

Echilibrarea rotoarelor rigide

Bill Hillman, Ludeca, Inc, <http://www.reliableplant.com/Read/29478/field-balancing-rotors>
Traducere și adaptare ing. Carmen Popescu

"Dacă vrei să descoperiți secretele universului, trebuie să gândeți în termeni de energie, frecvență și vibrații."

Nikola Tesla

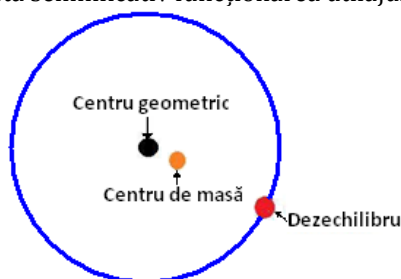
Credeți că am putea, ținând cont de spusesele lui Tesla, să interpretăm dezechilibrul rotorului ca fiind o risipă de energie datorată vibrațiilor dezvoltate în urma fenomenului menționat anterior? Rotoarele dezechilibrate sunt obstacole majore atât în atingerea performanțelor de funcționare ale utilajelor, cât și în îndeplinirea condițiilor de profit. Dezechilibrul reprezintă cauza unor vibrații de mare amplitudine, care determină și dezvoltarea altor defecte, ceea ce se concretizează în scăderea randamentului utilajelor, reducerea semnificativă a timpului de viață al acestora și risipă inutilă de energie. Pentru obținerea unor produse cu înalt nivel calitativ, conform cu normativele în vigoare și cu specificațiile clienților, este evident necesar ca utilajele de producție să funcționeze corespunzător. Dezechilibrul rotorului figurează ca fiind printre cele mai frecvente și mai severe defecte ale utilajelor, fapt recunoscut și de Institutul de Inginerie Mecanică și Civilă din Statele Unite. Prin urmare, soluționarea unui asemenea neajuns constă în efectuarea unei echilibrări corespunzătoare, ceea ce permite o funcționare corectă a utilajelor, cu implicații majore asupra producției.

Ce este un rotor rigid?

Rotorul care funcționează la o turație mai mică de 70% din turația sa critică, este considerat a fi un rotor rigid. Turația critică este turația la care apare fenomenul de rezonanță, prin excitarea frecvențelor proprii subsamblelor utilajului. În practică, 90% sau chiar mai mult dintre rotoare sunt rigide.

Ce este dezechilibrul?

Dezechilibrul rotorului se poate defini ca fiind situația în care centrul geometric și centrul de masă al unui rotor (cunoscut și ca centru de gravitație) nu coincid. În realitate, aceste două puncte nu coincid exact niciodată, dar scopul operațiilor de echilibrare este acela de a reduce dezechilibrul până când cel rezidual nu mai poate afecta semnificativ funcționarea utilajului.



Pentru a efectua echilibrări dinamice în limitele impuse de standardele în vigoare, tehnicienii își propun întotdeauna să aducă centrul de masă și centrul geometric cât mai aproape unul de celălalt. Oricum, în urma oricărei echilibrări va rămâne un dezechilibru rezidual.

Standarde de echilibrare

ISO și API sunt două dintre organismele specializate ale căror standarde de echilibrare se folosesc în mod curent. Există, însă, și companii care și-au definit propriile standarde? Până la urmă ce standarde ar trebui să folosim? Această decizie depinde de mai mulți factori, printre care importanța utilajului și timpul de viață pentru care a fost proiectat să funcționeze la parametri optimi, dar și procesul tehnologic în care se încadrează utilajul respectiv. Toate acestea ar putea să sune mai degrabă a politică, dar, în realitate, alegem standardele în funcție de necesitățile instalației din care face parte utilajul în cauză. Dacă urmăm proceduri manageriale predefinite pentru buna derulare a procesului tehnologic, atunci cunoaștem toate condițiile pe care ar trebui să le îndeplinească utilajul nostru.

Dezechilibrul se măsoară în [gr/mm] sau în [uncii/inch]. În orice caz, la echilibrarea în câmp trebuie să țineți cont de standardele de vibrații, pentru că este mult mai ușor să determinați nivelul de vibrații al mașinii, decât dezechilibrul rezidual.

Vibrațiile datorate dezechilibrului sunt direct proporționale cu valoarea dezechilibrului. Dacă nivelul de vibrații datorat unui dezechilibru scade, în urma echilibrării în câmp, până la un nivel acceptabil, atunci, implicit și dezechilibrul rezidual va scădea la un nivel considerat acceptabil de către standardele de echilibrare.

Forțele pe care le presupune dezechilibrul

- Dezechilibrul produce vibrații la nivelul rotorului.
- Dacă se dublează dezechilibrul, atunci și forțele care i se datorează se vor dubla.
- Dacă se dublează turația rotorului, atunci forțele devin de patru ori mai mari.

Tipuri de dezechilibru

- Static
- De cuplu
- Dinamic sau combinația celor două tipuri menționate anterior.



Cauze ale dezechilibrului rotorice

- Guri de suflare în componentele carcasei
- Excentricități
- Pene de asamblare de lungime improprie
- Distorsiuni datorate solicitării la oboseală
- Distorsiuni de natură termică
- Coroziune sau uzare inegală
- Depuneri diverse pe rotor
- Rotor proiectat asimetric și/ sau asamblat cu erori
- Rotor deteriorat
- Reparații improprie, precum folosirea unor bolțuri și șaibe necorespunzătoare la cuplaj.

Echilibrarea se poate efectua numai după ce se fac măsurători de vibrații și fază. Există trei condiții importante pentru echilibrarea unui rotor, și anume vibrații stabile, fază stabilă și certitudinea că vibrațiile și faza se datorează dezechilibrului. Înainte de a întreprinde o echilibrare în câmp, parcurgeți următorii pași de bază:

- Efectuați analiza de vibrații a utilajului.
- Colectați măsurători radiale și axiale.
- Asigurați-vă că rotorul este curat.
- Verificați dacă acesta nu are piese slăbite.
- Corectați toate aceste neajunsuri înainte de echilibrare.
- Folosiți un indicator de fază pentru a verifica defazajul.
- Îndepărtați masele de corecție de la eventuale echilibrări anterioare.

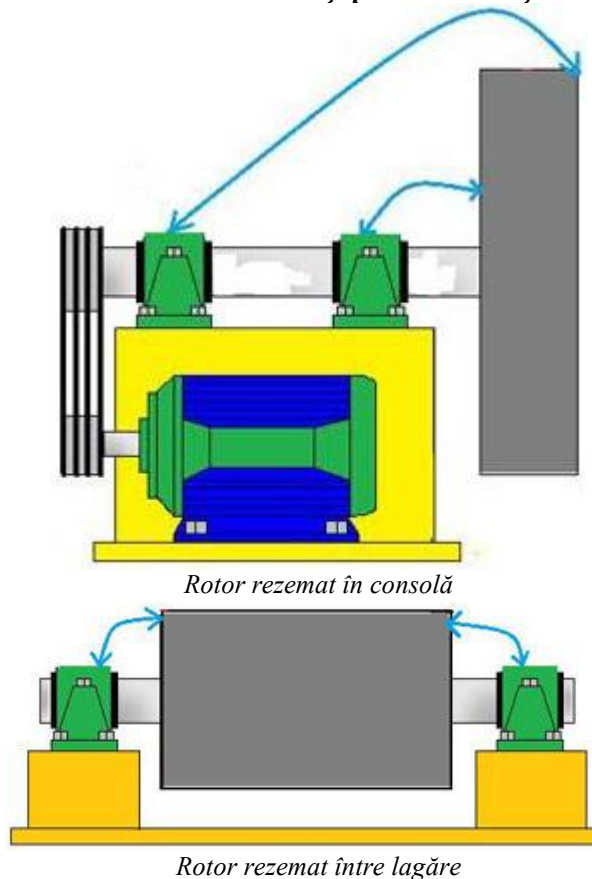
Pentru identificarea stării de dezechilibru puteți apela la analize performante cu care să efectuați în câmp analiza de vibrații. Dezechilibrul este o forță radială care produce vibrații la frecvența de rotație a arborelui. Forța radială poate produce uneori vibrații pe direcție axială, în special la rotoarele rezemate în consolă. La aceste tipuri de rotoare vibrațiile axiale pot să depășească vibrațiile radiale. Datorită forței radiale, arborele se va abate de la poziția inițială cu o anumită săgeată, ceea ce va dezvolta vibrații considerabile la nivelul lagărelor, pe direcție axială. În mod obișnuit, dezechilibrul va produce vibrații la $1 \times$ turația arborelui, ceea ce va reprezenta 80% sau chiar mai mult din vibrația totală. Asta înseamnă că vibrațiile determinate de alte posibile defecte, și care vor fi reprezentate în spectru prin vârfuri apărute la diferite frecvențe, nu vor depăși 20% din nivelul total de vibrații. Ar putea fi necesar, la un moment dat, să corectați celelalte defecte înainte de a echilibra corespunzător rotorul în discuție.

Dezechilibrul exercită întotdeauna aceeași forță pe toate direcțiile radiale, dar amplitudinile vibrațiilor produse de acest defect sunt, în majoritatea cazurilor, inegale pe direcțiile radiale respective.

Vibrațiile în plan orizontal au întotdeauna cea mai mare amplitudine, deoarece majoritatea utilajelor sunt mai puțin rigide pe această direcție. Există totuși și excepții, precum utilaje cu jocuri în lagăre și rezonanță pe direcție verticală. Dacă amplitudinile vibrațiilor măsurate pe diverse direcții radiale diferă într-un

raport de 5:1 sau mai mult, atunci cu siguranță există și alte defecte în afara dezechilibrului. Dacă apar în spectru mai mult de trei armonici ale turației arborelui, atunci, cel mai probabil, există și alte probleme (de obicei jocuri), nu numai dezechilibru. Toate celelalte neajunsuri ar trebui corectate înainte de a încerca să echilibrați un rotor. În figura de mai sus pot vedea punctele de măsurare și planele în care se vor amplasa masele de corecție.

Puncte de măsurare și plane de corecție



Faza la dezechilibrul rotorice

Faza este un instrument important în diagnosticarea dezechilibrului, deoarece vibrațiile care apar la $1 \times$ RPM pot fi generale de multe alte defecte. Valorile fazelor indicate mai jos pot varia și cu 15° .

Defazajul la dezechilibrul static: 0° când comparăm aceleași poziții radiale ale lagărelor rotorului.

Defazajul la dezechilibrul de cuplu: 180° la compararea aceluiași poziții radiale ale lagărelor rotorului.

Defazajul la dezechilibrul dinamic: între 0° și 180° măsurat radial între lagăre.

Defazajul între orizontal și vertical pe același lagăr ar trebui să fie de aproximativ 90° la toate tipurile de rotoare dezechilibrate. Faza ar trebui să rămână stabilă și repetabilă când se încearcă echilibrarea rotorului. (Poate deveni instabilă după adăugarea masei de probă și efectuarea primei rotiri, din cauza altor defecte care tind să devină dominante.) Avem un indiciu clar de dezechilibru atunci când diferența de fază dintre măsurătoarea pe direcție orizontală în plan interior

(IBH) și cea pe direcție orizontală în plan exterior (OBH) este egală cu diferența de fază dintre măsurătoarea verticală în plan interior (IBV) și cea verticală în plan exterior (OBV).

Erorile de fază afectează dramatic echilibrarea rotoarelor. De exemplu:

- O eroare de fază de 7,5° poate produce o reducere a vibrațiilor într-un raport de 8:1.
- O eroare de fază de 15° poate produce o reducere a vibrațiilor în raport de 4:1.
- O eroare de fază de 30° poate produce o reducere a vibrațiilor în raport de 2:1.
- O eroare de fază mai mare sau egală cu 60° poate să nu mai determine nici o reducere a vibrațiilor.

Reguli de echilibrare

În mod normal, toate rotoare, indiferent de raportul diametru/ lățime (D/L) ar trebui echilibrate în două plane de corecție.

Cu toate acestea, la rotoarele rezemate în consolă, dacă vibrațiile măsurate pe lagărul cel mai apropiat de reazem sunt, ca amplitudine, de aproximativ patru ori mai mari decât cele măsurate pe celălalt lagăr, atunci se poate efectua echilibrarea într-un singur plan. Deci, rotoarele cu un raport D/L de cel puțin 4:1 rezemate în consolă, ar putea fi aduse în toleranțe prin echilibrarea într-un singur plan. În plus, rotoarele înguste rezemate în consolă nu răspund bine la echilibrarea în două plane, deoarece, se face cu greu distincția între influența celor două plane de amplasare a maselor de probă și cele două plane de măsurare, deoarece la planele de amplasare a maselor de probă sunt foarte apropiate unul de celălalt.

Pentru a determina dacă este nevoie de o echilibrare în două plane, trebuie să efectuați setările inițiale și să colectați patru măsurători, luând în considerare un singur plan de corecție. Verificați cu ajutorul analizorului, care este dezechilibrul remanent estimat. În cazul în care valoarea estimată se încadrează în toleranțe, definitivati operațiunea de echilibrare într-un singur plan. În schimb, dacă dezechilibrul remanent estimat nu se încadrează în toleranțe, atunci schimbați setarea inițială la două plane de corecție și continuați procesul de echilibrare, până când obțineți un rezultat convenabil.

Alte indicații privind echilibrarea rotoarelor

Forma de undă în timp ar trebui să conțină o componentă sinusoidală puternică. Forma de undă în termeni de accelerație apare distorsionată, deoarece frecvențele mai mari vor fi amplificate. Pentru a putea face echilibrarea, faza și amplitudinea trebuie să fie stabile. Dacă vreuna dintre acestea nu este stabilă, atunci nu puteți diagnostica defectul ca dezechilibru. Uneori poate fi înțelept să efectuați măsurătorile de vibrații și apoi să opriți mașina. Reporniți utilajul și verificați ce se întâmplă cu vibrația și cu faza.

Selectarea masei de probă potrivite

Selectarea unei mase de probă corespunzătoare este foarte importantă, pentru că o masă de probă prea mică nu va oferi un răspuns adecvat pentru calcularea și amplasarea maselor de corecție, în timp ce una prea mare ar putea distruge mașina. Masele de probă ar trebui amplasate după regula 30/30: schimbă faza cu 30° sau amplitudinea cu minimum 30%.

Calcularea maselor de probă

$$F = M_{\text{rotor}} \times 10\%$$

$$F = (1,77) \times (M_{\text{probă}}) \times (R) \times (\text{RPM}/1000)^2$$

Unde: F = Forța în kg, $M_{\text{probă}}$ = Masa de probă în grame, R = Raza în m

Exemplu:

masa rotor 2450 kg, turația 1800 RPM, raza 0,35 m

$$F = 2450 \times 10\% = 245 \text{ kg}$$

$$245 = (1,77) \times (M_{\text{probă}}) \times (0,35) \times (3,24)$$

$$245 = 2,007 \times M_{\text{probă}}$$

$$M_{\text{probă}} = 122,07 \text{ gr}$$

Procedura clasică de echilibrare într-un plan

1. Setati analizorul pentru această aplicație, cu datele indicate de producătorul utilajului.
2. Efectuați "rotirea de referință" sau „calibrarea”, măsurând vibrațiile și faza.
3. Adăugați masa de probă.
4. Efectuați prima rotire de probă.
5. Îndepărtați masa de probă.
6. Adăugați masa de corecție.
7. Efectuați rotirea finală pentru reglajul de finețe.
8. Mai puteți adăuga o masă mică pentru reglaje de finețe, dacă este cazul.
9. Nu efectuați mai mult de două treceri de reglaje de finețe. Dacă sunt necesare mai mult de două treceri de finețe pentru a vă încadra în toleranțele impuse de standard, atunci ștergeți toate datele de la echilibrarea nereușită, lăsați masele adăugate pe poziție și începeți procesul de echilibrare din nou.

Procedura clasică de echilibrare în două plane

1. Setati analizorul pentru această aplicație, cu datele indicate de producătorul utilajului.
2. Efectuați "rotirea de referință" sau „calibrarea”, măsurând vibrațiile și faza.
3. Adăugați masa de probă în planul #1.
4. Efectuați rotirea de calibrare în planul #1.
5. Îndepărtați greutatea de probă din planul #1 și amplasați-o în planul #2.
6. Efectuați rotirea de calibrare în planul #2.
7. Îndepărtați greutatea de probă din planul #2.
8. Adăugați masele de corecție în planele #1 și #2.
9. Efectuați rotirile finale pentru reglajul de finețe și adăugați eventuale mase pentru corecții de finețe, dacă este cazul.
10. Nu efectuați mai mult de două treceri de reglaje de finețe. Dacă sunt necesare mai mult de două treceri de finețe pentru a vă încadra în toleranțele

impuse de standard, atunci ștergeți toate datele de la echilibrarea nereușită, lăsați masele adăugate pe poziție și începeți procesul de echilibrare din nou.

Dacă starea de echilibrare a rotorului se alterează în timp relativ scurt, atunci ar trebui să suspectați una din următoarele probleme:

- Sensibilitate termică
- Turația de lucru este apropiată de turația de rezonanță
- Rotorul este corodat
- Depuneri de material vehiculat pe rotor
- Rotorul funcționează cu turație variabilă și trece și prin zona de rezonanță
- Rotor cu subansamble slăbite.

Preconcepții de genul „*Este ventilator și trepidează mult, deci sigur trebuie echilibrat*” vă pot crea mari neplăceri. Iată câteva sfaturi care vă ajută să evitați asemenea capcane:

- Forma de undă în timp nu ar trebui să fie mult prea diferită de o sinusoidă clasică.
- Amplitudinea vibrației arborelui trebuie să fie stabilă și repetabilă.
- Faza ar trebui să rămână stabilă și să fie repetabilă.
- Nu ar trebui să apară mai mult de trei armonici ale turației de lucru în spectru. (Arborii rezemați pe lagăre de alunecare pot face excepție de la această regulă.)
- Nu ar trebui să existe vibrații și zgomote de fond.
- Nu ar trebui să existe în spectru alte subarmonici, decât maxim trei ale turației de lucru.
- Rotorul ar trebui să fie curat și fără depuneri de material.
- Echilibrarea ar trebui efectuată numai după ce, în prealabil, ați corectat toate celelalte neajunsuri.

Rotoarele nu se dezzechilibrează fără o cauză anume. Dacă un rotor a fost echilibrat în toleranțe, dar starea lui de echilibru nu durează în timp, va trebui să determinați și să corectați sursa acestui neajuns. Uneori, nervurile de asamblare ale rotorului se pot fisura, determinând deformarea și trecerea bruscă a acestuia în stare de dezzechilibru. Dacă reechilibrați rotorul fără să reparați în prealabil fisurile, atunci nervurile pot ceda complet conducând la avarii catastrofale. Astfel de probleme pot fi evitate, de obicei, prin curățare și inspecție periodică.

Vibrațiile se măsoară în termeni de deplasare, viteză și accelerație. Accelerația și viteza de vibrație sunt, în general, cele mai des utilizate mărimi în tehnica măsurării vibrațiilor, dar la echilibrarea rotoarelor se măsoară deplasarea exprimată în [μm] sau în [mils]. Acest lucru se datorează faptului că deplasarea oferă cele mai bune informații la frecvențe joase, iar la dezzechilibru avem de-a face cu vibrații dominante la $1 \times \text{RPM}$.

Tehnicienii care se ocupă de echilibrare trebuie să conștientizeze faptul că o deplasare de 1 mil la o mașină care se funcționează la 900 RPM nu se poate compara cu 1 mil la o mașină care funcționează la 3.600

RPM. Evident, forța exercitată asupra rotorului este mult mai mare la 3.600 RPM.

De ce poate eșua echilibrarea unui rotor

Principalele motive pentru incapacitatea de a atinge performanțele cerute de standardele în vigoare includ:

1. Setarea greșită a analizorului.
2. Omiterea eliminării unei greutăți de probă
3. O altă problemă confundată cu dezzechilibrul (de obicei jocuri mecanice).
4. Introducerea greșită a poziției masei de probă în instrumentul de echilibrat.
5. Rotoarele rezemate în consolă necesită o echilibrare în două plane.
6. Amplasarea masei de corecție pe direcție greșită raportată la rotor.
7. Existența unor condiții de rezonanță.

Pentru a vă specializa în echilibrarea rotoarelor trebuie să dispuneți de instrumente performante și să fiți foarte bine familiarizați cu utilizarea acestora.

De asemenea, pentru a reuși în acest domeniu, este esențial să stăpâniți foarte bine teoria echilibrării, precum și tehnicile de echilibrare. O bună înțelegere a analizei de vibrații vă ajută să vă asigurați că efectuați echilibrarea rotorului numai atunci când sursa vibrațiilor este dezzechilibrul.

În acest context, datorită multitudinii de variabile ce trebuie luate în considerare, echilibrarea rotoarelor este, până la urmă, o artă.

Acum, misiunea dumneavoastră este ca, folosind instrumentele cele mai potrivite și stăpânind excelent aspectele teoretice și practice, să transformați echilibrarea rotoarelor din „artă”, în știință aplicată.

Despre autor

Bill Hillman este colaborator tehnic pentru Ludeca Inc. US. Ca specialist în întreținerea și fiabilitatea sistemelor, cu peste 30 de ani de experiență în industria metalurgică și șase ani în prelucrarea lemnului, ca trainer de întreținere predictivă pentru compania americană Temple – Inland, Bill și-a petrecut întreaga carieră în managementul activelor - echipamente industriale - din care mai mult de 20 de ani și-a dedicat de întreținerii predictive.