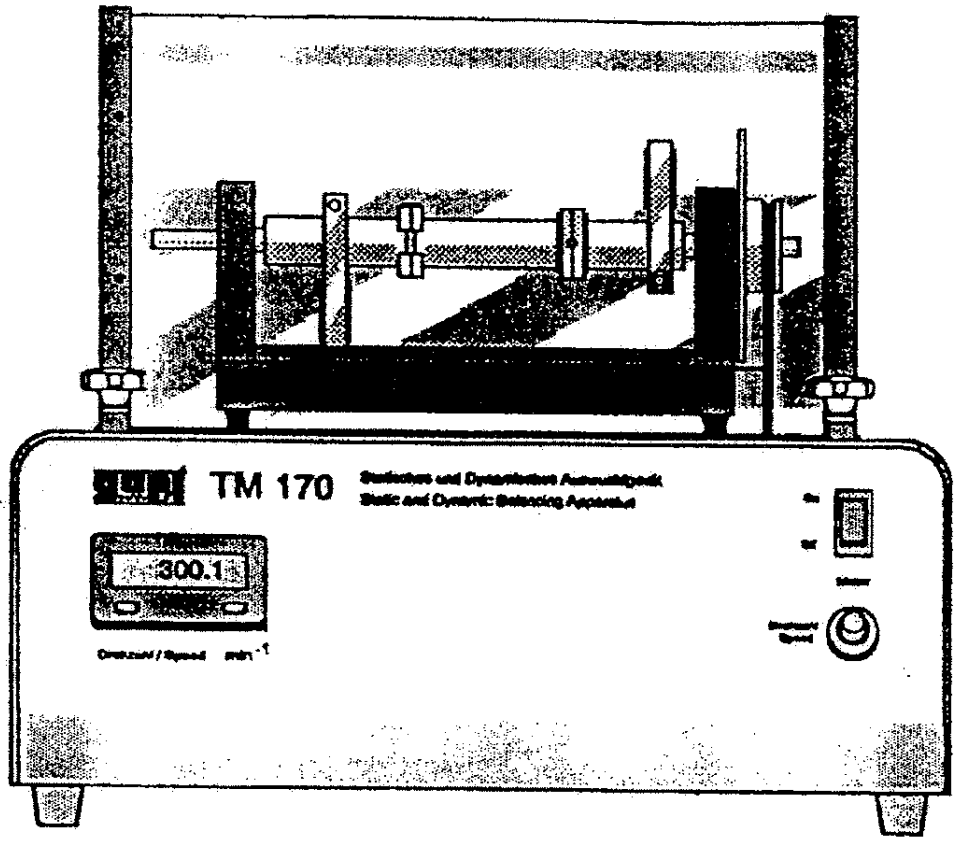
Static and Dynamic Balancing



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

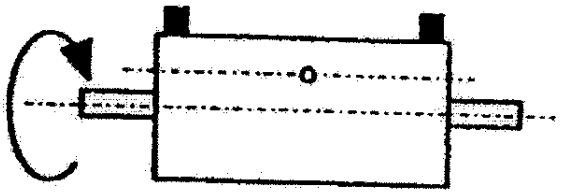
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Static and Dynamics Balancing

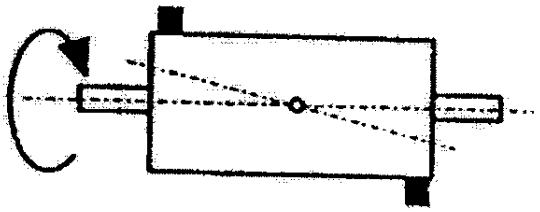
1. บทนำ

เครื่องทดสอบความสมดุล TM 170 ใช้สำหรับพิสูจน์ความสมดุล ความสมดุลเป็นปัญหาของงานวิศวกรรมในเครื่องจักร ที่ใช้ความเร็วรอบสูงๆ ชิ้นส่วนที่หมุนจะต้องมีความสมดุล ชิ้นส่วนที่มีความสมดุลไม่เพียงพอจะทำให้เกิดแรงเฉื่อนขึ้น ซึ่งมีความสำคัญมาก เป็นผลทำให้เกิดความเครียดใน Bearing การสั่นสะเทือนเกิดเสียงดัง ซึ่งจะทำให้เครื่องจักรเสียหายได้ เช่น



Rotor with static unbalance

- ล้อรถยนต์
- มอเตอร์
- ล้อหินเจียระไน
- กังหัน

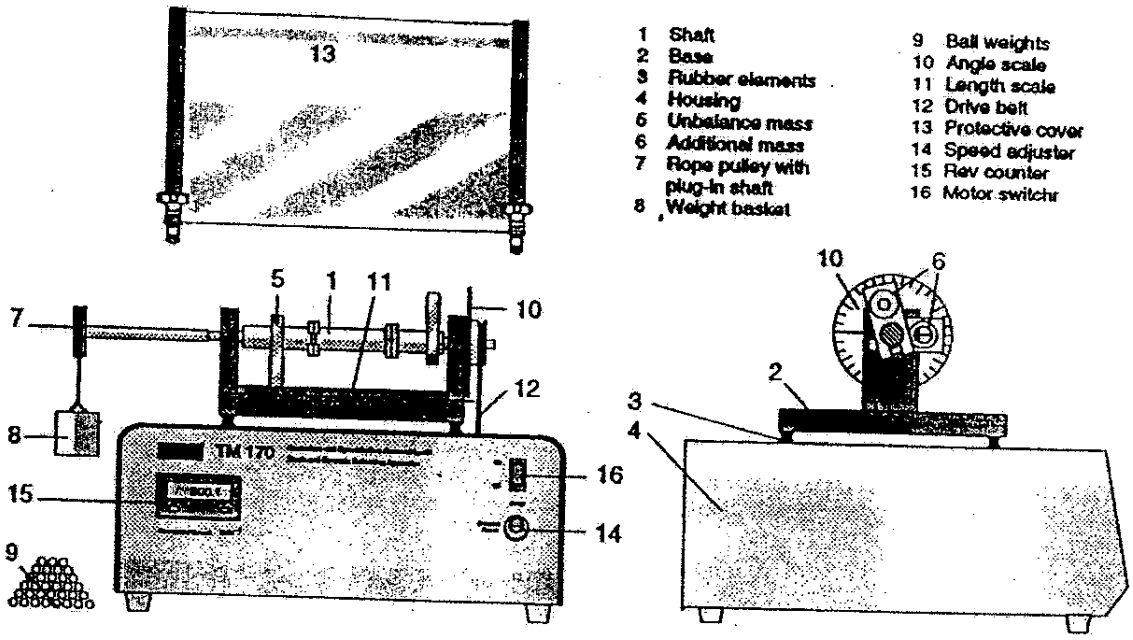


Rotor with dynamicunbalance

เครื่องทดสอบนี้ สามารถที่จะแสดงให้เห็นระหว่าง Static Dynamic หรือ General Unbalance โดย การสั่นสะเทือน ของเครื่องเมื่อมีความไม่สมดุลเกิดขึ้น และเครื่องนี้ได้ติดตั้งเครื่องวัดรอบแบบ Digital ไว้เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของความสมดุลได้อย่างชัดเจน

2. ส่วนประกอบ

เครื่องทดสอบความสมดุลประกอบด้วย เพลา ซึ่งมีลักษณะเรียบ (1) Unbalance Masses (5) ใช้ประกอบยึดในตำแหน่งต่างๆ บนแกนเพลาได้ตามต้องการ ซึ่งเพลาจะใช้เป็นตัวอ้างอิงของ Rotor ตัวรองรับ Rotor จับยึดอยู่บนแท่น (2) ประกอบอยู่บนแท่นเครื่อง (4) โดยมียางป้องกันการสั่นสะเทือนรองรับอยู่ (3) ตัว Rotor จะถูกขับผ่านสายพาน (12) และตัวปรับความเร็วมอเตอร์ จะอยู่แท่นเครื่อง (4) สวิตช์เปิดปิดมอเตอร์ (16) Potentio Meter มีอยู่ 10 ระดับ (14) ความเร็วที่สามารถใช้ได้อยู่ที่ 0 – 1400 min^{-1}



ความเร็วของ Rotor วัดได้โดย Digital rev. Counter (15) Angle Scale (10) และ Length Scale (11) ใช้สำหรับตั้ง Unbalance Masses ได้ในตำแหน่งที่แน่นอน Rope Pulley (7) สามารถถอดเข้าออกได้ และ Weight Basket (8) ใช้สำหรับวัดความไม่สมดุล อุปกรณ์เพิ่มน้ำหนัก (6) สามารถประกอบได้ใน Unbalance Masses (6) ได้ Protective Cover (13) ใช้สำหรับป้องกันอุบัติเหตุจากการสัมผัสชิ้นส่วนที่หมุนของเครื่อง

3. ความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน

ผู้ปฏิบัติจะต้องเคารพกฎอย่างเคร่งครัด

ความเร็วของ Rotor มีถึง 1400 min^{-1}

ชิ้นส่วนที่หมุนมีความคมมาก ซึ่ง Unbalance Masses หมุนด้วยความเร็วมากกว่า 7.5 m/s

3.1 กฎความปลอดภัย

อันตราย

- อาจไดรับบาดเจ็บจากชิ้นส่วนที่หมุน
- ห้ามจับชิ้นส่วนที่หมุนขณะเครื่องทำงาน
- ห้ามผู้ปฏิบัติการกับเครื่อง ถอด Protective Coverออกและต้องแน่ใจว่าได้ล็อคไว้แล้ว
- เมื่อจะทำงานกับชิ้นส่วนของ Rotor จะต้องปิดสวิตซ์มอเตอร์ทุกครั้ง

อันตราย

- อาจไดรับบาดเจ็บจากชิ้นส่วนที่หลุดลอยออกมา
- ต้องแน่ใจว่า Additional Masses ถูกยึดไว้อย่างมั่นคงแล้ว

อันตรายจากไฟฟ้าช็อต

- ถอกปลั๊กทุกครั้ง เมื่อต้องการเปลี่ยนฟิวส์ หรือเปิดหลังเครื่อง
- การทำงานกับระบบไฟฟ้าจะต้องทำโดยผู้ที่มีความรู้
- ต้องแน่ใจว่า ฟิวส์ที่เปลี่ยนมีขนาด 800 mA

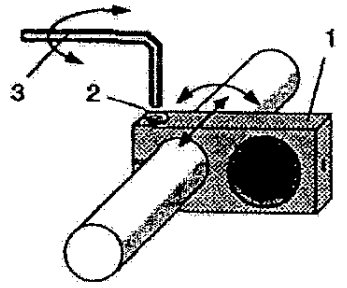
ระวัง

- การให้เครื่องหมุนด้วยความเร็วรอบสูงๆ ขณะทีมีความไม่สมดุล สามารกทำให้ Bearing Overload ให้ระวังเครื่องจะสั่นอย่างรุนแรง
- ในการถอดประกอบ Plus – in shaft ต้องให้เครื่องหยุดหมุนเสียก่อน
- ต้องตั้ง adjuster ที่ 0 ทุกครั้งก่อนเปิดสวิตซ์มอเตอร์ มิฉะนั้นจะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงทันที

- ถ้าความไม่สมดุลเพิ่มมากขึ้น โดยที่เราไม่รู้ จะสังเกตเห็นเครื่องสั่นในขณะที่ความเร็วช้ากว่าปกติที่ควรจะเป็น
- ต้องได้รับอนุญาตก่อนเข้าทำงานทุกครั้ง

3.2 การใช้งาน

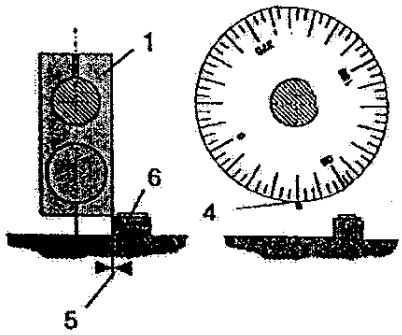
3.2.1 การจัด Unbalance Masses



Unbalance Masses (1) สามารถที่จะเคลื่อนย้ายไปตำแหน่งต่างๆ ของเพลาตามความต้องการ หลังจากที่คลาย Clamping screw (2) โดยใช้ประแจแอลหกเหลี่ยมขนาด 3 mm (3)

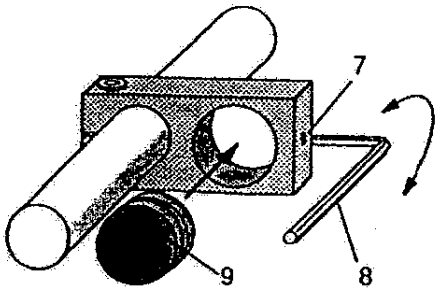
การตั้งมุมของ Unbalance Masses

- ใส่สายพานขับ
- จุดตั้งมุม (4) จะติดอยู่ที่ตัวจับเพลา
- หมุน Unbalance Masses (1) โดยให้ขอบตั้งฉากกับบรรทัดวัดความยาว (5) ล็อคสกรูให้แน่น หลังจากนั้นก็ เช็คมุมอีกครั้ง เพื่อความแน่ใจ



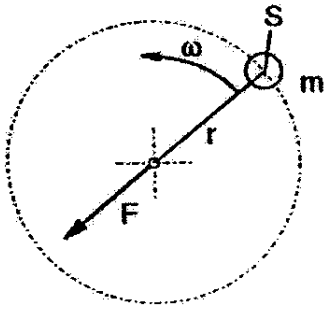
ระวัง การจับยึด ต้องแน่ใจว่าถูกต้องและมั่นคง การจับยึดบนตำแหน่งต่างๆ ของเพลา สามารถตั้งได้โดยใช้บรรทัดวัดความยาว

3.2.2 การเปลี่ยน Additional Masses



- Additional Masses (6) เปลี่ยนหรือประกอบโดยคลาย Clamping screw (7) โดยใช้ประแจแอลหกเหลี่ยมขนาด 2 mm (8)
- ขัน Clamping screw ให้แน่น โดยให้ screw อยู่ในร่อง v-slot ของ Additional Masses

4. การทดลอง

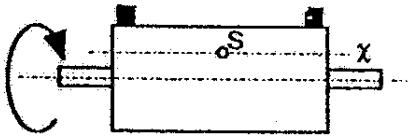


การสรุปผลการทดลองในขั้นแรก ในจำนวนเงื่อนไขของ Unbalance มี Rotor ของ Unbalance มี Center of gravity เคลื่อนที่เป็นวงกลม จะทำให้เกิดแรงหนีออกจากศูนย์กลาง และโมเมนต์ขึ้น ในการเพิ่มน้ำหนักต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ด้วย แรงหนีศูนย์กลาง รัศมีของวงกลม มุมและความเร็วดังสมการ

$$F = mr\omega^2$$

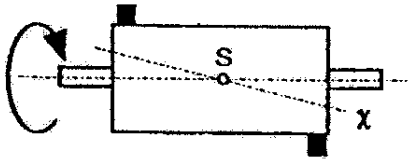
กำลังที่เหวี่ยงจากศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้น โดยยกกำลังสองของความเร็ว ความสมดุลที่ดีมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะสำหรับเครื่องจักรที่ใช้ความเร็วสูงๆ

ลักษณะของ Unbalance



Staticunbalance

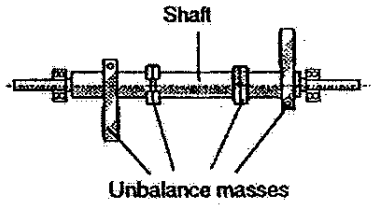
- Static unbalance center of gravity s อยู่นอกแกนของ Rotor อย่างไรก็ตาม ตามกฎของแรงเฉื่อย χ จะอยู่ขนานกับปอกของ Unbalance แรงของ Unbalance เป็นผลให้เกิดความไม่สมดุล



Dynamic unbalance

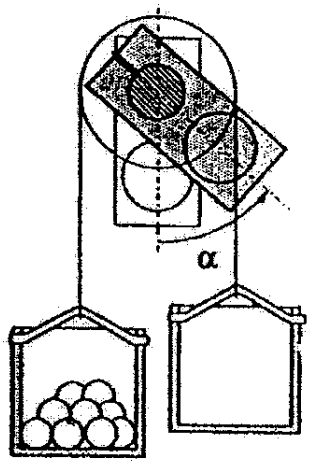
- Dynamic unbalance center of gravity s อยู่บนแกนของ Rotor อย่างไรก็ตาม ตามกฎของแรงเฉื่อย χ ที่ทแยงกับแกนของ Rotor เป็นเหตุให้เกิดการหมุนที่ไม่สม่ำเสมอ

การวัดขนาดของ Static unbalance โดยให้ Center of gravity ไปอยู่ในตำแหน่งต่ำสุดของ Rotor แล้วทำให้ Unbalance ลดน้อยลง เมื่อ Rotor ไปหยุดยังตำแหน่งใด ก็จะได้มุมของแต่ละตำแหน่งและสามารถคำนวณหาขนาดได้



Dynamic unbalance ไม่สามารถที่จะวัดได้ เพราะ Center of gravity อยู่บนแกนของ Rotor การหมุนของ Rotor จะหมุนอย่างไม่สม่ำเสมอ เพราะแรงที่เกิดขึ้นตามแนวยาวของแกนเพลาซึ่งเกิดขึ้นจาก Unbalance Moment ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ Rotor หมุนเท่านั้น **กรณีทั่วไปของความไม่สมดุล จะมีทั้ง Static และ Dynamic unbalance อยู่ด้วยกัน**

4.1 การหาขนาดของ Unbalance

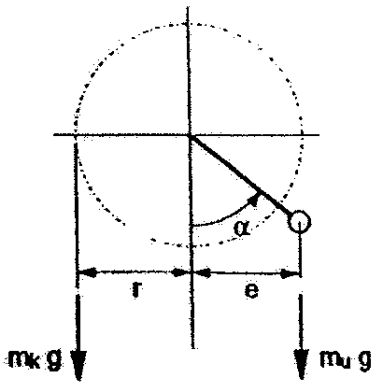


ขั้นแรกของการหา ต้องรู้ว่า Unbalance Masses มีอยู่ 2 ชนิด โดยดูได้จาก

- Unbalance Masses ที่ไม่สามารถเพิ่มเข้าไปได้
- Unbalance Masses ที่ใช้เพิ่มเข้าไป

การทดลองต่อไปนี้ เพื่อหาตำแหน่งและขนาดของ Unbalance Masses ทั้งสอง โดยนำเอาน้ำหนักของ Additional Masses ด้านข้างทั้งสองของ Rotor ออกแล้ว นำน้ำหนักที่เหลืออยู่ 2 ตัว ไปไว้ตรงกลางเพลา การหาค่า Unbalance ในขั้นแรกจะให้ Unbalance ที่จะวัดอยู่ในตำแหน่งล่างสุด แล้วใช้ Rope pulley ติดกับ Rotor ที่ Pulley จะติด Weight basket เพื่อเพิ่มน้ำหนักเข้าไป จะทำให้ Rotor หมุนไปเป็นมุม α ซึ่งตำแหน่งใหม่นี้ จะเป็นสภาพที่เกิดสมดุลขึ้น ความไม่สมดุล สามารถคำนวณได้จาก

$$\sum M = 0 = m_k gr - m_u e \sin\alpha$$



m_k เป็นมวลของน้ำหนัก Ball

r เป็นรัศมีของ Cable pulley

m_u เป็นมวลของ Unbalance

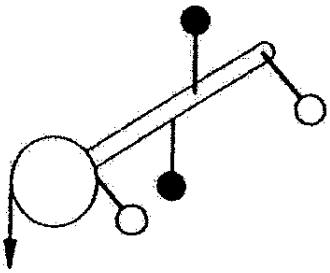
e เป็นระยะของ m_u มายังจุดศูนย์กลางของเพลาขณะที่มีมุม α มวลของ Unbalance และระยะ e จะรวมกันมีค่า เท่ากับ U จะได้สมการ $U = m_u e$

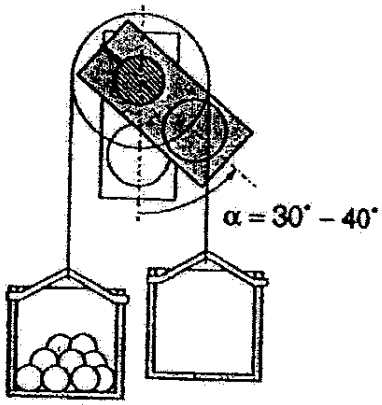
ดังนั้นความไม่สมดุล หาได้จาก

$$U = \frac{m_k r}{\sin\alpha}$$

4.1.1 ขนาดของ Unbalance (Minor Unbalance U_l)

การทดลอง





- เคลื่อน Small Unbalance Masses ไปยังตำแหน่งที่ปลายเพลาทั้งสองตัว ให้อยู่ในตำแหน่ง 0 องศา
- เคลื่อน Large Unbalance Masses ไปไว้ตรงกลางเพลาในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน 180 องศา
- ปลดสายพานออก
- ติด Rope pulley
- ติด Rope baskets ให้ Small Unbalance ตั้งฉากกับพื้น เพื่อให้อ่านค่ามุมได้ 0 องศา
- ใส่ลูกบอลในห่วงใบที่ 1 จนกระทั่งได้มุมประมาณ 30 – 40 องศา

ผลการทดลอง

ลูกบอล ลูกละ 3 กรัม จำนวน.....

มุม α = ...

มวลของลูกบอล m_k = ...

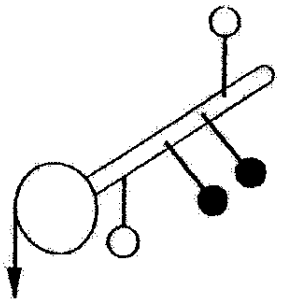
r เป็นรัศมีของ Rope pulley = 3.33 cm

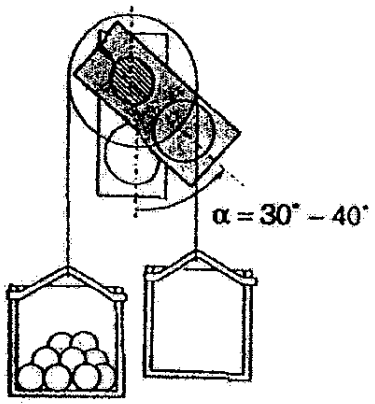
ผลของ Unbalance ทั้งสอง ประมาณได้โดย

$$U_l = \frac{m_k r}{2 \sin \alpha} = \text{.....} \text{ cmg}$$

4.1.2 ขนาดของ Unbalance (Major Unbalance U_A)

การทดลอง





- เคลื่อน Large Unbalance Masses ทั้งสองไปยังตำแหน่ง 0 องศา
- เคลื่อน Small Unbalance Masses ให้อยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกัน 180 องศา เป็นผลให้โมเมนต์เท่ากัน
- ถอดสายพานออก
- ติด Rope pulley
- ติด Rope weight baskets ให้ Large Unbalance Masses อยู่ในตำแหน่งที่ตั้งฉากกับพื้น ซึ่งอ่านค่ามุมได้ 0 องศา
- ใส่ลูกบอลในห่วงใบที่ 1 จะทำให้ Rotor เคลื่อนมายังตำแหน่ง ที่เหลือเพิ่มลูกบอลไปเรื่อยๆ จนกระทั่งอยู่ในตำแหน่งมุมประมาณ 30 – 40 องศา

ผลการทดลอง

ลูกบอล ลูกละ 3 กรัม จำนวน.....

มุม α = ...

มวลของลูกบอล m_k = ...

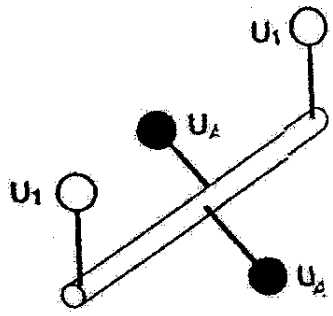
r เป็นรัศมีของ Rope pulley = 3.33 cm

ผลของ Unbalance ทั้งสอง ประมาณได้โดย

$$U_A = \frac{m_k r}{2 \sin \alpha} = \text{.....} \text{ cmg}$$

4.2 Static Unbalance

การทดลอง



Static unbalance with 0° offset of unbalance masses

- จับ Small Unbalance Masses U_1 ทั้งสองตัวที่ปลายของเพลา ให้อยู่ในตำแหน่ง 0 องศา
- จับ Large Unbalance Masses U_A ทั้งสองตัวที่กลางเพลาโดยหันให้ทิศทางตรงข้ามกัน 180 องศา
- ถอดสายพานขับออก แล้วหมุน Rotor ด้วยความเร็วช้าๆ

ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

ผลของ Unbalance จะแสดงออกมา เมื่อมีความเร็วสูงๆ

- ใส่สายพานขับ
- ติดตั้ง Cover และล็อคให้แน่น
- เปิดสวิตซ์มอเตอร์
- ระวังการหมุนของมอเตอร์

ผลการทดลอง

.....

.....

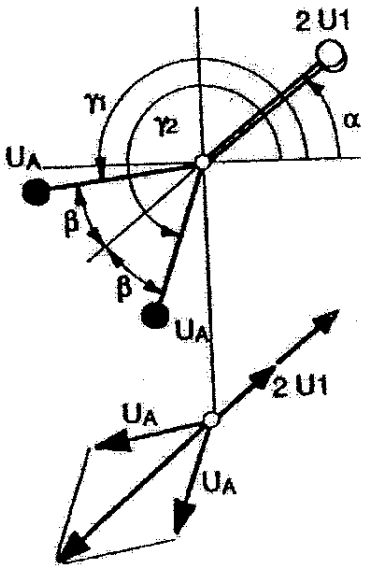
.....

.....

.....

.....

การสมดุลโดยใช้มวล Balance U_A สองก้อน



การแสดงสมดุลโดยใช้ Large Unbalance Masses U_A ทั้งสองตัว การหาตำแหน่งของ U_A ตำแหน่งของ U_A มีผลต่อ U_1 ซึ่งจะต้องเท่ากัน จึงจะอยู่ในสภาพสมดุล โดยหาได้จากสมการ

$$\Sigma F = 0 = 2U_1\omega^2 - 2U_A\omega^2\cos\beta$$

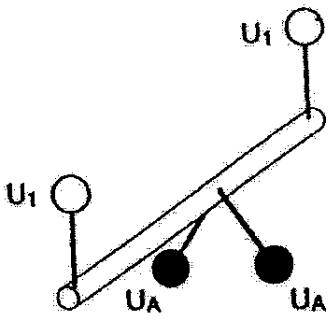
การคำนวณหามุม β ซึ่งอยู่ระหว่าง Unbalance Masses U_A สามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \cos^{-1}\frac{U_1}{U_A} = \text{.....}$$

มุมทั้งสองที่จะอยู่ในตำแหน่งความสมดุล

$\gamma_1 = \alpha + 180 - \beta =$ .....

$\gamma_2 = \alpha + 180 + \beta =$ .....



Balanced static unbalance

ทดสอบเดินเครื่องหลังจากที่ปรับปรุง Unbalance Masses U_A/ U_1 ให้ระวังการตั้งค่าต่างๆ เพราะมีผลต่อการสั่นสะเทือน เมื่อใช้ความเร็วสูง

ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

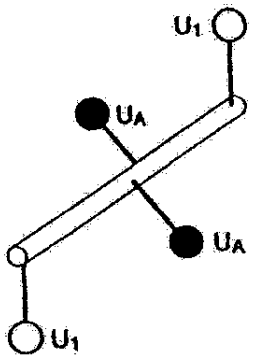
.....

.....

.....

4.3 Dynamic Unbalance

การทดลอง



Dynamic unbalance with 180°-offset of unbalance masses

- ให้ Small Unbalance Masses U_1 จับบนเพลาทั้งสองข้าง มีระยะ a = 190 mm ในทิศทางตรงข้ามกัน (180 องศา)
- Large Unbalance Masses U_A ทั้งสองตัวที่เหลืออยู่จับในตำแหน่งตรงกลางเพลาต่างกัน 180 องศา โดยไม่มีช่องว่างระหว่างกัน
- ถอดสายพานขับออก แล้วหมุน Rotor ด้วยความเร็วช้าๆ

ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

ผลของ Dynamic Unbalance จะแสดงออกมา เมื่อมีความเร็วสูงๆ

- ใส่สายพานขับ
- ติดตั้ง Cover และล็อคให้แน่น
- เปิดสวิตซ์มอเตอร์
- ระวังการหมุนของ Rotor โดยทันที

ผลการทดลอง

.....

.....

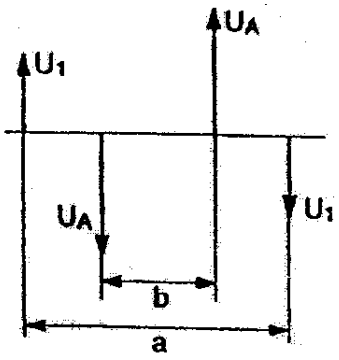
.....

.....

.....

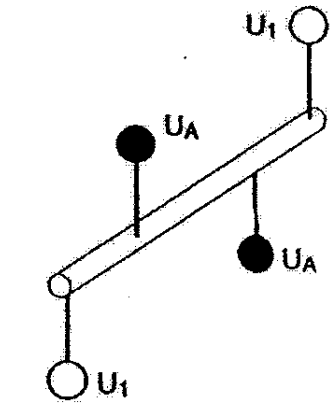
.....

การสมดุลโดยใช้มวล Balance U_A สองก้อน



โมเมนต์เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงหนีออกจากศูนย์กลางของ Unbalance Masses U_A จะถ่วงกับ Unbalance Masses U_1 ทำให้เกิดสภาพสมดุลขึ้น มีสิ่งเกี่ยวข้องคือ แรงหนี ศูนย์กลางของ Unbalance และ Unbalance Masses และระยะห่างของ a กับ b จะได้

$$\Sigma M = 0 = U_1 \omega^2 a - U_A \omega^2 b$$



Balanced dynamic unbalance

ให้ระยะ Unbalance Masses U_1 มีค่า a = 190 mm การคำนวณสิ่งที่จำเป็น คือ ต้องหาระยะ b ซึ่งอยู่ระหว่าง Unbalance Masses U_A จะได้

$$b = \frac{U_1}{U_A} a = \text{.....mm}$$

ความเร็วเชิงมุม ω สามารถหายไปหลังจากที่ทดสอบเดินเครื่อง และทำการปรับปรุง Unbalance Masses U_A / U_1 ให้ระวังการตั้งค่าต่างๆ เพราะมีผลต่อ Rotor เกิดการสั่นสะเทือนได้

ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

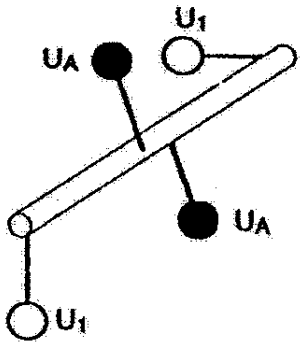
.....

.....

4.4 General Unbalance

เป็นชนิดที่มีทั้ง Static และ Dynamic Unbalance

การทดลอง



General unbalance with 90°-offset of the two unbalance masses

- นำ Unbalance Masses U_1 ทั้งสองไปติดที่ปลายของเพลา ให้ทำมุมกัน 90 องศา
- นำ Unbalance Masses U_A ทั้งสองติดไว้ตรงกลางเพลา ทำมุมกัน 180 องศา
- ถอดสายพานขับออก แล้วหมุน Rotor ด้วยความเร็วช้าๆ

ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

- ใส่สายพานขับ
- ติดตั้ง Cover และล็อคให้แน่น
- เปิดสวิตซ์มอเตอร์
- ระวังการหมุนของมอเตอร์โดยทันที

ผลการทดลอง

.....

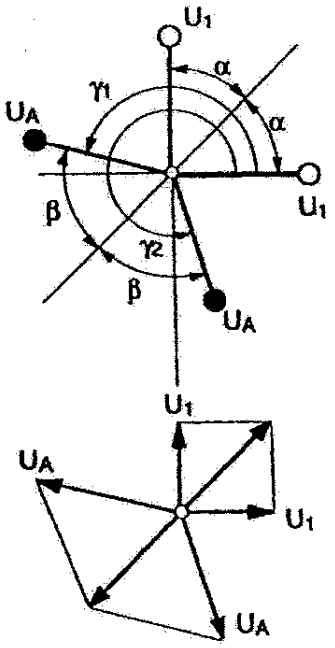
.....

.....

.....

.....

.....



ในการที่จะเกิดสภาพสมดุลขึ้นได้นั้น จำเป็นต้องมีเงื่อนไขเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อชดเชย General Unbalance ประกอบด้วย

- แรงของ Static Unbalance Component
- โมเมนต์ของ Dynamic Unbalance Component

Static Unbalance Component เป็นความสมดุล ซึ่งจะมีผลต่อแรงหนีออกจากศูนย์กลาง เพราะฉะนั้นการที่จะทำให้ได้สมดุลกันจะต้องมีการชดเชยความไม่สมดุล จากภาพได้สมการมุม $2\alpha = 90\ U_1$

และมุม 2β จะอยู่ระหว่างมวลของความไม่สมดุลทั้งสอง แต่เมื่อรวมแรงแล้ว แรง $2U_1 = 2U_A$ ดังสมการ

$$\Sigma F = 0 = 2\,U_1 \cos\alpha - 2\,U_A \cos\beta$$

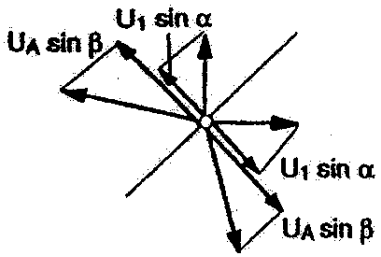
มุมที่กางออกของ β จะเป็นดังสมการ

$$\beta = \cos^{-1}\frac{U_1 \cos\alpha}{U_A} = \ldots\ldots\ldots\ldots$$

หามุม γ_1 และ γ_2 ได้จาก

$$\gamma_1 = \alpha + 180 - \beta = \ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$\gamma_2 = \alpha + 180 + \beta = \ldots\ldots\ldots\ldots$$



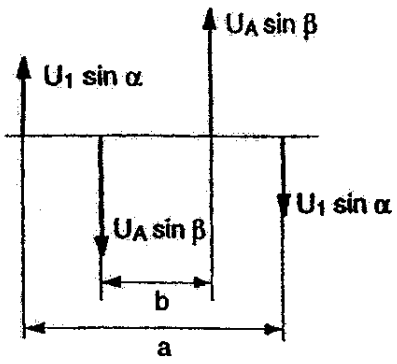
เมื่อปรับปรุงใหม่ก็จะมี Static Unbalance

Dynamic Unbalance Component สามารถที่จะชดเชยได้ด้วยระยะระหว่าง Unbalance Masses ทั้ง 2 ให้ได้สัดส่วนที่เท่ากัน โดยหาได้จาก

$$\Sigma M = 0 = U_1 \omega^2 \sin\alpha\, a - U_A \omega^2 \sin\beta\, b$$

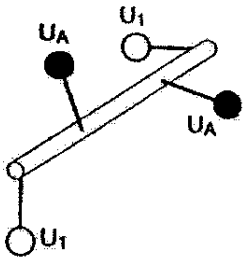
ให้ระยะ Unbalance Masses U_1 มีค่า a = 190 mm เมื่อต้องการ b จะได้

$$b = \frac{U_1 \sin\alpha}{U_A \sin\beta} a = \ldots\ldots\ldots\ldots\text{mm}$$



หลังจากที่ปรับปรุงใหม่แล้ว ทำการทดลองให้ระวังการตั้งค่าต่างๆ ด้วย

ผลการทดลอง



Balanced general unbalance

.....

.....

.....

.....

.....

.....