N)
1 ตัว	27 กรัม	7.8 cm	1499	156.98	51.89
3 ตัว	80.8 กรัม	6 cm	1498	156.87	119.13
5 ตัว	134.4 กรัม	5.5 cm	1497	156.66	181.66

*มวลถ่วง คือ มวลที่ใส่เข้าไป(นี้อด)ที่ทำให้มอเตอร์หมุนไม่สมดุล

*Fทางทฤษฎีมาจากสูตร $m\omega^2 r \sin \omega t$ ซึ่ง $\sin \omega t = 1$ เพราะวัดที่แกนตั้ง

ตารางที่ 4.8 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อติดตั้งหัววัดแกนตั้ง

จำนวนน็อต	มวลรวม	a (mV)	a (m/s ²)	F จากหัววัด (N)
1 ตัว	11.277 Kg	-0.833	-0.08171	-0.921
3 ตัว	11.3308 Kg	-4.79	-0.47	-5.31
5 ตัว	11.3844 Kg	-25	-2.45	-27.92

*มวลรวม คือ มวลของมอเตอร์ รวม กับ Fly wheel และ น็อตที่ทำให้ไม่สมดุล คือมวลทั้งหมดที่สั้นและหัววัดจับค่าได้

*a (mV) คือ อัตราเร่งที่วัดได้จากหัววัดซึ่งแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

*a (m/s²) คือ อัตราเร่งที่แปลงค่าเป็นทางกลศาสตร์ ซึ่งหัววัดแปลงค่าได้เท่ากับ 100mV/g โดย g คือ 9.81 (m/s²)

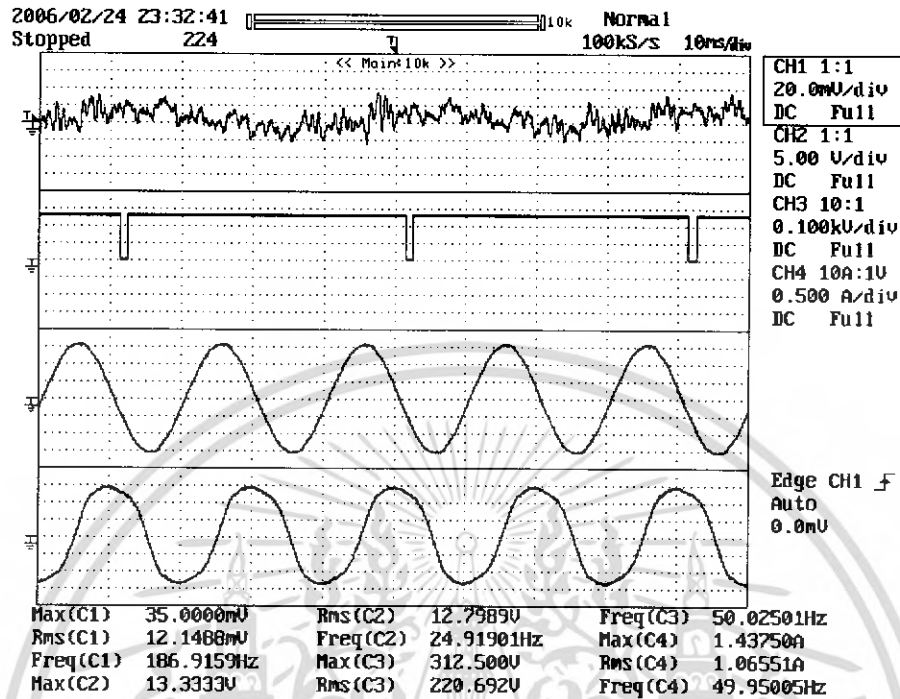
-มวลมอเตอร์ = 10 Kg

-มวลFly wheel = 1.25 Kg

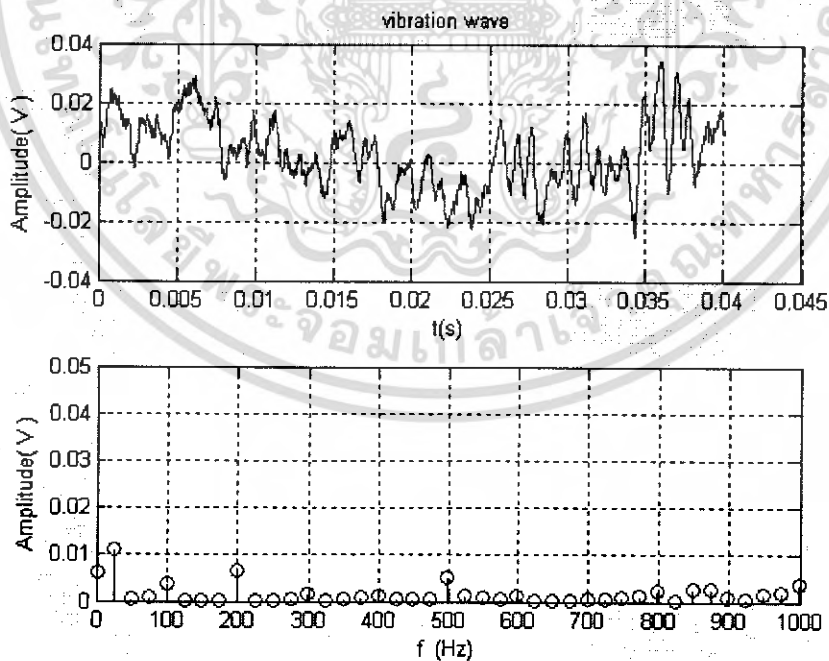
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กรณีความไม่สมดุลจากภายในมอเตอร์ (ใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์)

4.2.1 ใส่ล้อตเพิ่มเข้าที่ช่องของโรเตอร์

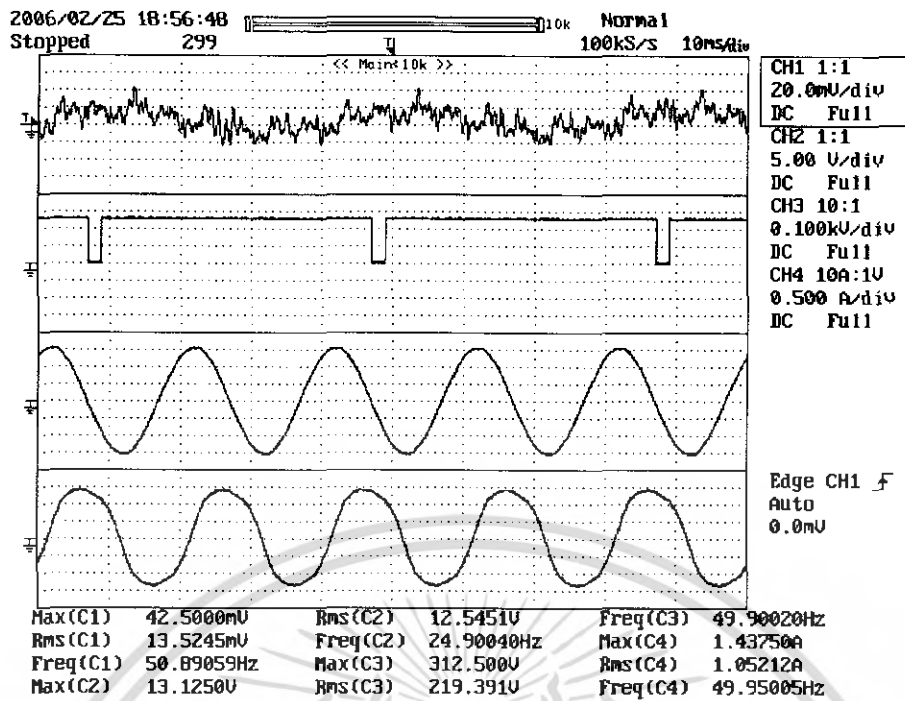


รูปที่ 4.30 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ น็อต 1 ตัว

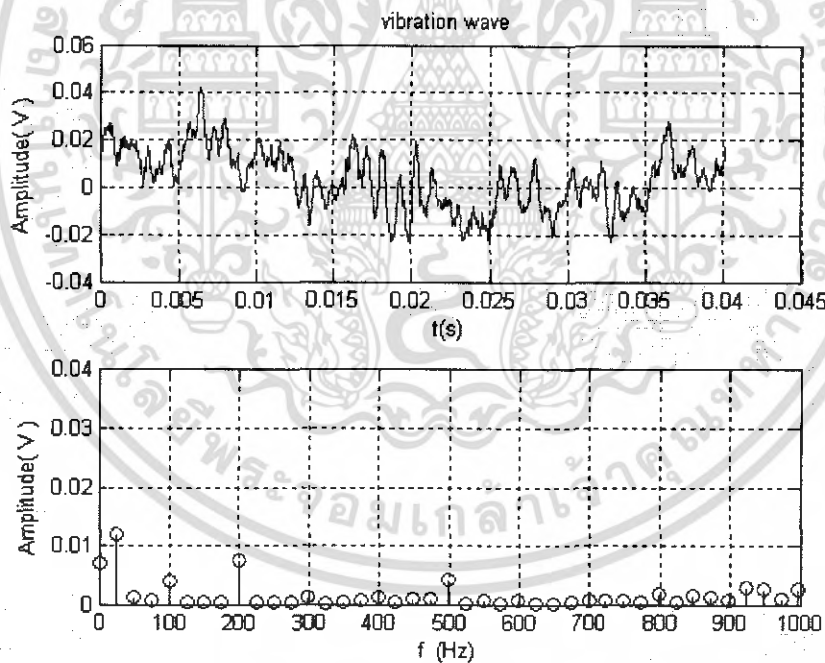


รูปที่ 4.31 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ น็อต 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ น็อต 2 ตัว



รูปที่ 4.33 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนใส่มวลเพิ่มเข้าไปที่โรเตอร์ น็อต 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 บันทึกผลการทดลองใส่เลือดเพิ่มเข้าที่ช่องของโรเตอร์ คำนวณค่า F ทางทฤษฎี

จำนวนเลือด	มวลถ่วง	รัศมี	N_r (rpm)	ω (rad/s)	F ทฤษฎี (N)
1 ตัว	26.5 กรัม	1.914 cm	1498	156.87	12.48
2 ตัว	53.1 กรัม	1.914 cm	1498	156.87	25.01

ตาราง 4.10 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อใส่เลือดเพิ่มเข้าที่ช่องของโรเตอร์

จำนวนเลือด	มวลรวม	a (mV)	a (m/s^2)	F จากหัววัด(N)
1 ตัว	10.7535 Kg	8.33	0.82	8.82
2 ตัว	11.258 Kg	17.5	1.72	19.36

*มวลถ่วง คือ มวลที่ใส่เข้าไป(เลือด)ที่ทำให้มอเตอร์หมุนไม่สมดุล

*Fทางทฤษฎีมาจากสูตร $m\omega^2 r \cos \omega t$ ซึ่ง $\cos \omega t = 1$ เพราะวัดที่แกนนอน

*มวลรวม คือ มวลของมอเตอร์ รวม กับ มู่เล่ และ เลือดที่ทำให้ไม่สมดุล คือ มวลทั้งหมดที่สั้นและหัววัดจับค่าได้

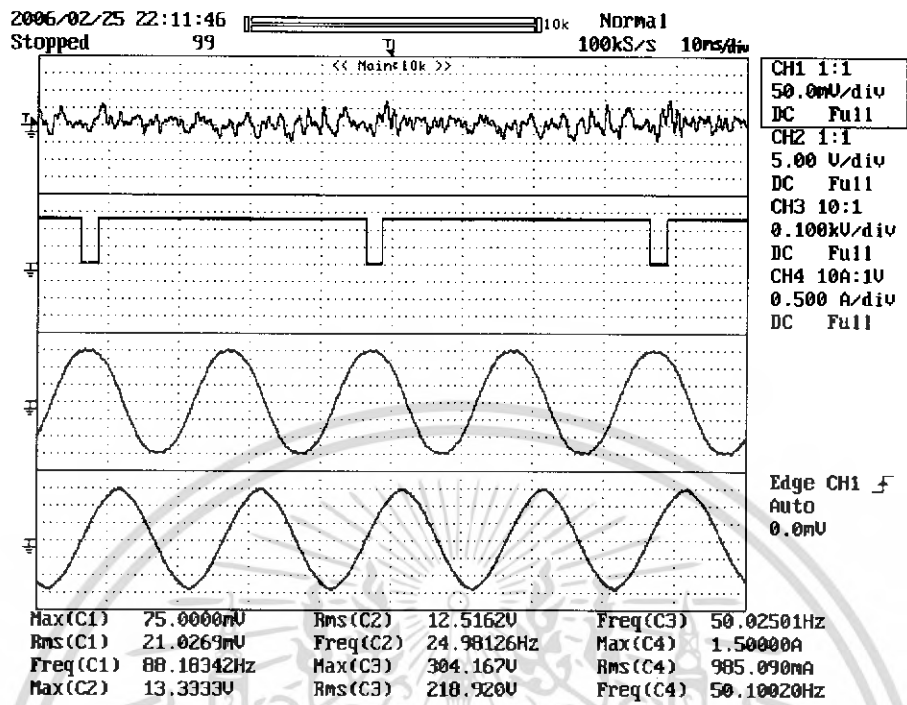
*a (mV) คือ อัตราเร่งที่วัดได้จากหัววัดซึ่งแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

*a (m/s^2) คือ อัตราเร่งที่แปลงค่าเป็นทางกลศาสตร์ ซึ่งหัววัดแปลงค่าได้เท่ากับ 100mV/g โดย g คือ 9.81 (m/s^2)

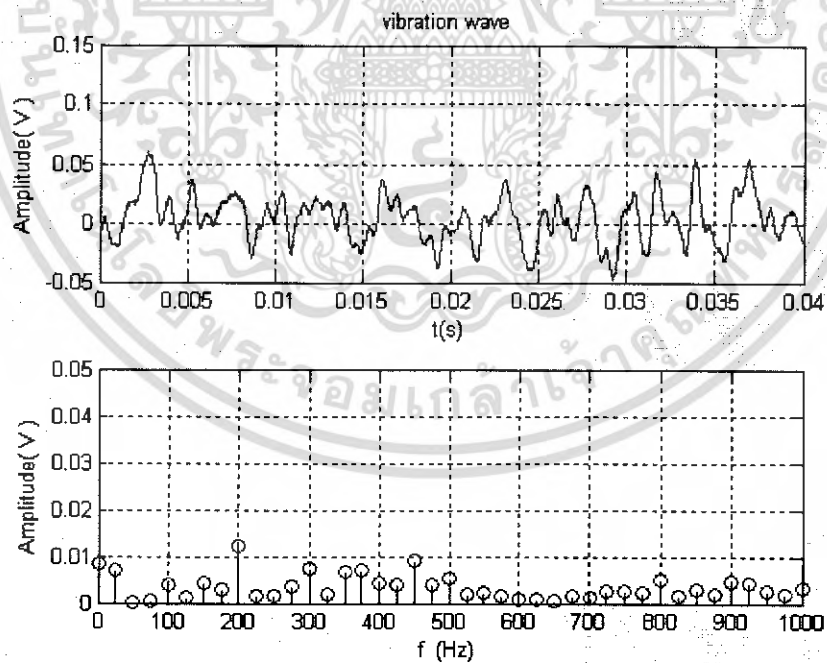
-มวลมอเตอร์ = 10 Kg

-มวลมู่เล่ = 0.727 Kg

4.2.2 ใส่มวลเพิ่มที่ครีกระบายความร้อน



รูปที่ 4.34 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อ ดัดมวลเข้าที่ครีระบายความร้อน



รูปที่ 4.35 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเมื่อ ดัดมวลเข้าที่ครีระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 บันทึกผลการทดลอง ใส่มวลเพิ่มที่ครีบบระบายความร้อนคำนวณค่า F ทางทฤษฎี

มวลถ่วง	รัศมี	N_r (rpm)	ω (rad/s)	F ทฤษฎี (N)
32 กรัม	3.2 cm	1498	156.87	22.99

ตาราง 4.12 บันทึกผลการทดลองค่าอัตราเร่งที่ได้จากหัววัดเมื่อใส่มวลเพิ่มที่ครีบบระบายความร้อน

มวลรวม	a (mV)	a (m/s ²)	F จากหัววัด(N)
10.7652 Kg	16.7	1.64	17.62

*มวลถ่วง คือ มวลที่ใส่เข้าไป(น๊อต)ที่ทำให้มอเตอร์หมุนไม่สมดุล

*Fทางทฤษฎีมาจากสูตร $m\omega^2 r \cos \omega t$ ซึ่ง $\cos \omega t = 1$ เพราะวัดที่แกนนอน

*มวลรวม คือ มวลของมอเตอร์ รวม กับ มู่เล่ และ น๊อตที่ทำให้ไม่สมดุล คือ มวลทั้งหมดที่สั้นและหัววัดจับค่าได้

*a (mV) คือ อัตราเร่งที่วัดได้จากหัววัดซึ่งแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

*a m/s² คือ อัตราเร่งที่แปลงค่าเป็นทางกลศาสตร์ ซึ่งหัววัดแปลงค่าได้เท่ากับ 100mV/g โดย g คือ 9.81 (m/s²)

-มวลมอเตอร์ = 10 Kg

-มวลมู่เล่ = 0.727 Kg

4.3 แสดงตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่า F ทางทฤษฎี และ F จากการทดลอง

ยกตัวอย่างข้อมูลจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ขณะใส่น๊อต 2 ตัว

F ทางทฤษฎี

ซึ่ง $m = 53.9$ กรัม

$\omega = 156.87$ rad / s

$r = 7.8$ cm

$$m\omega^2 r \cos \omega t = (0.0539)(156.87)^2(0.078) = 103.46$$

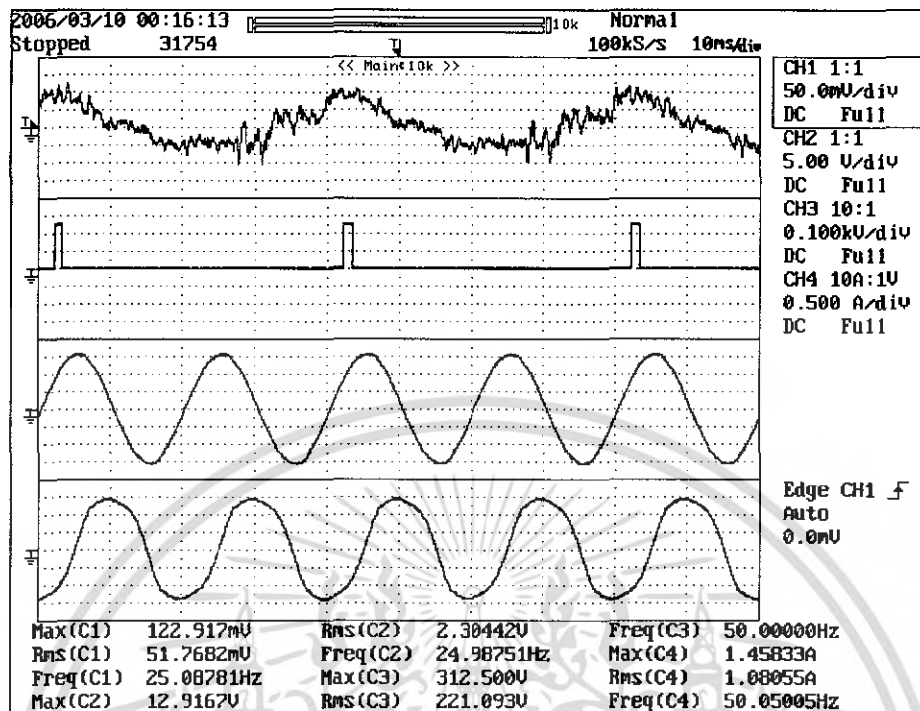
F จากการทดลอง

ซึ่ง $M = 10+1.25+0.0539 = 11.3039$ Kg

$a = 7.97553$ m / s²

$$Ma = (11.3039)(7.97553) = 90.15N$$

4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 4.36 แสดงตำแหน่งพัลส์ของ Photo switch เป็นบวกซึ่งตรงกันกับจังหวะที่มีการสั่นสะเทือนมากที่สุด

จากสัญญาณที่วัดได้จาก Oscilloscope ได้แสดงให้เห็นว่า จุดที่มีการสั่นสะเทือนมากที่สุด อยู่ ณ ตำแหน่งแกนนอน ดังที่ได้คาดไว้ ซึ่งเราทราบได้จากการติดตั้งตำแหน่งของ Photo switch

ในการทดลองหัวข้อ Unbalance Mechanic

จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการปรับเปลี่ยนมวลถ่วงที่ทำให้มอเตอร์ไม่สมดุล และเปลี่ยนรัศมี เมื่อทำการเพิ่มขนาดการสั่นสะเทือนจะมีมากขึ้น จากหัวข้อที่ 4.1.1 กรณีใส่ความไม่สมดุลจากภายนอก -แบบ เปลี่ยนทั้งขนาดมวลและรัศมี

ผลการทดลองได้แสดงค่าขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อเราใส่มวลถ่วงน้ำหนักขนาดต่างๆที่รัศมีต่างๆกัน

การสั่นสะเทือนจะมีขนาดมากที่สุดเมื่อมวลถ่วงหรือคัมน้ำหนักหมุนมาถึงแนวแกนนอนเพราะเป็นแนวที่สามารถสั่นสะเทือนได้อย่างอิสระ แสดงได้จากรูปสัญญาณที่วัดได้จากสโคปข้างต้นค่าของแรงที่ได้จากทางทฤษฎีและจากหัววัดมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยแต่มีความสอดคล้องกัน

จากหัวข้อที่ 4.1.2 กรณีใส่ความไม่สมดุลจากภายนอก

-แบบให้รัศมีคงที่และทำการเพิ่มมวล

การทดลองนี้จะทำเพื่อดูค่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนมวลซึ่งการเพิ่มมวลแต่ละค่าจะทำให้ความเร็วรอบดกลองน้อยมากจึงเป็นการดูผลของมวลถ่วงน้ำหนักหรือดัมน้ำหนักเพียงอย่างเดียวซึ่งจากตารางผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มมวลจะทำให้แรงมีขนาดเพิ่มขึ้นการสั่นสะเทือนที่วัดได้ก็มีขนาดเพิ่มขึ้นแรงทั้งทางทฤษฎีและหัววัดมีความสอดคล้องกันแต่มีค่าแตกต่างกัน

จากหัวข้อที่ 4.1.3 กรณีใส่ความไม่สมดุลจากภายนอก

-แบบให้มวลคงที่เปลี่ยนรัศมี

การทดลองนี้เพื่อดูค่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนรัศมีก็มีผลทำให้ขนาดของการสั่นสะเทือนมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งหากทำการเพิ่มรัศมีก็จะทำให้ขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นแรงที่ได้จากทางทฤษฎีและหัววัดมีความสอดคล้องกันแต่ค่าที่ได้มีขนาดแตกต่างกัน

จากหัวข้อที่ 4.3

-แบบติดตั้งหัววัดแกนตั้ง

การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบการติดตั้งหัววัดแกนตั้งและการติดตั้งหัววัดแบบแกนนอน จากที่ได้กล่าวมาระบบที่ใช้ในนั้นจะสามารถสั่นสะเทือนอย่างอิสระในแนวแกนนอน ค่าของแรงที่หัววัดได้จากหัววัดอัตราเร่งจะมีขนาดแตกต่างกันมาก ซึ่งการติดตั้งหัววัดแบบแกนตั้งแรงจะไม่สามารถส่งผ่านได้จึงทำให้การสั่นสะเทือนที่วัดได้มีความผิดเพี้ยนไปมากจากทางทฤษฎี

จากหัวข้อที่ 4.2 การสั่นสะเทือนจากการเพิ่มมวลภายในโรเตอร์

ทั้งกรณีของการใส่เนื้อที่โรเตอร์และใส่มวลที่ครีบกทำให้การเพิ่มขนาดมวลและรัศมีก็จะทำให้การสั่นสะเทือนมีขนาดมากขึ้นเนื่องจากแรงสู่ศูนย์กลางมีขนาดมากขึ้นซึ่งเป็นแรงที่ทำให้สั่นสะเทือน

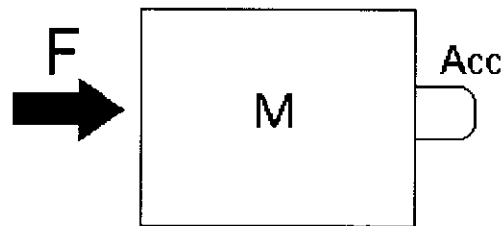
ทั้งทางทฤษฎีและหัววัดมีความสอดคล้องกันเพียงแต่ค่าที่วัดได้มีความแตกต่างกัน

จากการทดลองทั้งหมดเห็นได้ค่าทางทฤษฎีมีขนาดของแรงมากกว่าหัววัดได้โดยมีความแตกต่างกันในระดับหนึ่ง ซึ่งคาดว่าสาเหตุของความคลาดเคลื่อนน่าจะมาจาก

-การติดตั้งหัววัดอัตราเร่งที่ใช้ซีพึ้งเป็นตัวยึดติดทำให้ขนาดการสั่นสะเทือนที่วัดคลาดเคลื่อนไป

-อุปกรณ์ที่ใช้งานเนื่องจากใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกันทั้งหมดในโครงงานนี้อาจจะมีความสูญเสียในบางส่วนเล็กน้อยซึ่งส่งผลต่อการสั่นสะเทือน

ทิศทางของแรงที่หัววัดอัตราเร่งสามารถวัดได้



เมื่อเราทำการเก็บค่าจาก Oscilloscope เป็น ASCII ไฟล์ ค่าของอัตราเร่งที่วัดได้นั้นจะมีเครื่องหมาย + และ - อยู่ข้างหน้า ซึ่งเป็นการบอกทิศของแรง เราสามารถทราบได้ว่า + หมายถึง ทิศใด

- หมายถึง ทิศใด โดย

วิธีการง่าย ๆ คือ ออกแรงกระทำกับวัตถุที่หัววัดอัตราเร่งจับอยู่บนทีกค่าสัญญาณที่วัดจากหัววัดอัตราเร่ง ใน ASCII ไฟล์

ทำการตรวจดูค่าที่วัดได้จากหัววัดอัตราเร่งซึ่งปรากฏว่า

** หากทิศของแรงกระทำมีทิศพุ่งเข้าหาหัววัดอัตราเร่งจะได้ค่าอัตราเร่งเป็น +

** หากทิศของแรงกระทำมีทิศพุ่งออกจากหัววัดอัตราเร่งจะได้ค่าอัตราเร่งเป็น -

ซึ่งผลปรากฏออกมาว่า แรงเข้าสู่ศูนย์กลางซึ่งจากวิชาฟิสิกส์ได้กล่าวไว้ว่า จะมีทิศตามแนวรัศมีและพุ่งเข้าจุดศูนย์กลางแต่จากการทดลองผลปรากฏว่าแรงนี้มีทิศพุ่งออกจากศูนย์กลาง

ซึ่งเราสามารถนำสัญญาณการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการไม่สมดุลทางกล (Unbalance mechanical) ที่ได้มาวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ได้คือ

เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อวัสดุที่ประกอบเป็นโรเตอร์หรือชิ้นส่วนที่หมุนของเครื่องจักร ซึ่งอาจจะเป็นลักษณะของการไม่สมดุลทางสถิต (Static Unbalance) หรือการไม่สมดุลแบบพลศาสตร์ (Dynamic unbalance) ดังแสดงในรูปที่ เมื่อโรเตอร์หมุนจะทำให้เกิดแรงไม่สมดุลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลที่ไม่สมดุล และเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความถี่รอบในการหมุน โดยมีทิศทางของแรงกระทำในแนวรัศมีที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งของมวลที่ไม่สมดุล ลักษณะของการสั่นสะเทือนที่สำคัญคือ

1. ความถี่ของการสั่นเท่ากับ $1 \times \text{RPM}$ ของชิ้นส่วนที่ไม่สมดุล

2. ขนาดของการสั่นสะเทือนขึ้นกับขนาดของมวลที่ไม่สมดุล และความถี่รอบ

กำลังสอง

3. มุมเฟสสม่ำเสมอคงที่ เห็นจุดเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความถี่และขนาดการสั่นสะท้อนเมื่อเพิ่มขนาดของมวลโดยรัศมีคงที่

$$r = 7.8 \text{ cm.}$$

ใส่มวลที่ fly wheel	ความถี่	ขนาด
27.0 g	24.987	0.029
53.9 g	24.98	0.052
63.4 g	24.98	0.058
73.1 g	24.99	0.063

จากตารางที่ 4.13 และรูปกราฟผลการทดลองจะเห็นว่า ความถี่ของการสั่นจะใกล้เคียงกับความถี่รอบของโรเตอร์ โดยขนาดของการสั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลเพิ่มขึ้นจะเป็นไปตามทฤษฎีของแรงคือ

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความถี่และขนาดการสั่นสะท้อนเมื่อเพิ่มรัศมีโดยที่มวลคงที่

$$m = 80.8 \text{ g.}$$

รัศมี	ความถี่	ขนาด
5.2	24.99	0.041
6	24.99	0.058
7	24.99	0.058
7.5	24.98	0.060

จากตารางที่ 4.14 และรูปกราฟผลการทดลองจะเห็นว่า ความถี่ของการสั่นจะใกล้เคียงกับความถี่รอบของโรเตอร์ โดยขนาดของการสั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีเพิ่มขึ้นจะเป็นไปตามทฤษฎีของแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความถี่และขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อรัศมีและมวลเปลี่ยนแปลง

มวล	รัศมี (cm)	ความถี่	ขนาด
27.0 g	7.8	24.987	0.029
53.9 g	7.8	24.99	0.052
80.8 g	6	24.99	0.058
107.5 g	5.5	24.99	0.064
134.4 g	5.5	24.99	0.086

จากตารางที่ 4.15 และรูปภาพผลการทดลองจะเห็นว่า ความถี่ของการสั่นจะใกล้เคียงกับความถี่รอบของโรเตอร์ โดยขนาดของการสั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีและมวลเพิ่มขึ้นจะเป็นไปตามทฤษฎีของแรง



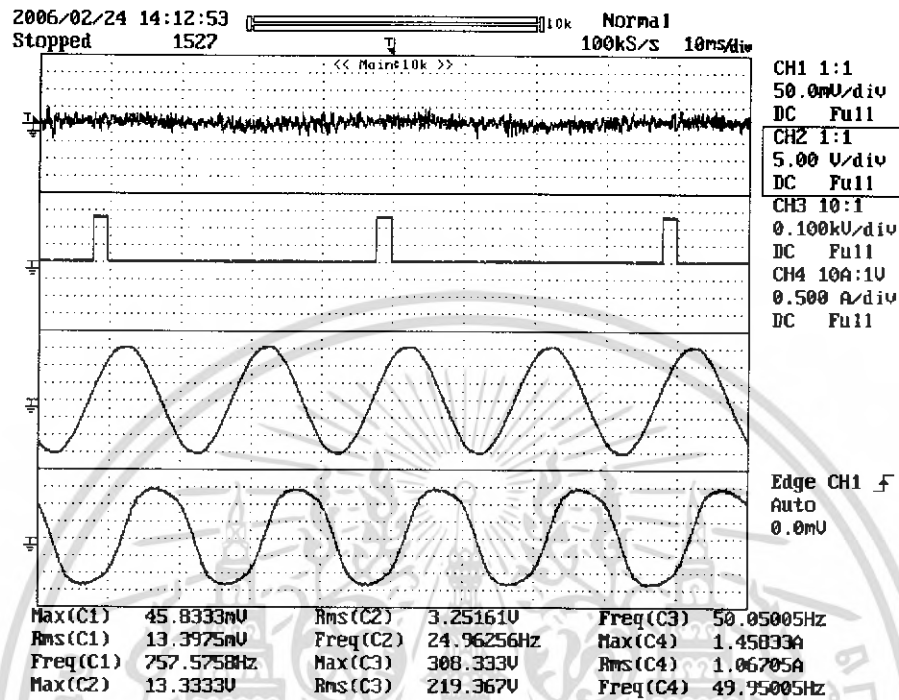
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดลอง Unbalance Electrical

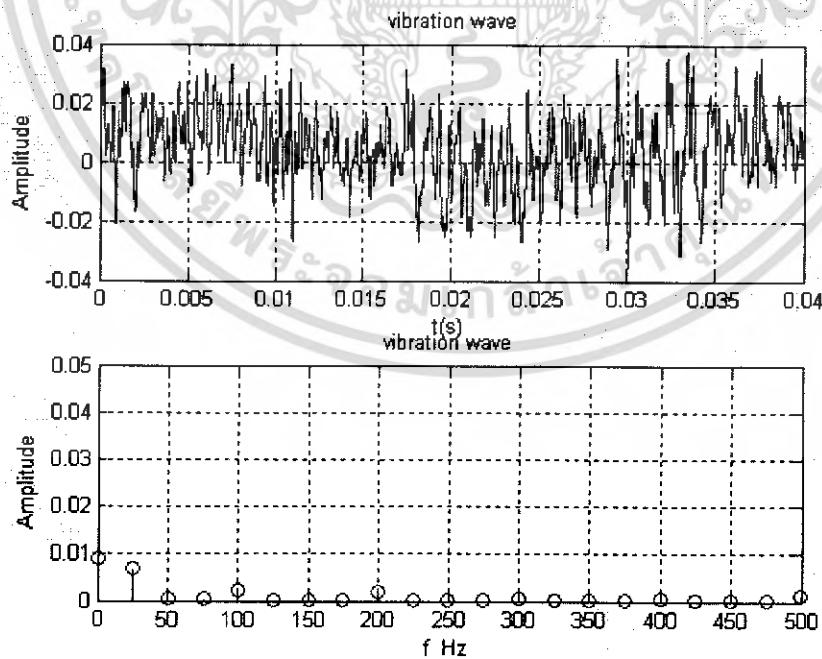
Voltage Balance เฟส A 220 V

B 220 V

C 220 V



รูปที่ 4.37 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดัน 3 เฟสสมมูล



รูปที่ 4.38 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดัน 3 เฟสสมมูล

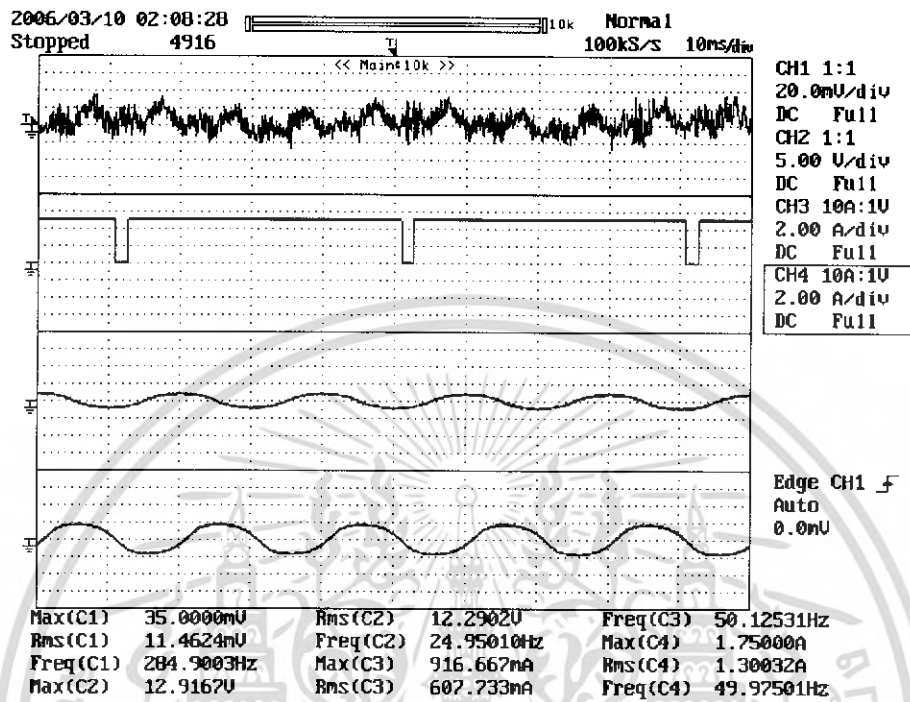
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เฟส A เปลี่ยนแปลง และเฟส B, C คงที่

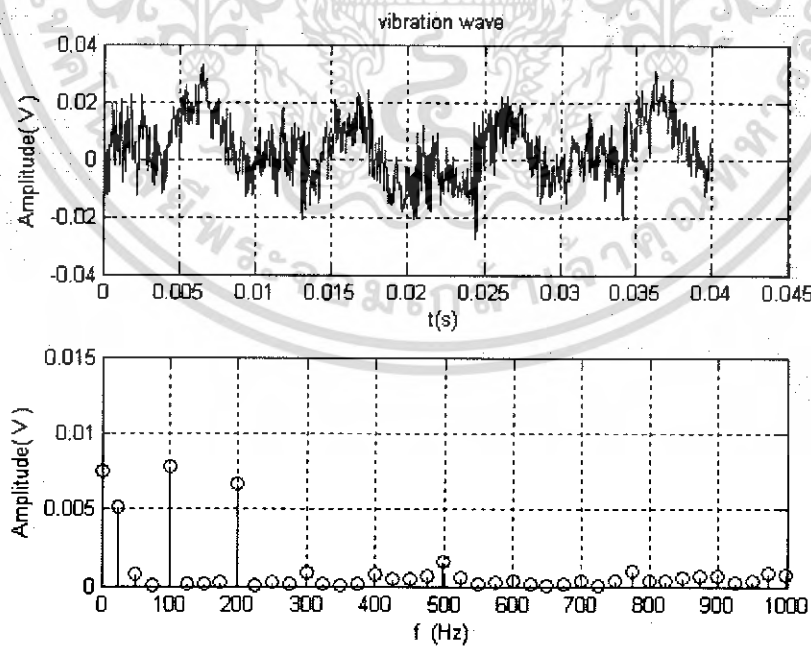
$$A = 198 \text{ V}$$

$$B = 220 \text{ V}$$

$$C = 220 \text{ V}$$



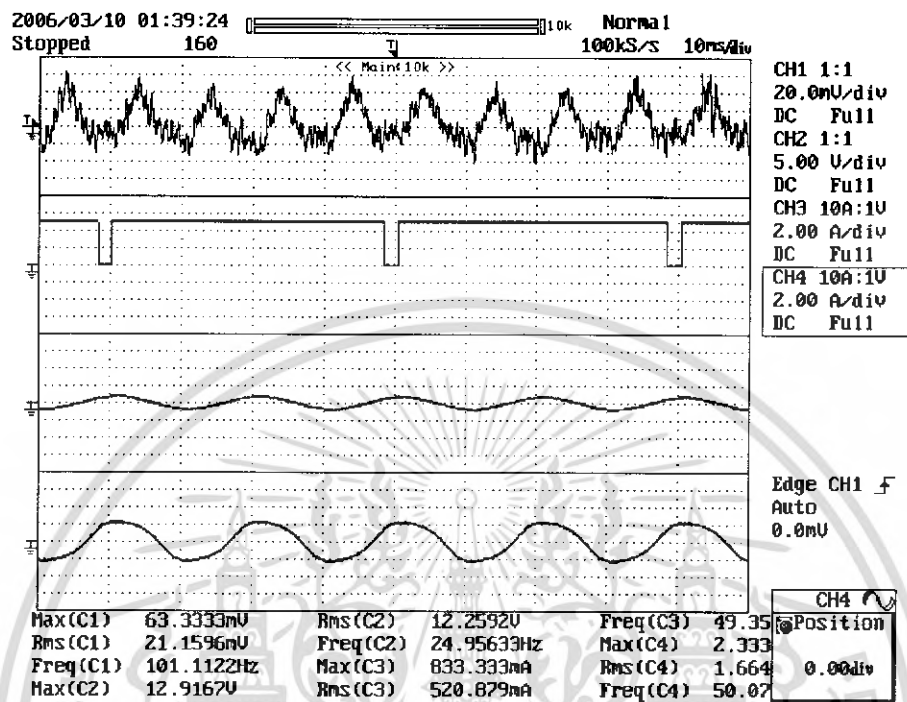
รูปที่ 4.39 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส A เท่ากับ 198 โวลต์



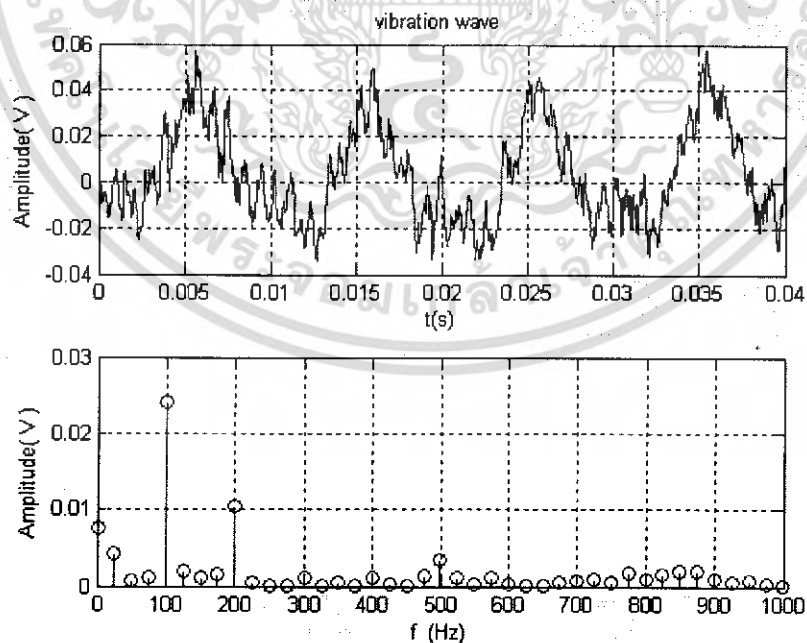
รูปที่ 4.40 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 198 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันเฟส A = 176 V
 B = 220 V
 C = 220 V



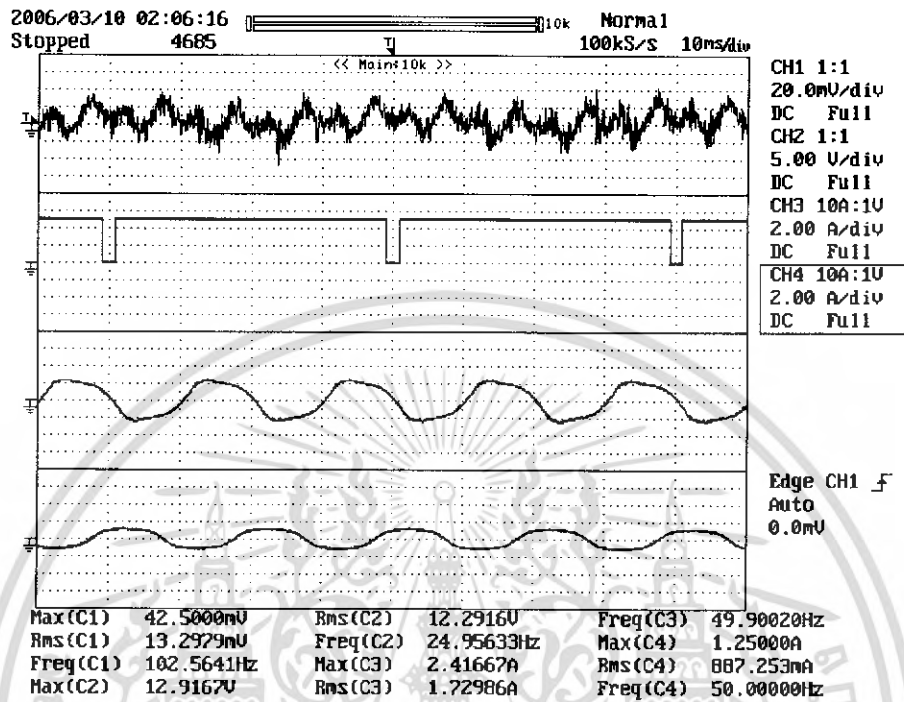
รูปที่ 4.41 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส A เท่ากับ 176 โวลต์



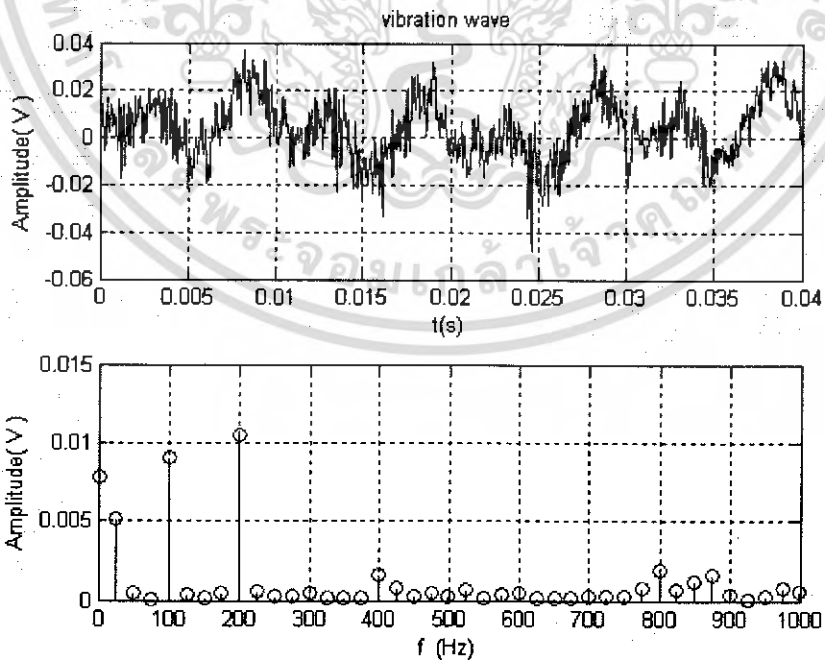
รูปที่ 4.42 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 176 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันเฟส A = 242 V
 B = 220 V
 C = 220 V



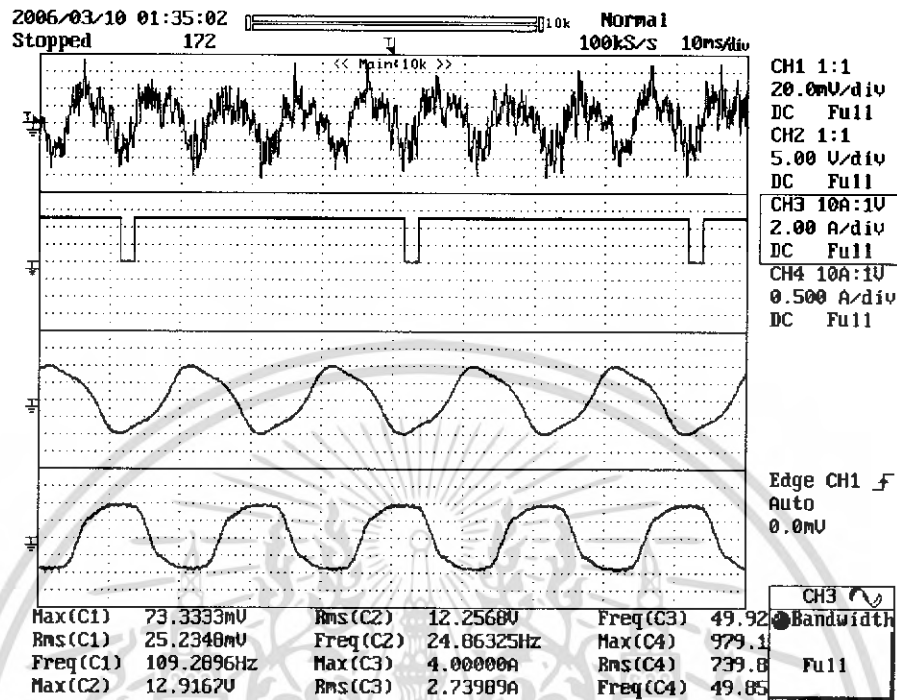
รูปที่ 4.43 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส A เท่ากับ 242 โวลต์



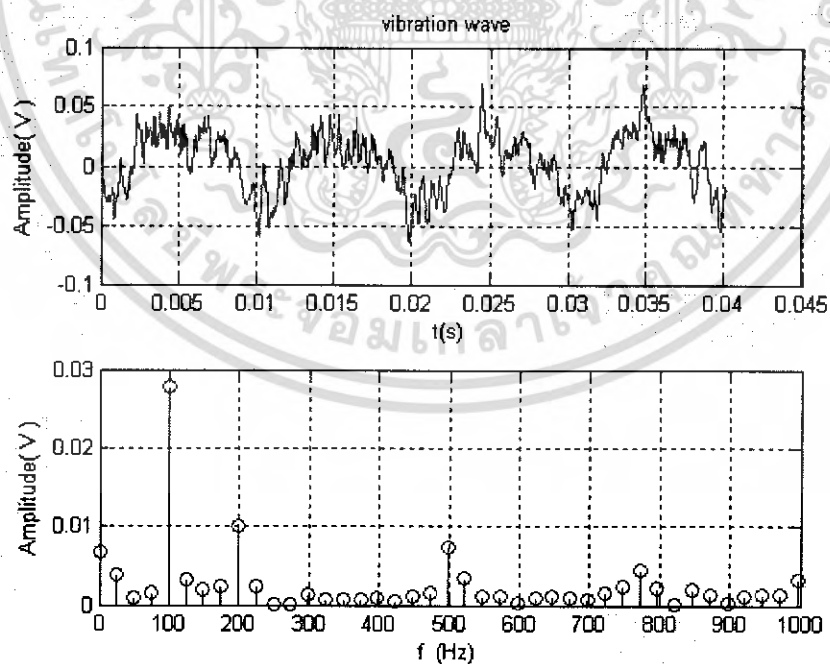
รูปที่ 4.44 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 242 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันเฟส A = 264 V
 B = 220 V
 C = 220 V



รูปที่ 4.45 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส A เท่ากับ 264 โวลต์



รูปที่ 4.46 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 264 โวลต์

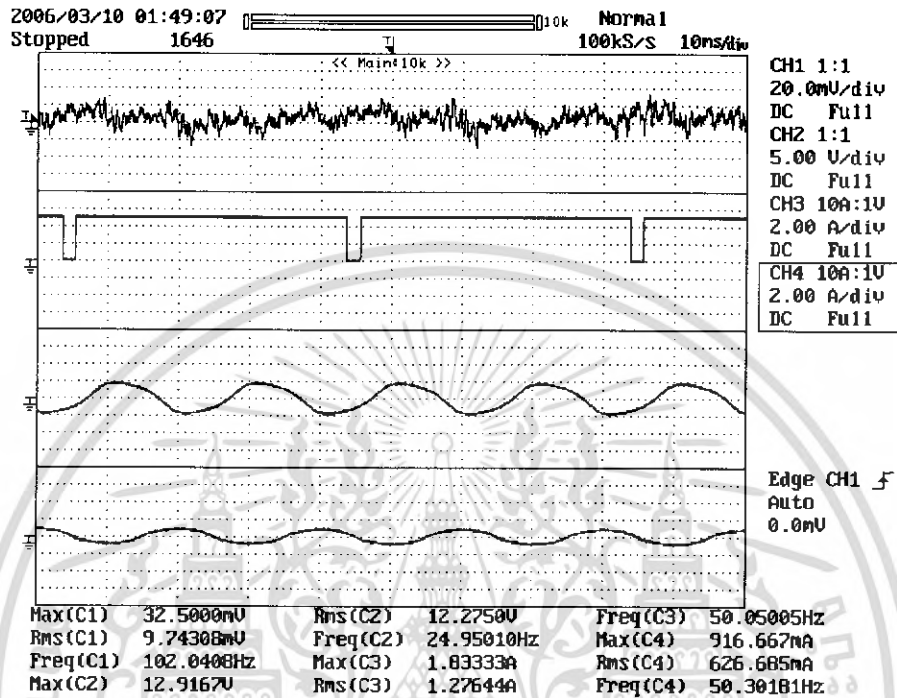
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เฟส B เปลี่ยนแปลง และเฟส A, C คงที่

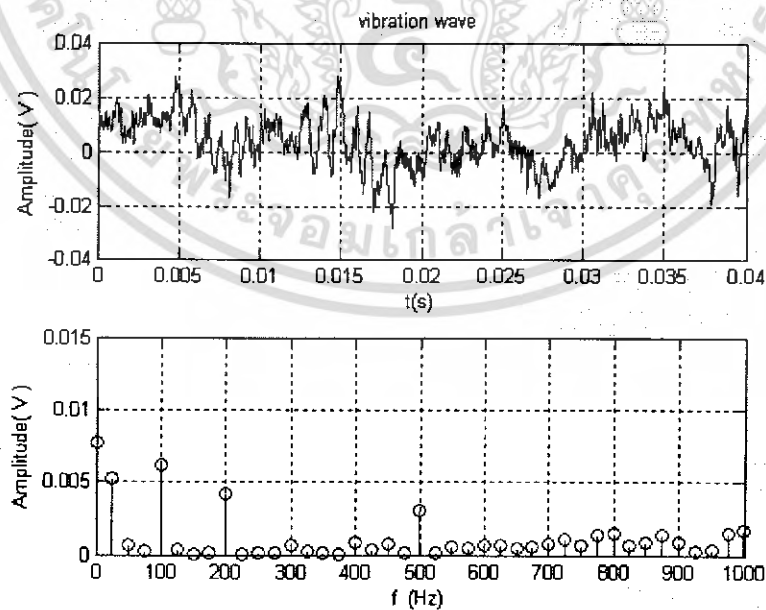
ที่แรงดันเฟส A = 220 V

B = 198 V

C = 220 V



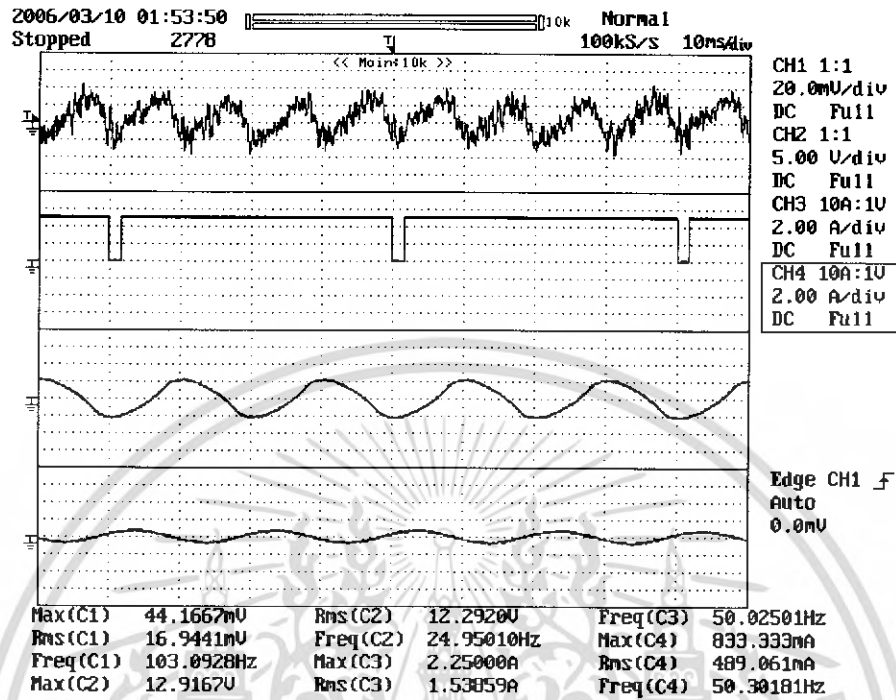
รูปที่ 4.47 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส B เท่ากับ 198 โวลต์



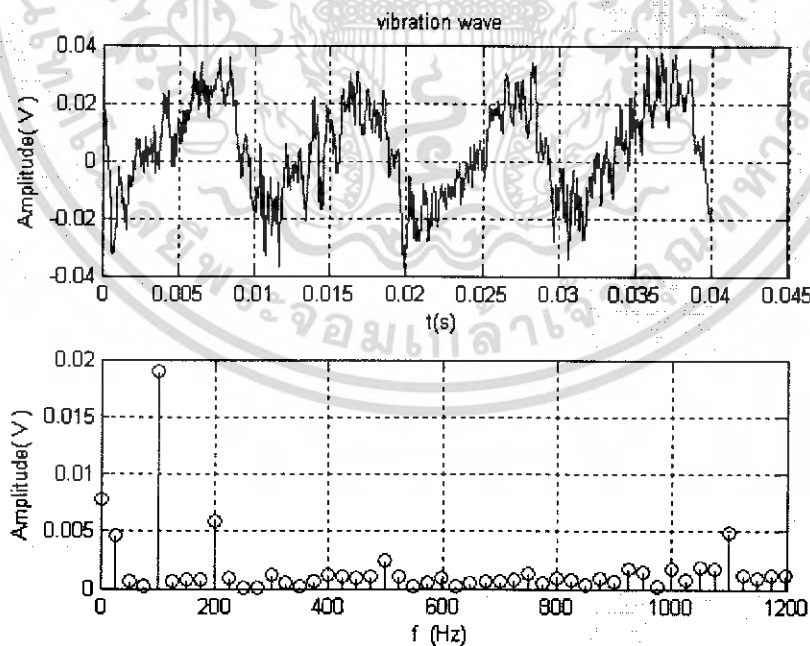
รูปที่ 4.48 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส B เท่ากับ 198 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันเฟส A = 220 V
 B = 176 V
 C = 220 V



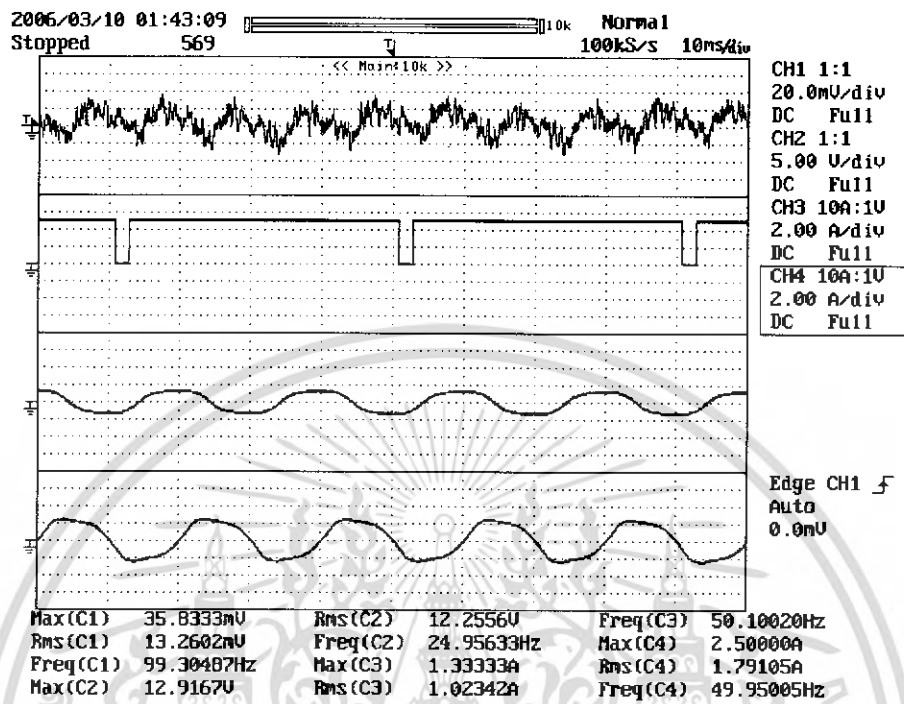
รูปที่ 4.49 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส B เท่ากับ 176 โวลต์



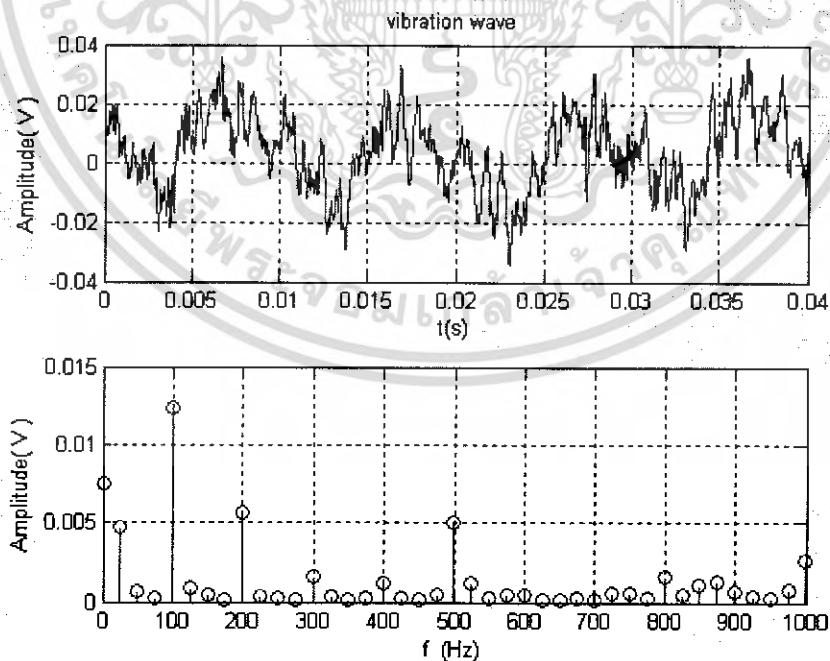
รูปที่ 4.50 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส B เท่ากับ 176 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันเฟส A = 220 V
 B = 242 V
 C = 220 V



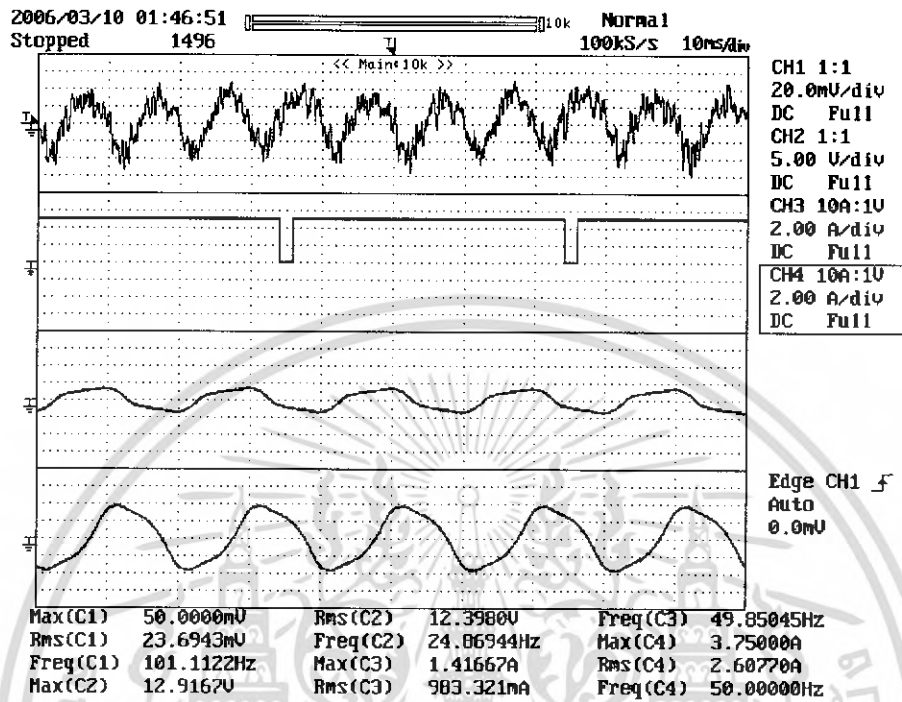
รูปที่ 4.51 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส B เท่ากับ 242 โวลต์



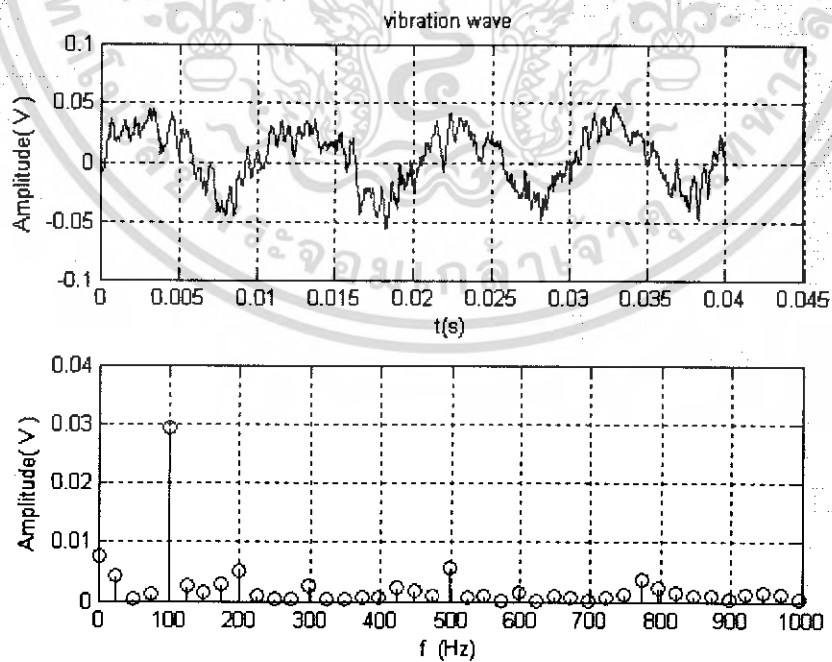
รูปที่ 4.52 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส B เท่ากับ 242 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันเฟส A = 220 V
 B = 264 V
 C = 220 V



รูปที่ 4.53 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส B เท่ากับ 264 โวลต์



รูปที่ 4.54 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส A เท่ากับ 264 โวลต์

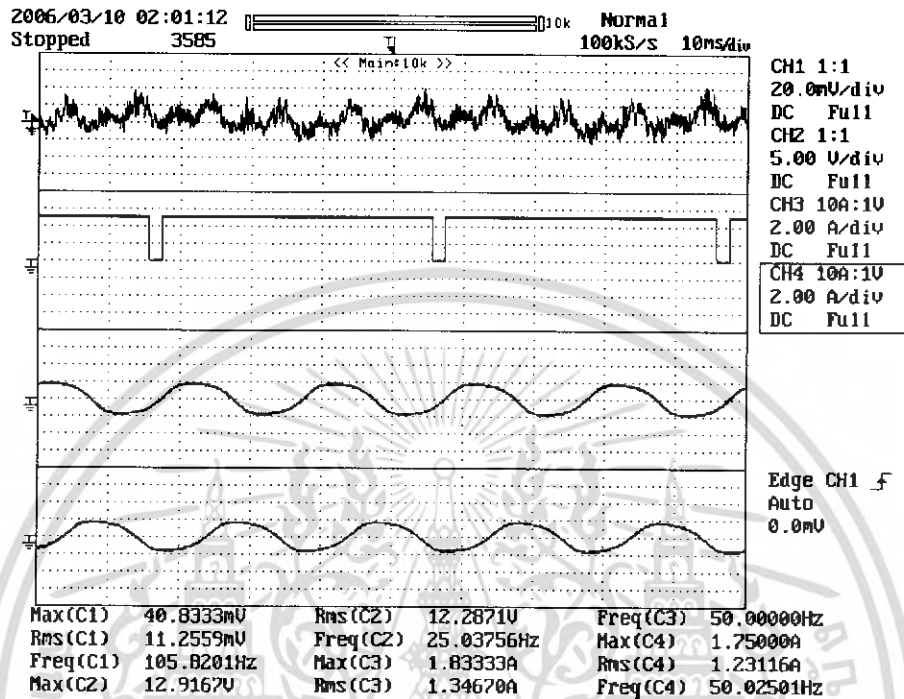
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เฟส C เปลี่ยนแปลง และเฟส A, B คงที่

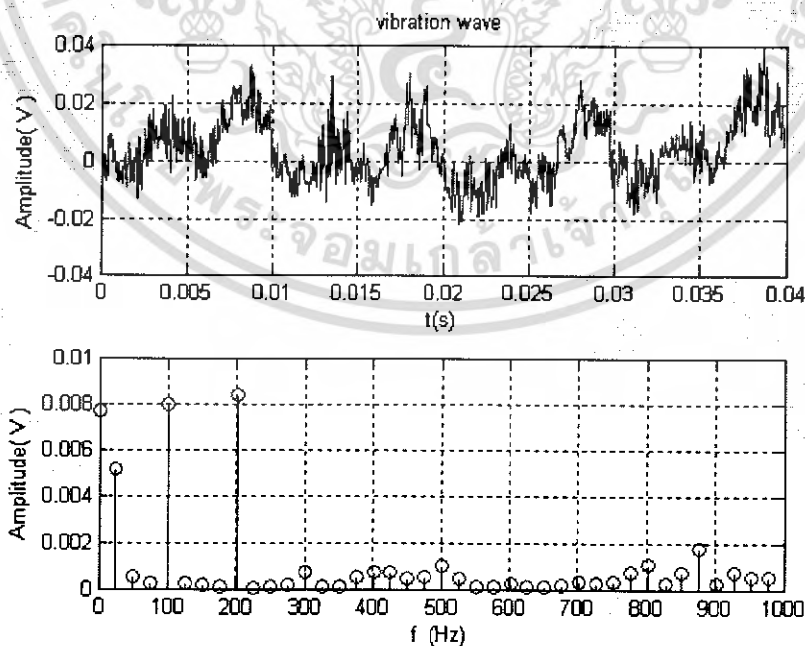
ที่แรงดันเฟส A = 220 V

B = 220 V

C = 198 V



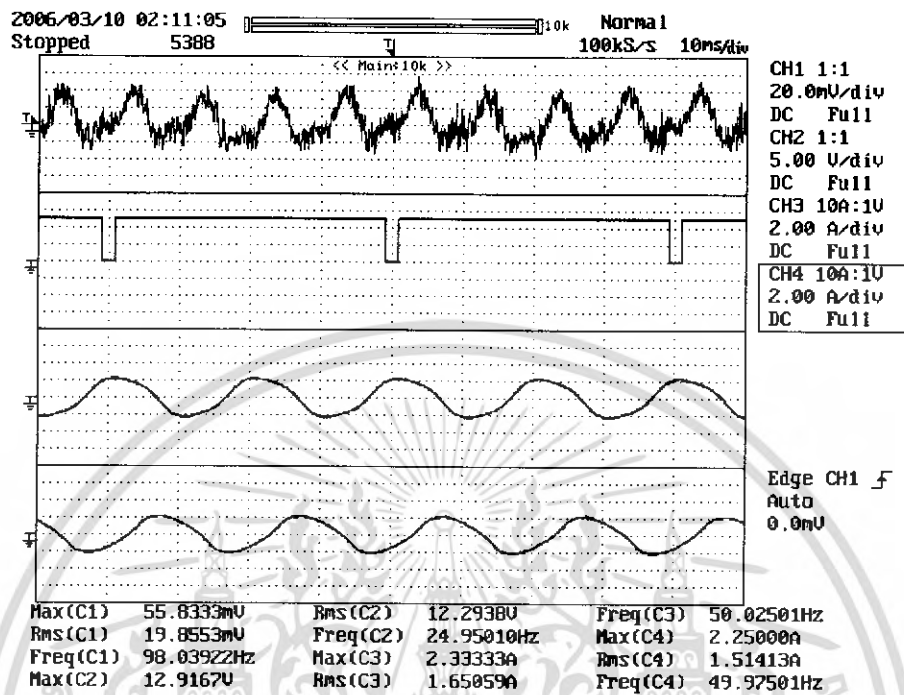
รูปที่ 4.55 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส C เท่ากับ 198 โวลต์



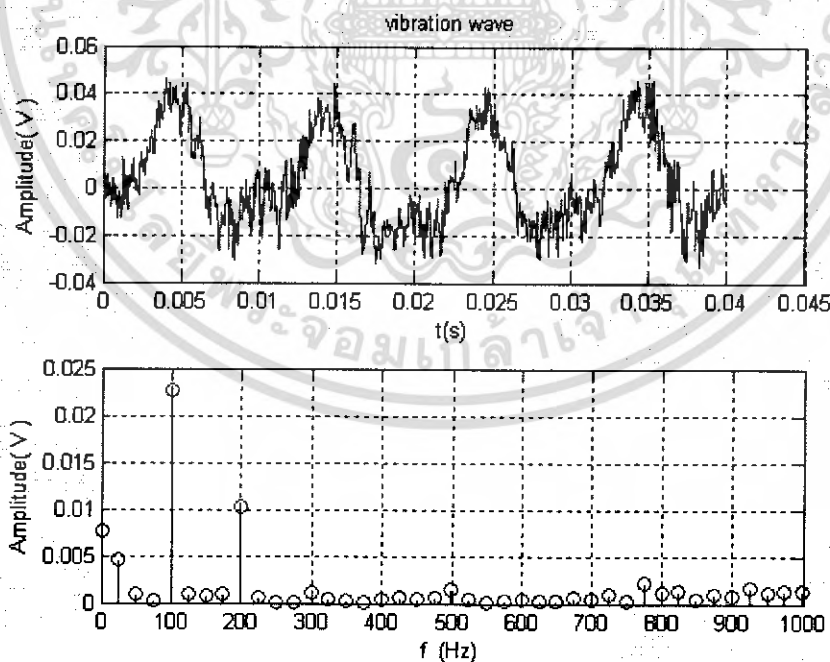
รูปที่ 4.56 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส C เท่ากับ 198 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันเฟส A = 220 V
 B = 220 V
 C = 176 V



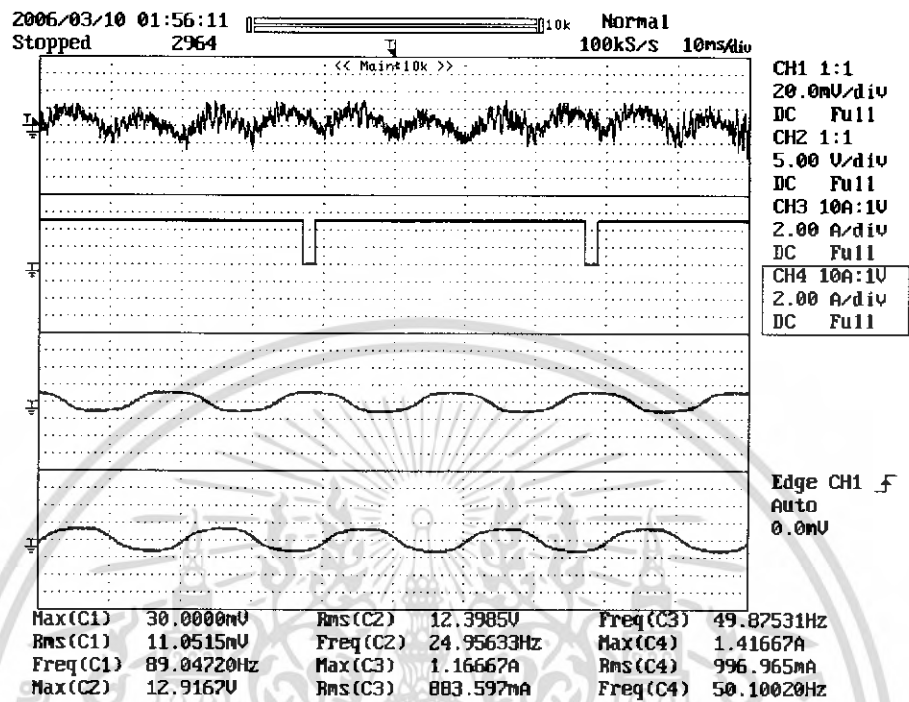
รูปที่ 4.57 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส C เท่ากับ 176 โวลต์



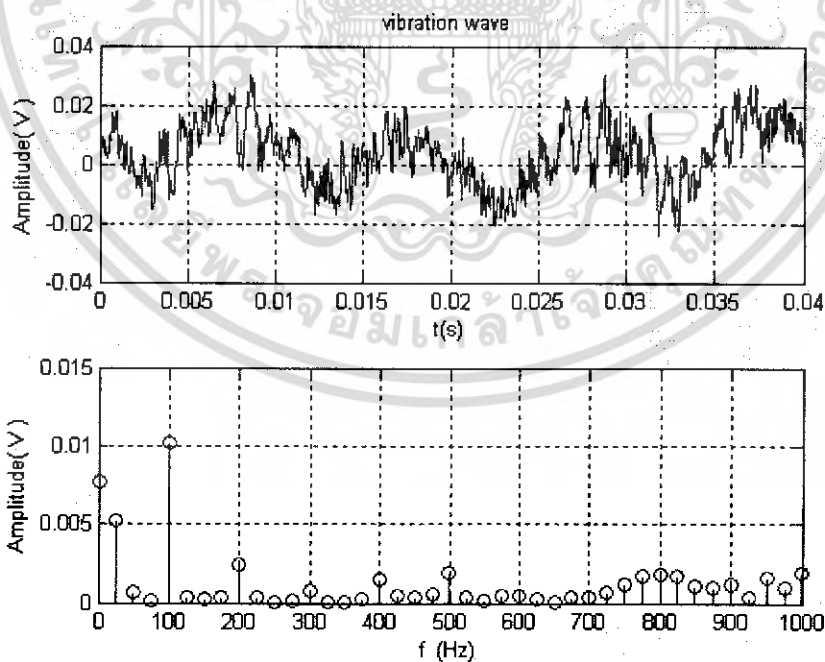
รูปที่ 4.58 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส C เท่ากับ 176 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันเฟส A = 220 V
 B = 220 V
 C = 242 V



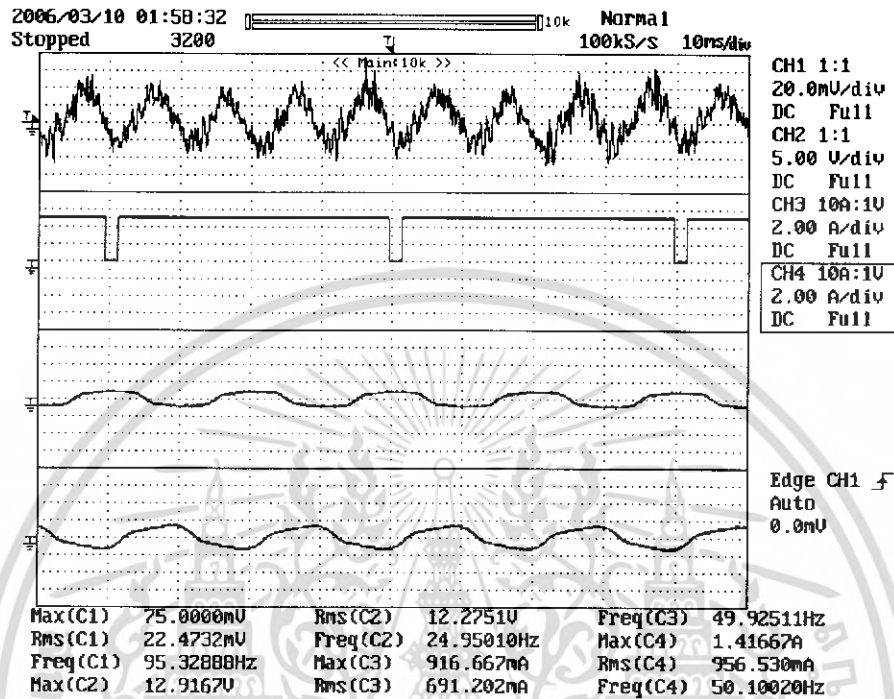
รูปที่ 4.59 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส C เท่ากับ 242 โวลต์



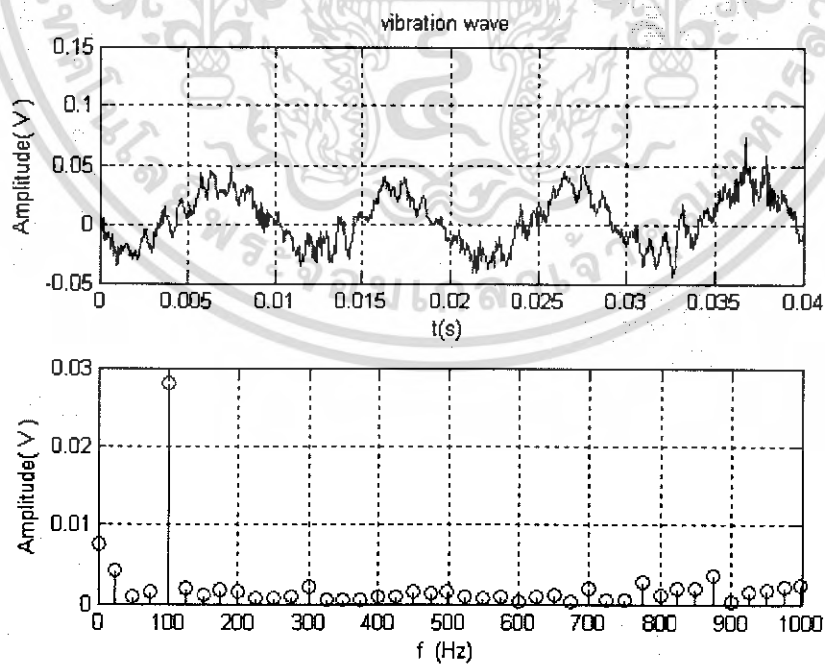
รูปที่ 4.60 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส C เท่ากับ 242 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดันเฟส A = 220 V
 B = 220 V
 C = 264 V



รูปที่ 4.61 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนที่แรงดันเฟส C เท่ากับ 264 โวลต์



รูปที่ 4.62 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันเฟส C เท่ากับ 264 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากทฤษฎี หลักการของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ คือ ผลลัพธ์ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่หมุนตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า 3 เฟสที่จ่ายให้แก่ขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 ชุด เมื่อมีกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสจ่ายให้กับขดลวด 3 เฟส เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์นั้น สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำในโรเตอร์นั้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ และจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ เพราะที่โรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับที่สเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์นั้นจะเกิดการผลัด และตัดกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน ผลที่ได้ของการตัดและผลัดระหว่างขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อเราป้อนกระแสไฟฟ้า 3 เฟสที่สมดุล จะทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) มีค่าคงที่ตลอด

แต่เมื่อเราป้อนกระแสไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุล เช่น เพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่เฟส A ขึ้น 10 % คือจาก 220 โวลต์ เป็น 242 โวลต์ แต่เฟส B และ C คงที่ที่ 220 โวลต์ ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เฟส A มีค่าเพิ่มขึ้น โดย B แปรผันตาม แรงดัน เมื่อแท่งตัวนำในโรเตอร์หมุนตัดผ่านขดลวดของเฟส A และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เฟส A มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้แรงบิดชั่วขณะ (ขณะที่หมุนผ่านขดลวดเฟส A) จะมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งนั้นเพิ่มขึ้นด้วย จากสมการ

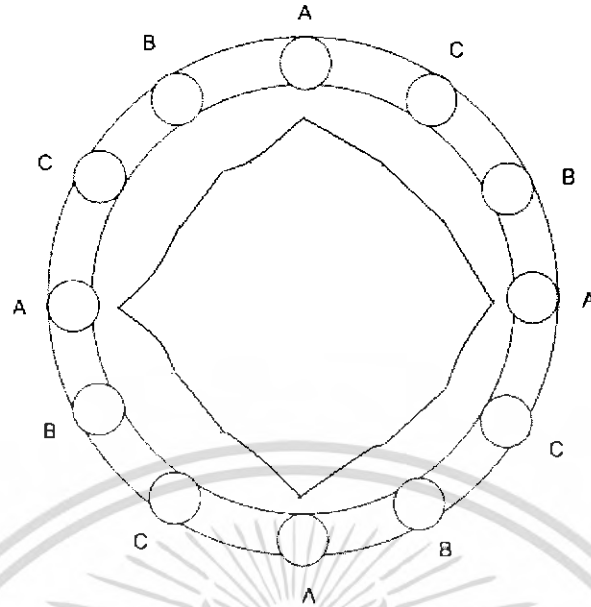
$$F = IIB$$

$$T = Fr = J \frac{d\omega}{dt}$$

และเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านจากเฟส A ไป B ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะลดลงคือน้อยกว่าเฟส A ก็จะทำให้แรงบิดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งนั้นลดลงด้วย

เมื่อเปลี่ยนจากเฟส B ไป C เนื่องจากค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเท่ากันดังนั้นค่าแรงบิดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งนั้น (ที่เฟส C) ก็จะมีค่าเท่ากับที่เฟส B

เมื่อเปลี่ยนจากเฟส C ไป A เนื่องจากค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เฟส A มีค่าสูงขึ้นดังนั้น แรงบิดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งนั้น (ที่เฟส A) ก็เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.63 แสดงความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงบิดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของโรเตอร์ ที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านแต่ละเฟสก็จะเกิดการกระเพื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในมอเตอร์อื่นเนื่องมาจากการที่มอเตอร์ได้รับไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่สมดุล

ซึ่งเราสามารถนำสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้มาวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ได้ คือ

การไม่สมดุลทางไฟฟ้า (Unbalance electrical)

เกิดจากสถานะที่มอเตอร์ได้รับแรงดันทั้ง 3 เฟสไม่สมดุลกัน เช่นบางเฟสมีค่าแรงดันสูงหรือต่ำกว่าปกติ ลักษณะการสั่นสะเทือนที่สำคัญคือ

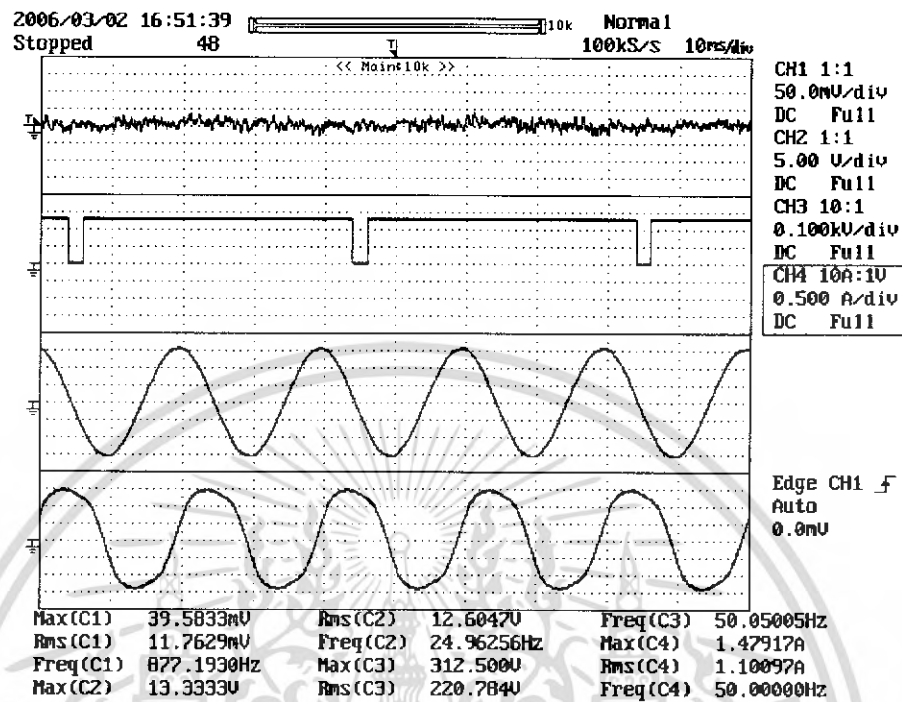
1. ความถี่ของการสั่นสะเทือนเท่ากับ $1 \times \text{RPM}$ หรือ 1, 2 เท่าของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. Line Frequency)

2. มุมเฟสเห็นจุดเดียวหรือเห็นสองจุด

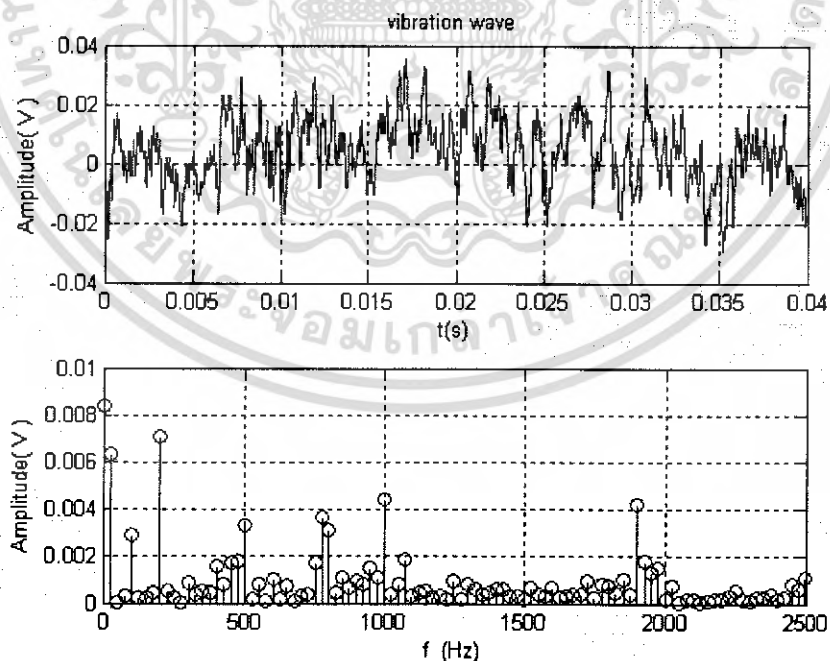
จากรูปกราฟผลการทดลองจะพบว่าเมื่อแรงดันทั้งสามเฟสมีการไม่สมดุลกันแต่ไม่มากนักจะเห็นว่ามีความถี่ของการสั่นสะเทือนอื่น ๆ ปะปนอยู่ แต่เมื่อมีการไม่สมดุลกันมาก ๆ ความถี่ของการสั่นสะเทือนจะเท่ากับ 2 เท่าของความถี่ทางไฟฟ้า คือ 100 Hz และจะมีขนาดการสั่นสะเทือนมากขึ้นเมื่อแรงดันทั้งสามเฟสเกิดการไม่สมดุลมากขึ้น

4.7 ผลการทดลองแบบรีจันรูด

1. แบบรีจันรูดเล็กรีจันรูด



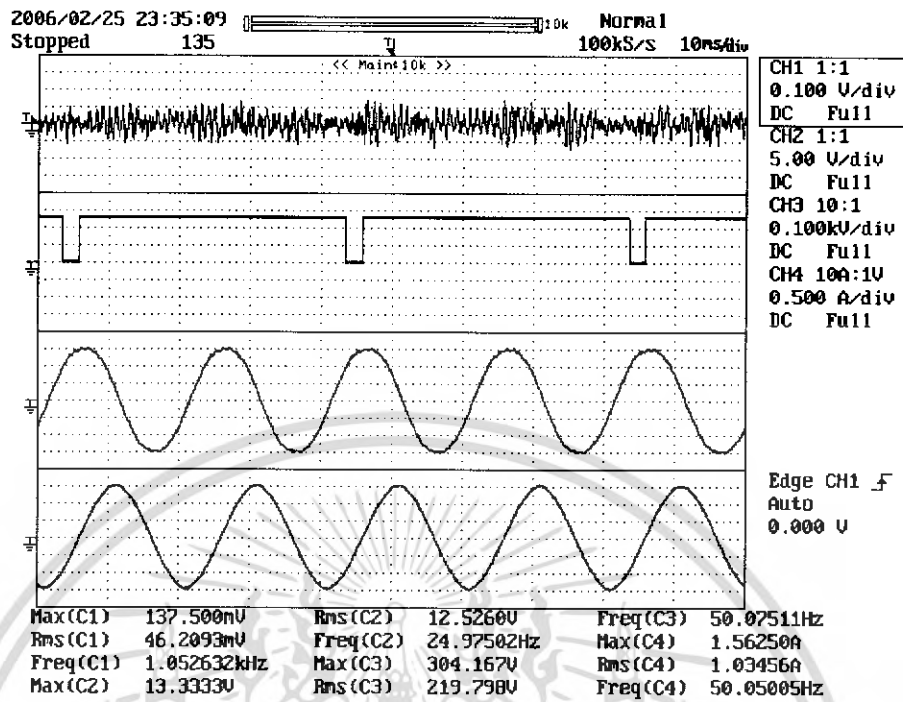
รูปที่ 4.64 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบบรีจันรูดเล็กรีจันรูด



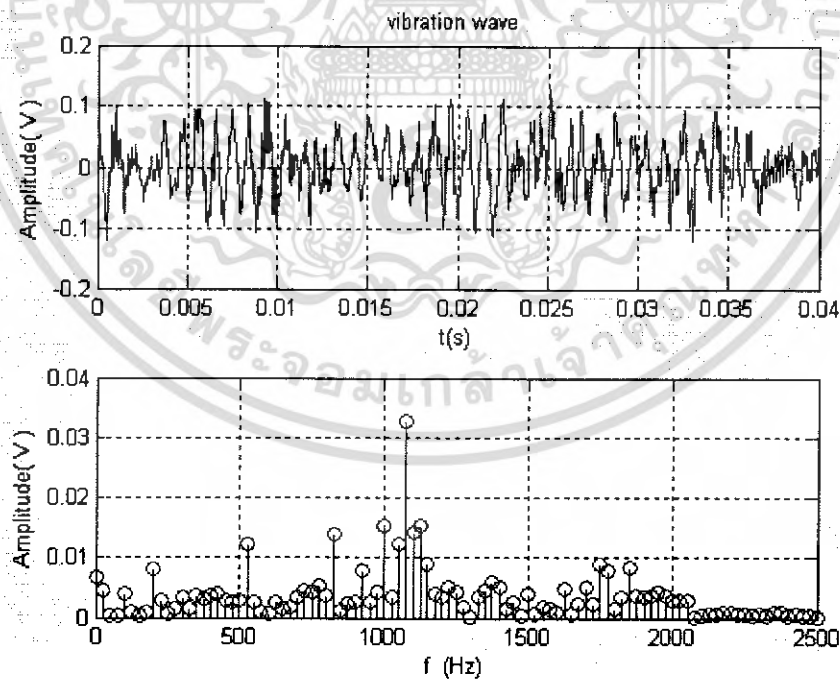
รูปที่ 4.65 แสดงสเปกตรัมการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบบรีจันรูดเล็กรีจันรูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบริ่งตัวใหญ่เสีย



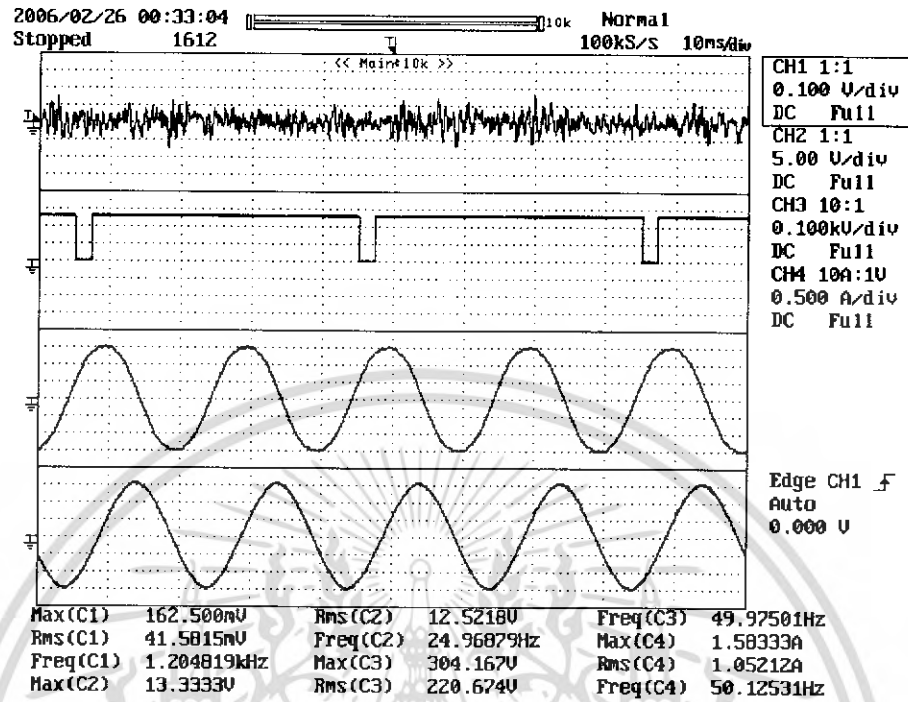
รูปที่ 4.66 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวใหญ่ชำรุด



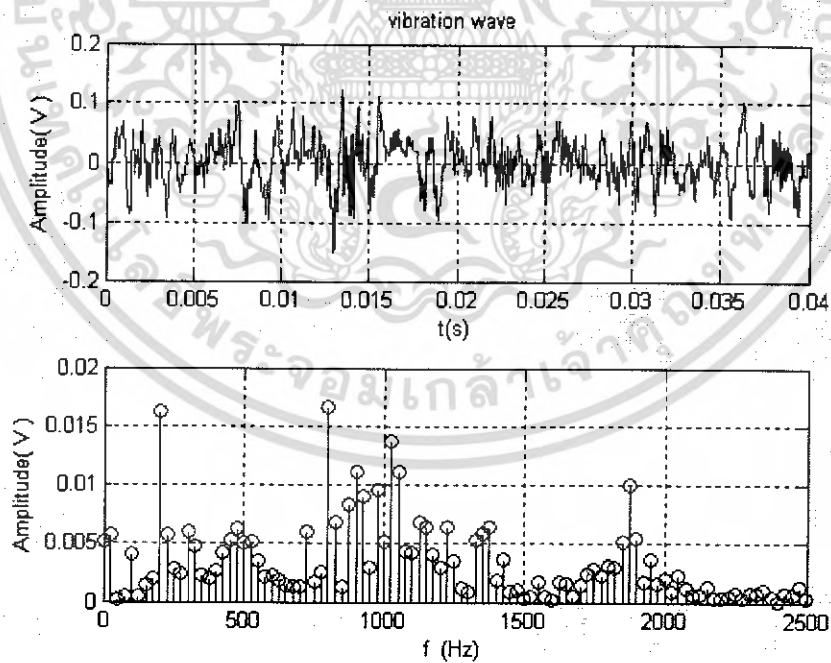
รูปที่ 4.67 แสดงสเปกตรัมการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวใหญ่ชำรุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบริ่งตัวใหญ่และตัวเล็กเสีย



รูปที่ 4.68 แสดงรูปคลื่นการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวใหญ่และตัวเล็กชำรุด



รูปที่ 4.69 แสดงสเปกตรัมการสั่นสะเทือนเนื่องจากแบริ่งตัวใหญ่และตัวเล็กชำรุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 สรุปผลการทดลองแบร็งชาร์ด

ข้อบกพร่องของดัลบลูกปิ่น มักเกิดจากความเสียหายของพื้นผิวของรางลูกปิ่น ทั้งด้านนอกและด้านใน ตลอดจนเม็ดลูกปิ่น ทำให้เกิดจากการถูกเสียดสีกระแทกกันระหว่าง ลูกปิ่นหรือรางลูกปิ่น การสั่นสะเทือนมักเกิดที่ความถี่สูงกว่า ความเร็วรอบของเพลลา โดยที่ ความถี่ของการสั่นสะเทือนจะขึ้นอยู่กับว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นบนดัลบลูกปิ่นเกิดจากชิ้นส่วน ไหนของดัลบลูกปิ่นที่เป็นตัวชำรุด ทั้งนี้ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับดัลบลูกปิ่นจะมีสาเหตุ มากมาย เช่น ภาวะมากเกินไป การเยื้องแนวแกน การติดตั้งไม่ดี เป็นต้น

จากกราฟผลการทดลองจะเห็นว่ามึลักษณะการสั่นสะเทือนที่สำคัญคือ

- 1.ขนาดการสั่นสะเทือนไม่สม่ำเสมอ
- 2.มุมเฟสไม่สม่ำเสมอเห็นหลายจุด
- 3.ความถี่การสั่นสะเทือนมีค่าสูงมากเป็นหลายเท่าของ RPM



บทที่ 5

สรุป

จากการศึกษาการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้ทราบว่ามอเตอร์ขณะทำงานในสภาวะปกติจะมีขนาดการสั่นสะเทือนและเสียงขนาดต่ำในขณะที่มอเตอร์มีสภาพชำรุดหรือมีจุดบกพร่องขณะทำงานขนาดของการสั่นสะเทือนและเสียงจะมีขนาดสูงขึ้นตามขนาดของการชำรุดหรือบกพร่องดังนั้นจากความจริงข้อนี้จึงมักมีการใช้ขนาดของการสั่นสะเทือนและเสียงเป็นตัววินิจฉัยสภาพหรือปัญหาที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรเพื่อการบำรุงรักษา

จากการทดสอบได้จำลองสาเหตุการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เช่น Unbalance mechanical , unbalance electrical ,bearing ชำรุด แล้วนำผลการทดสอบคือสัญญาณการสั่นสะเทือนมาวิเคราะห์บนโดเมนความถี่โดยใช้โปรแกรม MATLAB ฟังก์ชัน FFT มาจำแนกสาเหตุการผิดปกติที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ด้วยโปรแกรม MATLAB ทำให้ทราบว่าแต่ละสาเหตุของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีขนาดต่าง ๆ กันอยู่ที่แต่ละความถี่ดังนั้นเราจะสามารถจำแนกสาเหตุการผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จากการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากหัววัดอัตราเร่ง Accelerometer

เอกสารอ้างอิง

- [1] มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, **คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์**, กรุงเทพฯ, สนพ. อินโฟเพรส, 2543.
- [2] มงคล ทองสงคราม, **เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ**, กรุงเทพฯ, บริษัท รามาการพิมพ์ จำกัด, 2535
- [3] ก่อเกียรติ บุญชูกุล, สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ, **การวิเคราะห์การสั้นสะท้อน การเผ่าตรวจและการจัดการบำรุงรักษา**, กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น),2540
- [4] ไชยชาญ หินเกิด, **เครื่องกลไฟฟ้า2 (ELECTRICAL MACHINES 2)**, กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย – ญี่ปุ่น), 2541
- [5] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., and Stephen D. Umans, **Electrical Machinery**, 6th Ed., Mc Graw Hill, 2003.
- [6] ผศ.น.ท.ดร.สุธรรม ศรีเกษม, น.ต.เมธินทร์ ทรงชัยกุล, และ ร.อ.สง่า ศรีศุภปรีดา, **MATLAB เพื่อการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม**, กรุงเทพฯ, นสพ.มหาวิทยาลัยรังสิต.
- [7] ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ, **MATLAB การประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมไฟฟ้า**, กรุงเทพฯ, สนพ.แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

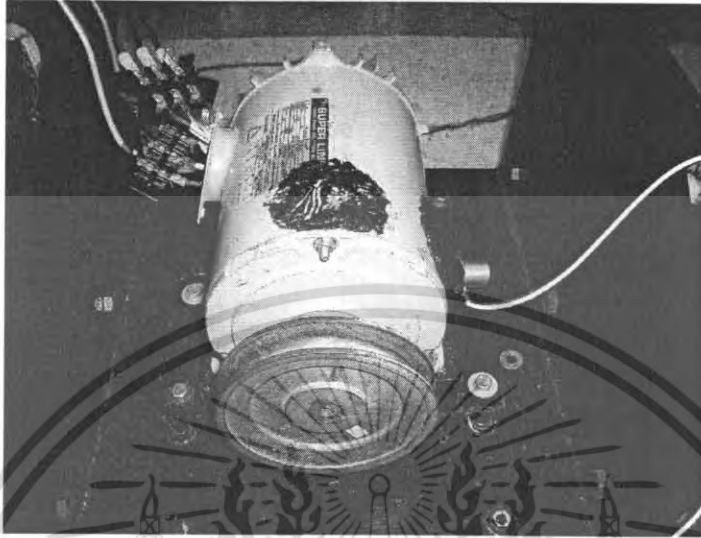


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

รายละเอียดของอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ

1.มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง



3 Phase induction motor

1 Hp 4 Pole 50 Hz

220/380 3.4/2.0 Amp

1400 Rpm

JIS C 4004

JP 44 JC 4

TYPE SF-JR

FRAME 80M

RATING CONT

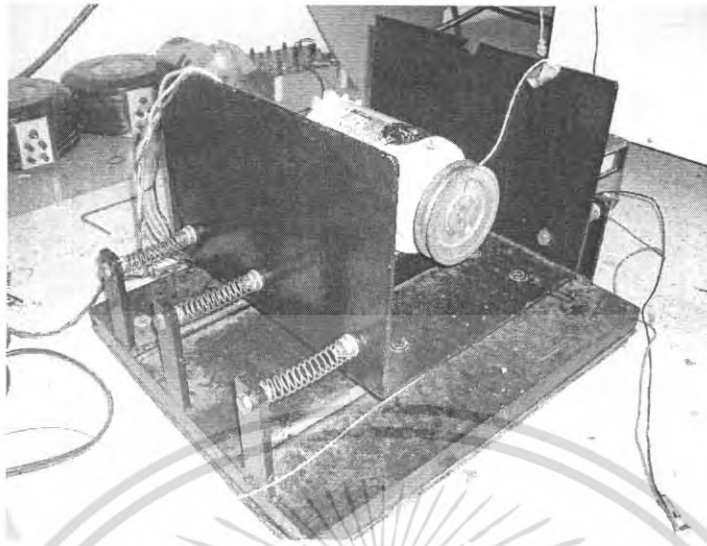
INCLASS B

AMP.TEMP 40 C

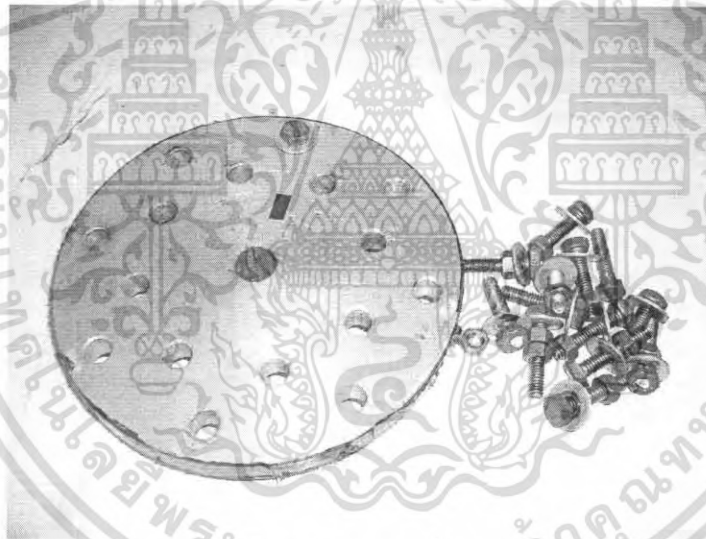
BEARING 6204-6203 ZZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แทนทดสอบการสั่นสะเทือน



3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ Unbalance mechanic

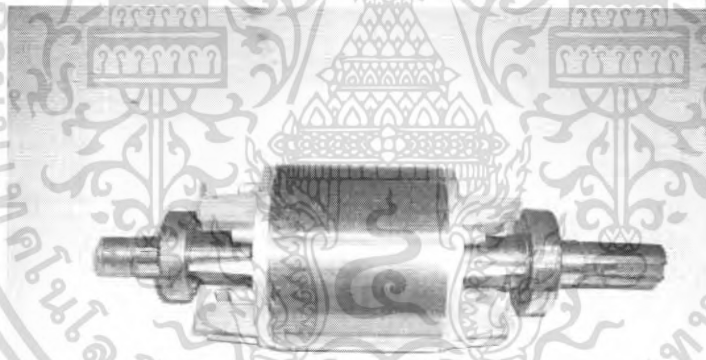


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ Unbalance electrical

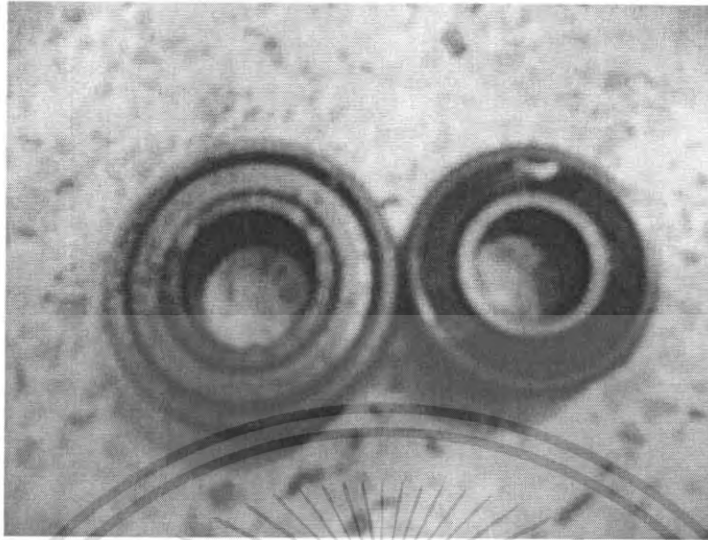


5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การ unbalance mechanic โดยใส่มวลที่โรเตอร์

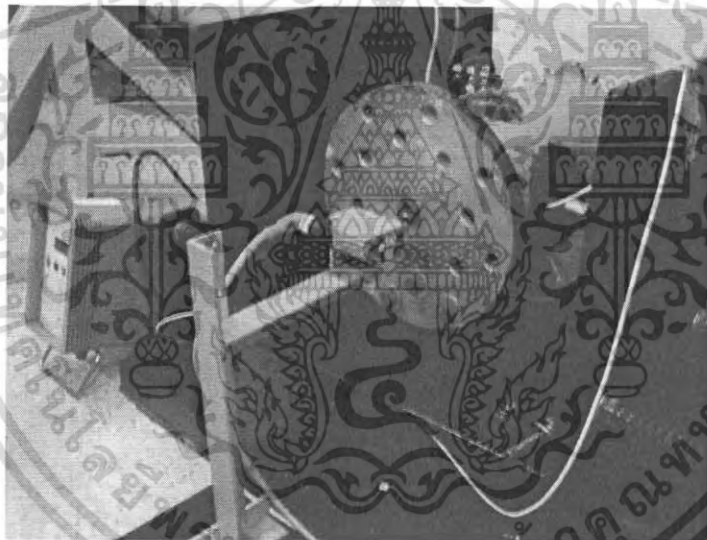


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แบร็งที่ซำรุดเสีหย



7. Photo switch

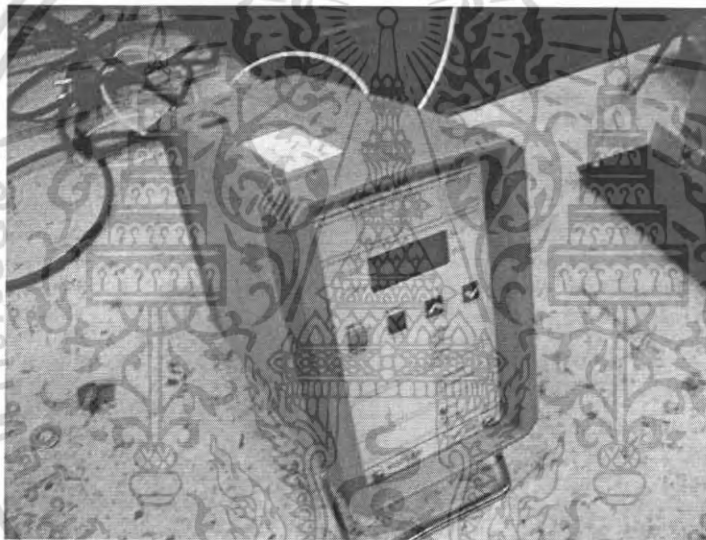


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

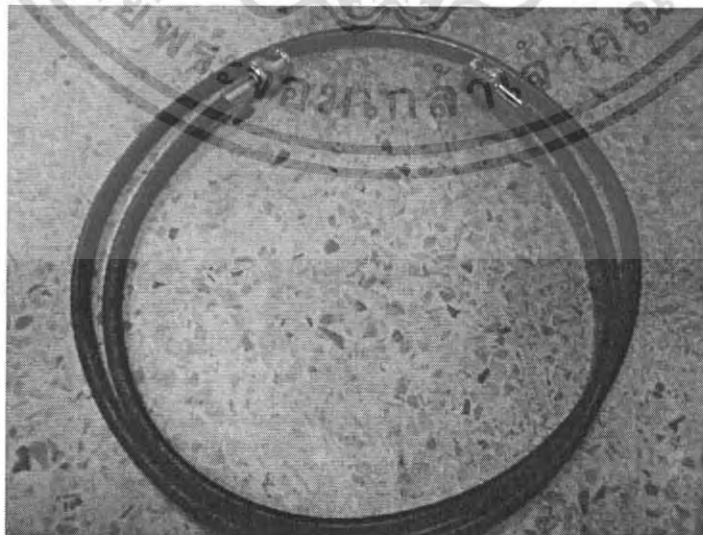
8. หัววัดการสั่นสะเทือน



9. เครื่องแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือน (Piezoelectric Sensor Power Supply & Signal Conditioner)



10. สายเคเบิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

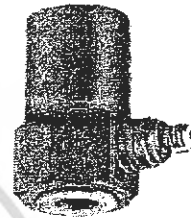
K-Shear™

Type 8710A...

Continuous Duty Voltage Mode Accelerometer

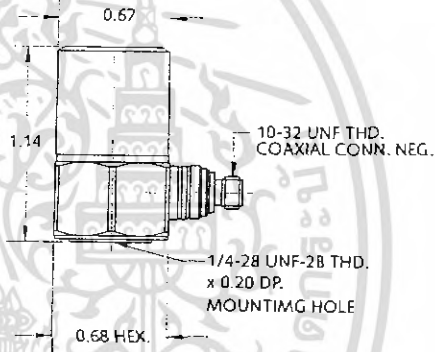
The 8710A50 accelerometer family of models measure vibration at mid range, high and low temperature extremes. Designed for continuous operation in extreme industrial environments, these rugged quartz accelerometers feature a totally welded hermetic construction.

- Low impedance voltage mode
- High (330°F) and low temperature (-320°F) versions
- Ultra-low thermal transient response
- Hermetically sealed
- Ground isolated
- Conforming to CE



Description

The 8710A50M1 base model, spans an operating temperature range of -65 to 250°F while the M5 high temperature version and the M8 low temperature version operate over a range of -65 to 330°F and -320 to 250 °F respectively. Both the 8710A50M5 and 8710M50M8 are light weight titanium units compared to the standard stainless steel 8710A50M1; one third less weight. Kistler's field proven K-Shear design ensures extremely low sensitivity to thermal transients, base strain and transverse acceleration. Quartz sensing elements afford the ultimate in long-term stability for years of repeatable and accurate measurements. A low impedance, voltage output is provided by the embedded Kistler Piezotron™ electronic impedance converter. This output allows for the use of inexpensive coaxial cable, while providing high noise immunity and insensitivity to cable motion. The low impedance output is also desirable for operation in a humid environment. A ground isolated base eliminates ground loops between the sensor and coupler electronics.



Mounting

Reliable and accurate measurements require that the mounting surface be clean and flat. The sensor can be attached to the structure by a single 1/4-28 mounting stud. The Operating Instruction Manual for the 8710A50 provides detailed information regarding mounting surface preparation.

Application

These sensors are ideal for testing applications where a rugged accelerometer with a wide frequency range is required. Due to the sturdy construction and high temperature characteristics of the 8710A50M5, it is well suited for many precision automotive, ESS and industrial applications. The high frequency response makes this accelerometer ideal for monitoring and analyzing gears and other high frequency producing machinery.

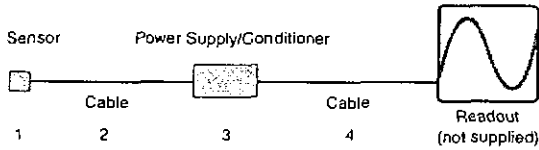
000-241a-01.03 (K8 8710)

Technical Data

Type	Units	8710A50M1	8710A50M5	8710A50M8
Acceleration Range	g	±50	±50	±50
Acceleration Limit	g _{pk}	±300	±300	±300
Transverse Acceleration Limit	g	±300	±300	±300
Threshold nom.	g _{rms}	0.002	0.002	0.002
Sensitivity ±10%	mV/g	100	100	100
Resonant Frequency mounted nom.	kHz	28	24	24
Frequency Response ±5%	Hz	0.3 ... 7000	1 ... 7000	1 ... 7000
±10%	Hz	0.1 ... 10000	0.5 ... 10000	0.5 ... 10000
Amplitude Non-linearity	% FSO	± 1	± 1	± 1
Time Constant nom.	s	1.5	1	1
Transverse Sensitivity typ. (max.)	%	1.5 (3)	1.5 (3)	1.5 (3)
Base Strain Sensitivity @ 250 µε	g/µε	<0.004	<0.004	<0.004
Shock Limit (1ms pulse width) max.	g _{pk}	2000	2000	2000
Long Term Stability	%	±1	±1	±1
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/°F	-0.016	-0.016	-0.016
Temperature Range Operating (4 mA supply current)	°F	-65 ... 250	-65 ... 330	-320 ... 250
Temperature Range Storage	°F	-100 ... 300	-100 ... 330	-320 ... 300
Output				
Bias nom.	VDC	11	11	11
Impedance	Ω	≤100	≤100	≤100
Voltage F.S.	V	±5	±5	±5
Current	mA	2	2	2
Source				
Voltage	VDC	20 ... 30	20 ... 30	20 ... 30
Constant Current	mA	2 ... 20	2 ... 20	2 ... 20
Impedance min.	kΩ	100	100	100
Construction				
Sensing Element	type	quartz/shear	quartz/shear	quartz/shear
Housing/Base	type	St. Stl	titanium	titanium
Sealing-housing/connector	type	hermetic	hermetic	hermetic
Connector	type	10-32 neg	10-32 neg	10-32 neg
Ground Isolation min.	MΩ	10	10	10
Weight	grams	43	29	29
Mounting Torque	lbf-in	18	18	18

1 g = 9.80665 m/s², 1 inch = 25.4 mm, 1 gram = 0.03527 oz, 1 lbf-in = 0.1129 Nm

Ordering Information



sp = specify cable length in meters

- 1 - 8710A50M1 mid temperature range accelerometer or
8710A50M5 high temperature (330°F) accelerometer
8710A50M8 low temperature (-320°F) accelerometer
- 2 - 1631Csp premium cable, 10-32 pos. to BNC pos.,
recommended for use with 8710A50M8
in low temperature applications
1761Bsp non low noise sensor cable, 10-32 pos.
to BNC pos.
- 3 - 5100 coupler series or dual mode amplifier
- 4 - 1511sp output cable BNC pos. to BNC pos.

Supplied Accessories

- 8410 mounting stud 1/4-28 to 10-32
- 8412 mounting stud 1/4-28
- 8421 mounting stud 1/4-28 to M8; supplied
only outside N. A.

Optional Accessories

- 8506 triaxial mounting cube
- 8456 mounting magnet

Piezotron™ Coupler

Type 5134A...

4 Channel Piezoelectric Sensor Power Supply & Signal Conditioner

A flexible, simple to use signal conditioner that provides excitation power, signal tailoring and acts as an interface between voltage mode piezoelectric and measuring instruments.

- RS-232C interface for remote control and monitoring
- Sensors circuit open/short alarm
- Non volatile memory for set parameters
- Seven selectable gains
- Four selectable low-pass filters
- Bias voltage monitors ON/OFF
- Conforming to CE

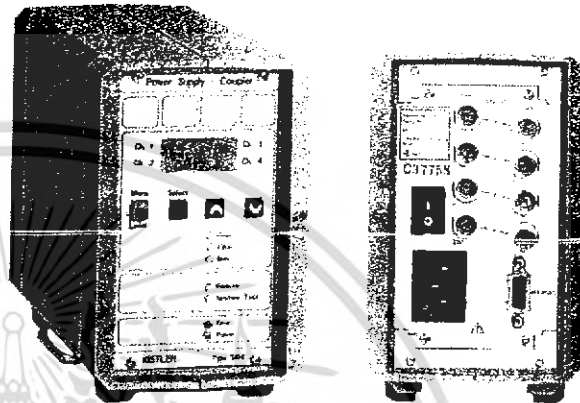
Description

The 5134A microprocessor controlled coupler provides power and signal processing to four channels of Piezotron, PiezoBeam™, K-Shear™ and Ceramic Shear Accelerometers or any voltage mode piezoelectric sensor operating with constant current excitation (2-wire system). An LCD display and keyboard allows easy selection of gain and filters for each channel individually. LED's show the unit's status and signal error in the case of a detected problem with bias voltage or the cable integrity. Additionally, the RS-232C interface allows remote control all functions of the unit. The unit's very low noise floor makes it particularly useful for general vibration lab use with single axis or triaxial accelerometers. The coupler is available for line power or 9 to 18 VDC operation. The four channel coupler can also be used in combination with an external impedance converter and a high impedance sensor.

The unit is housed in a DIN case or it can be conveniently rack mounted. The rear panel of the unit contains 4 BNC neg. input and output sensor signal connectors, a line power plug, power switch and an isolated 9-pin-D-sub RS-232C interface connector. The RS-232C feature of the 5134A addresses the system's micro-controller allowing for remote control of all coupler parameters including self test at power up. The command language follows easy-to-use SCPI format. Coupler status is readily available at any time through the serial interface. The interface is particularly useful for automatic measurements with a personal computer and a common data acquisition package.

Application

The primary use for the 5134A Power Supply/Coupler is to provide excitation power and signal conditioning for low impedance, voltage mode piezoelectric pressure, force or acceleration type sensors. The coupler is used in laboratory and field type measurement applications as either a single stand alone unit or with others mounted in a standard 19" rack.



Technical Data

Type	Units	5134
Sensor Supply Factory Set	mA	4
Optional	mA	2 ... 18
Gain Setpoints (±0.5 %)		1, 2, 5, 10, 20, 50
(±1 %)		100
Frequency Range (bandwidth -3 dB)		
Gain = 1 (30 kHz filter)	Hz	0.036 ... 30k
Gain = 100 (10 kHz filter)	Hz	0.036 ... 8k
Lowpass Filters		
2-pole Butterworth 2nd order	dB/octave	-12
Cut-off frequencies (-3 dB)	Hz	100, 1k, 10k, 30k
Frequency accuracy	%	±7
Highpass Filters (2 pole passive)	dB/octave	-12
Cut off frequency (-3 dB)	Hz	0.036
Time constant	s	3.5
Frequency accuracy	%	±10
System Test Signal:	type	white noise
Amplitude	mV _{rms}	10
Bandwidth	Hz	1 ... 30k
Flatness	dB	±10
Output:		
Voltage	V	±10
Current	mA	± 5
Impedance	Ω	100
Zero offset ⁽¹⁾	mV	<25

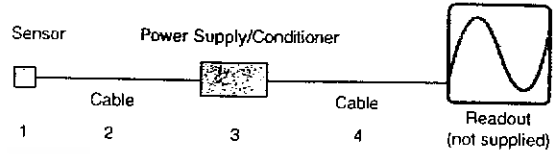
¹ 1 g = 9.80665 m/s², 1 inch = 25.4 mm, 1 gram = 0.03527 oz, 1 lbf-in = 0.1129 Nm

Technical Data

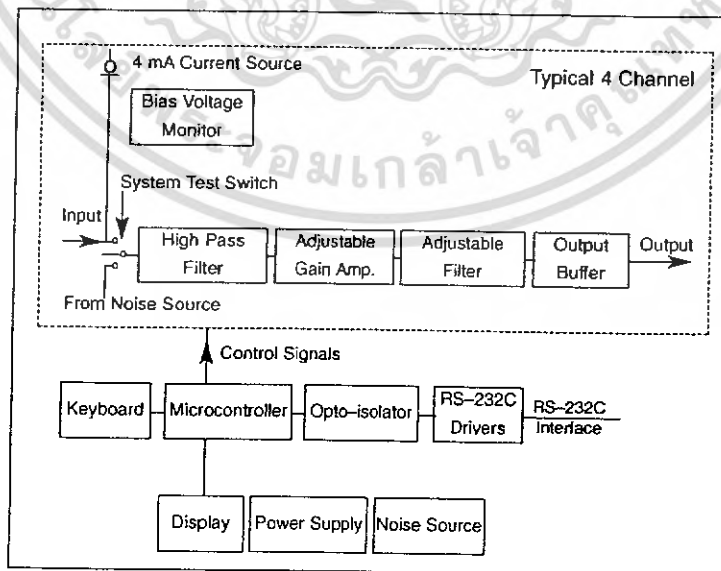
Type	Units	5134
Output Noise:		
Gain = 1 L.P filter @ 30 kHz	μV_{rms}	70
Gain = 100 L.P filter @ 10 kHz	μV_{rms}	<1500
Gain = 100 L.P filter @ 1 kHz	μV_{rms}	30
Display		LCD 16 char.
Interface	type	RS-232C
Baud Rates		150 ... 9600
# of Data/Stop Bit		8/1
Parity		none
Temperature Range Operating	$^{\circ}F$	32 ... 120
Temperature Range Storage	$^{\circ}F$	-5 ... 185
Humidity	%	10 ... 90
Voltage between power & ground	Vrms	<50
Dimensions:		
with case	in	3.7 x 5.6 x 7.7
without case	in	2.8 x 5 x 7.2
Power 5134...		
Line voltage	VAC	115 [A0 & A1] 230 [A0(E) & A1 (E)]
Line Frequency	Hz	48 ... 62
Consumption	VA	14
Power 5134M2		
Voltage	VDC	9 ... 18
Consumption (14 max.) typ.	VA	3.6
Weight (with housing)	kilograms	1.75

1 g = 9.80665 m/s², 1 inch = 25.4 mm, 1 gram = 0.03527 oz, 1 lbf-in = 0.1129 Nm

Ordering Information



- sp = specify cable length in meters
- 1 - sensor low impedance voltage mode sensor
 - 2 - 1761Bsp sensor cable
 - 3 - 5134A0 power supply/coupler; 110 VAC power without case
 - 5134A0(E) power supply/coupler; 220VAC powered without case
 - 5134A1 power supply/coupler; 110VAC powered with case
 - 5134A1(E) power supply/coupler; 220VAC powered with case
 - 4 - 1511sp output cable



Cables & Connector Adaptors

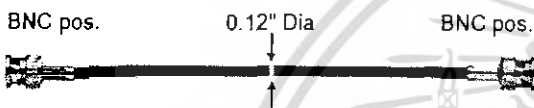
Type 1511 ... 1794

for Accelerometers And Selected Pressure & Force Sensors

Used with high impedance, charge mode; low impedance voltage mode and capacitive sensors.

Standard cable lengths are detailed in meters. User specified cable lengths are labels "sp".

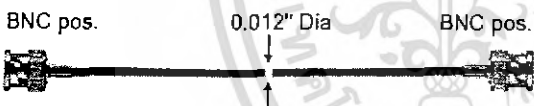
1511sp General purpose electronics output cable and low impedance, voltage mode sensor extension cable.



Non-low noise cable, polyethylene insulation & PVC jacket.

Temp. Range	°F	20 ... 160
Capacitance	pF/ft	20
Cable Lengths	m	1, sp

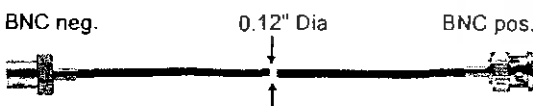
1601Bsp General use cable for high impedance, charge mode sensors.



Low noise cable, polyethylene insulation & PVC jacket.

Temp. Range	°F	20 ... 160
Capacitance	pF/ft	20
Cable Lengths	m	1, sp

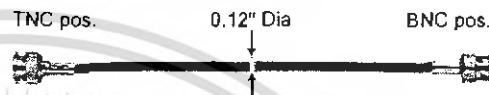
1603Bsp General use extension cable for high impedance, charge mode sensors.



Low noise cable, polyethylene insulation & PVC jacket.

Temp. Range	°F	20 ... 160
Capacitance	pF/ft	20
Cable Lengths	m	1, sp

1609Bsp General use cable for high impedance, charge mode sensors.



Low noise cable, polyethylene insulation & PVC jacket.

Temp. Range	°F	20 ... 160
Capacitance	pF/ft	20
Cable Lengths	m	1, sp

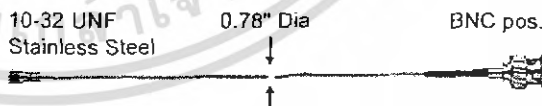
1631Aasp High temperature general use cable for high impedance, charge mode sensors.



Low noise cable, Teflon insulation & blue Teflon outer jacket

Temp. Range	°F	-320 ... 400
Capacitance	pF/ft	30
Cable Lengths	m	1, 2, 3, 5, sp

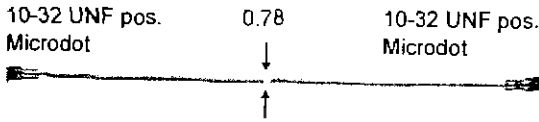
1631Csp High temperature general use cable for high impedance, charge mode sensors.



Low noise cable, Teflon insulation & green extruded Teflon outer jacket.

Temp. Range	°F	-320 ... 400
Capacitance	pF/ft	30
Cable Lengths	m	1, 2, 3, 5, 8, sp

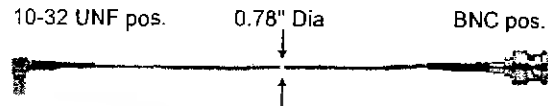
1635Asp High temperature general use cable for high impedance, charge mode sensors.



Low noise cable, Teflon insulation & green extruded Teflon outer jacket.

Temp. Range	°F	-320 ... 400
Capacitance	pF/ft	30
Cable Lengths	m	1, 2, 3, 5, sp

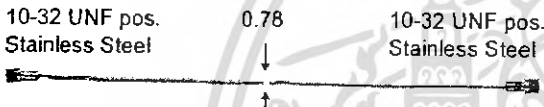
1641sp High temperature general use, right angle cable connector for high impedance, charge mode sensors.



Right Angle low noise cable, Teflon insulation & blue Teflon outer jacket.

Temp. Range	°F	-320 ... 400
Capacitance	pF/ft	30
Cable Lengths	m	sp

1635Csp High temperature general use cable for high impedance, charge mode sensors.



Low noise cable, Teflon insulation & green extruded Teflon outer jacket.

Temp. Range	°F	-320 ... 400
Capacitance	pF/ft	30
Cable Lengths	m	1, 2, 3, 5, 8, sp

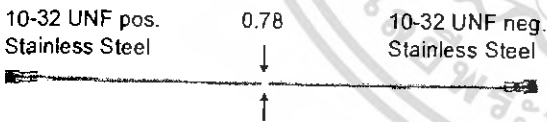
1761Bsp General use cable for low impedance, voltage mode sensors.



Non-low noise cable, Teflon insulation & white extruded Teflon outer jacket.

Temp. Range	°F	-320 ... 400
Capacitance	pF/ft	20
Cable Lengths	m	1, 2, 3, 5, sp

1637C5 High temperature general use cable for high impedance, charge mode sensors.



Low noise cable, Teflon insulation & green extruded Teflon outer jacket.

Temp. Range	°F	-320 ... 400
Capacitance	pF/ft	30
Cable Lengths	m	5

1762Bsp General use cable for low impedance, voltage mode sensors.



Non-low noise cable, Teflon insulation & white extruded Teflon outer jacket.

Temp. Range	°F	-320 ... 400
Capacitance	pF/ft	20
Cable Lengths	m	1, 2, 3, 5, sp

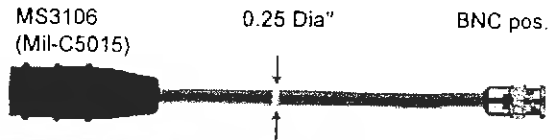
1770A3, 1770Asp, 1770Asp(x)M1 General purpose cable for low impedance, voltage mode accelerometer Type 8752A.



Non-low noise cable; aluminum with back-shell and strain relief. M1 pigtail option available.

Temp. Range	°F	< 250
Cable Lengths	m	3, sp

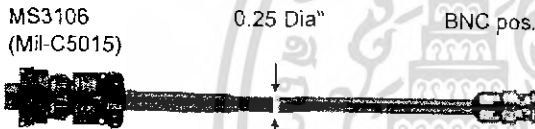
1778A3, 1778Asp, 1778Asp(x)M1 General purpose cable for low impedance, voltage mode accelerometer Type 8752A.



Non-low noise cable; silicon boot, quick disconnect, splash proof connector. M1 pigtail option available.

Temp. Range	°F	< 350
Cable Lengths	m	3, sp

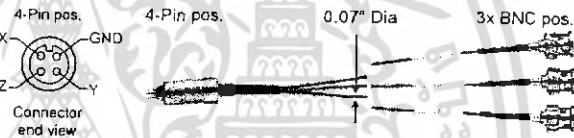
1772A3, 1772Asp, 1772Asp(x)M1 General purpose cable for low impedance, voltage mode accelerometer Type 8752A.



Non-low noise cable; aluminum with back-shell and strain relief. M1 pigtail option available.

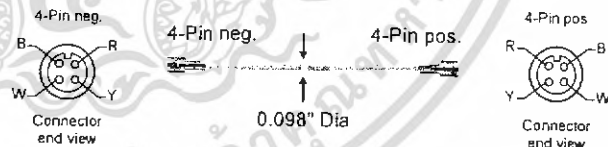
Temp. Range (°F):	< 350
Cable Lengths (m):	3, sp

1576 Signal break out cable for 8694M1 triaxial accelerometer.



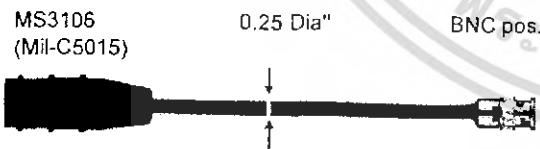
Temp. Range (°F):	< 212
Cable Lengths (m):	0.2

1578A2, 1578Asp Extension cable for accelerometer types 8305, 8324, 8690, 8692, 8694M1, 8762, 8792, 8793, 8794, 8795, 8798.



Temp. Range (°F):	< 212
Cable Lengths (m):	2, sp

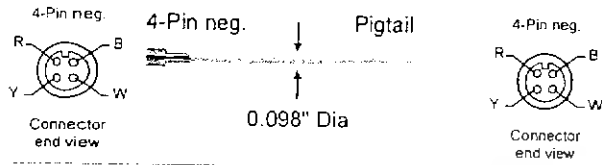
1776A3, 1776Asp, 1776Asp(x)M1 General purpose cable for low impedance, voltage mode accelerometer Type 8752A.



Non-low noise cable; silicon boot, quick disconnect, splash proof connector. M1 pigtail optional available.

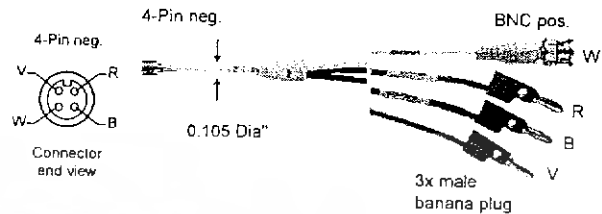
Temp. Range	°F	< 250
Cable Lengths	m	3, sp

1592A, 1592Asp Extension cable for accelerometer types 8305A(x)M4, 8310, 8312, connected to 5210 power supply.



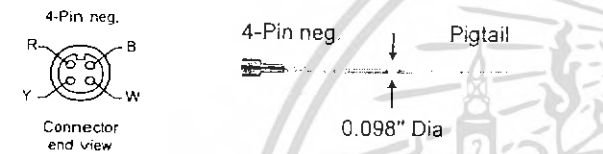
Temp. Range	°F	< 212
Cable Lengths	m	2, sp

1788A Signal/power supply cable for accelerometer type 8330.



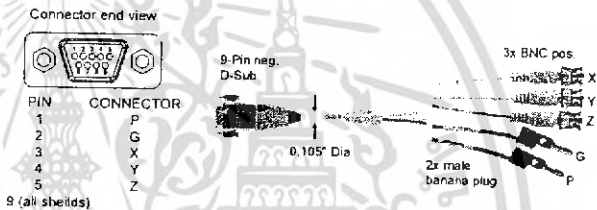
Temp. Range	°F	< 212
Cable Lengths	m	2, 5, 10, 20

1592M1, 1592M1sp Output cable for accelerometer types 8305A(x)M4, 8310, 8312, 8324, 8330A2.5.



Temp. Range	°F	< 212
Cable Lengths	m	2, sp

1794A2 Signal/power supply cable for accelerometer type 8393.



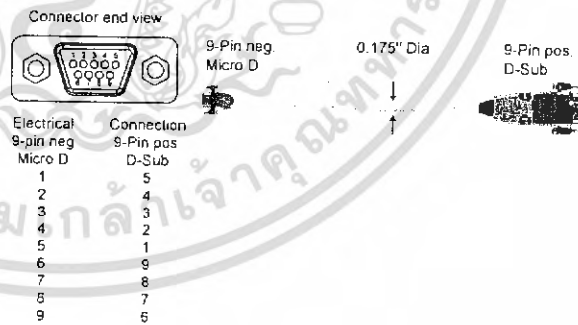
Temp. Range	°F	< 212
Cable Lengths	m	2

1756B Signal break out cable for triaxial accelerometers type 8690, 8692, 8791, 8793, 8794, 8795.



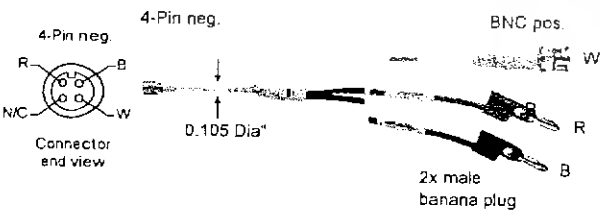
Temp. Range	°F	< 212
Cable Lengths	m	0.5, 3, 10, 20

1790A2 Mating cable for accelerometer type 8393.



Temp. Range	°F	< 212
Cable Lengths	m	2, 5, 10, 20

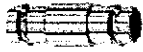
1786C Signal/power supply cable for accelerometer type 8310, 8838, 8840.



Temp. Range	°F	< 212
Cable Lengths	m	2, 5, 10, 20

1701 Connector Adaptor

BNC neg. BNC neg.



1702 Connector Adaptor

Solder terminals 10-32 pos.



1721 Connector Adaptor

10-32 neg. BNC pos.



1723 Connector Adaptor

10-32 neg. TNC pos.



1725 Connector Adaptor

10-32 neg. BNC neg.



1729 Connector Adaptor

10-32 neg. 10-32 neg.



1743 Connector Adaptor

BNC neg. BNC neg.



BNC pos.

