

## ECHILIBRAREA DINAMICĂ A ROTOARELOR FLEXIBILE

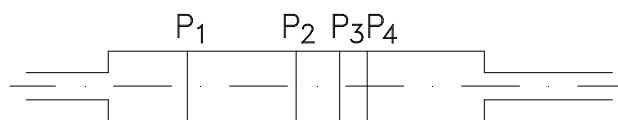
### 1. Introducere

Echilibrarea rotoarelor rigide se face în conformitate cu STAS 1940-1. Aceste tipuri de rotoare pot fi echilibrate la joasă turație, pe mașini de echilibrat obișnuite.

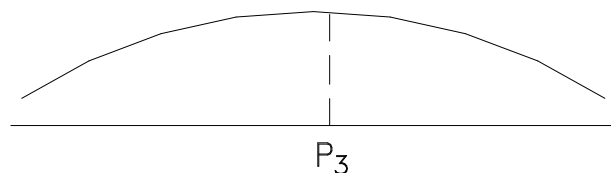
În practică însă, foarte multe rotoare sunt flexibile și această caracteristică este specifică rotoarelor a căror lungime este mult mai mare decât diametrul lor. Un rotor flexibil, chiar în poziție staționară, așezat pe propriile lagăre, se va deforma elastic, formând săgeată, datorită masei mari și a unei distanțe importante între lagăre.

Dacă un astfel de rotor este învârtit la turație joasă, el continuă să-și păstreze săgeata, datorită forței de gravitație. Dacă se crește viteza de rotație, rotorul își va crește săgeata datorită forțelor dinamice care devin importante. La o anumită turație, numită

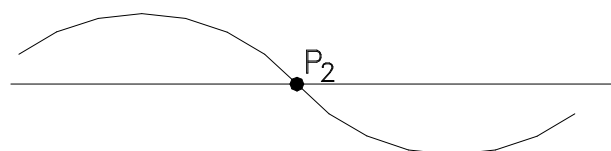
**prima viteză critică**, săgeata va atinge un maxim ca în figura a) de alături.



a) Rotorul tipic

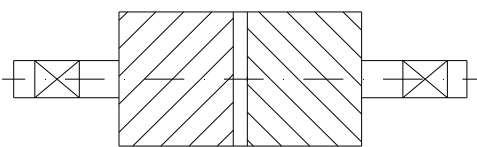
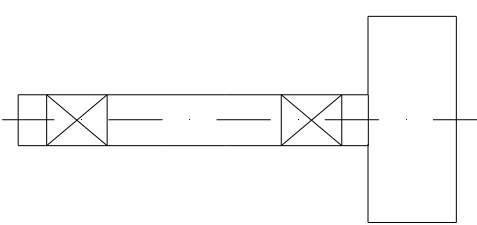
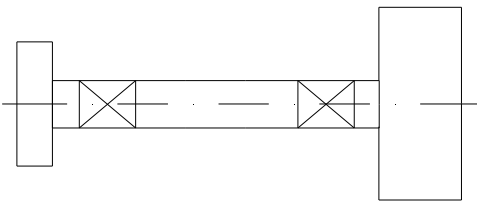
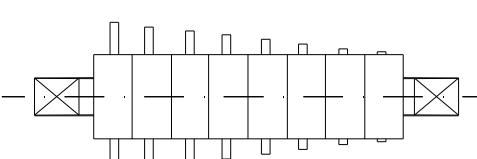
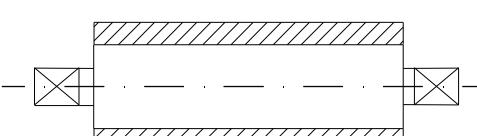
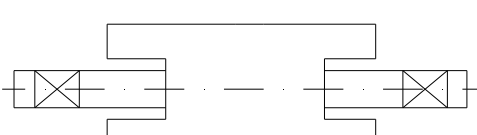


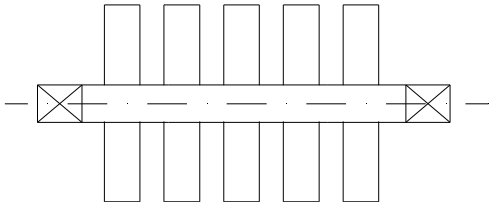
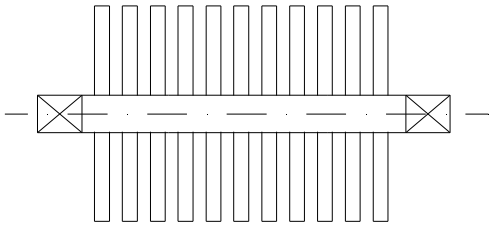
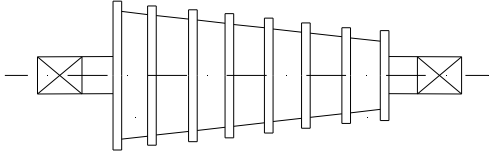
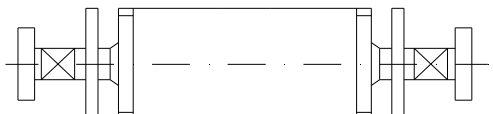
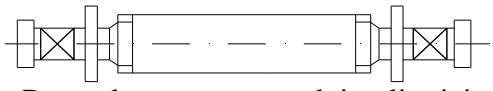
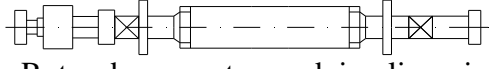

b) Primul mod de vibrație

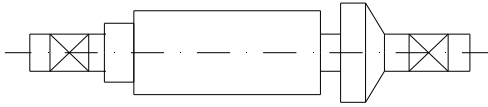


Dacă viteza de rotație va crește în continuare, deflexia dinamică inițială se va reduce, dar va apărea un alt tip de deflexie (fig. b) la atingerea celei de-a **doua viteze critice**.

Dacă turația nominală este sub 70% din prima critică, rotorul se consideră rigid. Dar dacă turația normală de regim este peste această valoare (peste prima sau a doua critică), atunci rotorul trebuie considerat elastic și el trebuie echilibrat dinamic utilizând prevederile standardului ISO5406 - Echilibrarea dinamică a rotoarelor flexibile.

<b>Clasificarea rotoarelor</b>		
<b>Clasa</b>	<b>Descriere</b>	<b>Exemplu</b>
<b>Clasa 1</b>	Un rotor al cărui dezechilibru se poate corecta în două plane alese arbitrar, astfel încât după corecție, dezechilibrul său nu se modifică considerabil la orice turație sub turația maximă de lucru.	 <p>Angrenaj</p>
<b>Clasa 2 (rotor cvasi-rigid)</b>	Un rotor ce nu poate fi considerat rigid, dar care poate fi echilibrat prin tehnicile de echilibrare a rotoarelor rigizi modificate.	–
<b>Rotoare cu distribuția axială a dezechilibrului cunoscută</b>		
<b>Clasa 2a</b>	Un rotor cu un singur plan transversal de dezechilibru, de exemplu o singură masă montată pe un arbore ușor flexibil, al cărui dezechilibru poate fi neglijat.	 <p>Disc de rectificat</p>
<b>Clasa 2b</b>	Un rotor cu două plane transversale de dezechilibru, de pildă două mase pe un arbore ușor, al cărui dezechilibru poate fi neglijat.	 <p>Disc de rectificat cu roată de transmisie</p>
<b>Clasa 2c</b>	Un rotor cu mai mult de două plane transversale de dezechilibru.	 <p>Rotor de compresor</p>
<b>Clasa 2d</b>	Un rotor cu un dezechilibru neuniform distribuit sau cu variație liniară.	 <p>Calandru</p>
<b>Clasa 2e</b>	Un rotor ce conține o masă rigidă de lungime considerabilă, rezemată pe un arbore flexibil, al cărui dezechilibru poate fi neglijat.	 <p>Disc magnetic (memorie calculator)</p>

<b>Rotoare cu distribuția axială a dezechilibrului necunoscută</b>		
<b>Clasa</b>	<b>Descriere</b>	<b>Exemplu</b>
<b>Clasa 2f</b>	Un rotor simetric cu două plane de corecție de capăt, a cărei turație maximă nu se apropie semnificativ de cea de-a doua turație critică, și al cărei domeniu de turații de lucru nu conține prima turație critică iar dezechilibrul inițial este cunoscut.	 <p>Pompă centrifugală multietajată</p>
<b>Clasa 2g</b>	Un rotor simetric cu două plane de corecție de capăt și unul de mijloc, a cărei turație maximă nu se apropie semnificativ de cea de-a doua turație critică și are un dezechilibru inițial cunoscut.	 <p>Pompă centrifugală de înaltă turație</p>
<b>Clasa 2h</b>	Un rotor asimetric care are un dezechilibru inițial cunoscut și se abordează ca rotorul din Clasa 2f	 <p>Rotor de turbină cu abur de înaltă presiune</p>
<b>Clasa 3 (rotoare flexibili)</b>	Un rotor care nu se poate echilibra prin tehnicile de echilibrare a rotoarelor rigide modificate și care necesită o echilibrare prin metode de înaltă turație.	-
<b>Clasa 3a</b>	Un rotor care, pentru orice distribuție a dezechilibrului, este semnificativ afectat în primul mod de vibrație.	 <p>Rotor de generator cu patru poli</p>
<b>Clasa 3b</b>	Un rotor care pentru orice distribuție a dezechilibrului, este semnificativ afectat în primul mod de vibrație și al doilea.	 <p>Rotor de generator cu doi poli mici</p>
<b>Clasa 3c</b>	Un rotor care este afectat considerabil nu numai în primele două moduri de vibrație	 <p>Rotor de generator cu doi poli mari</p>
<b>Clasa 4</b>	Un rotor care ar putea fi încadrat în clasele 1, 2 sau 3, dar are în plus una sau mai multe piese componente, ele însele flexibile sau atașate flexibil.	 <p>Rotor cu cuplaj centrifugal</p>

<b>Clasa 5</b>	Un rotor care se poate încadra în clasa 3, dar din anumite considerente, de exemplu economice, se echilibrează numai pentru o turație de lucru.	 <p style="text-align: center;">Motor de înaltă turație</p>
----------------	---	--

În tabelul de mai sus este prezentată clasificarea rotoarelor în conformitate cu acest standard.

Rotoarele din clasa 1 sunt rotoare rigide. Rotoarele din clasa 2 pot fi definite ca rotoare cvasi-rigide și pot fi echilibrate în conformitate cu standardul 1940-1. Deși pentru rotoarele din clasele 3, 4 și 5 este specificat în ISO 5406 că echilibrarea lor dinamică trebuie efectuată la turația de regim, experiența practică a demonstrat că în activitatea de întreținere - reparație, echilibrarea la joasă turație poate conduce la o scădere acceptabilă a dezechilibrului rezidual.

Pentru obținerea unor rezultate satisfăcătoare, aceste tipuri de rotoare necesită o procedură de echilibrare specifică.

## 2. Mașina de echilibrat

Utilizarea mașinilor de echilibrat de joasă turație prezintă câteva avantaje:

- Timpul de accelerare la turația de echilibrare, respectiv timpul de frânare sunt considerabil reduse
- Echilibrarea la turație redusă este mai puțin periculoasă, măsurile de protecție fiind puțin costisitoare
- Puterea motorului de antrenare este mică în comparație cu puterea necesară rotirii la turații mari
- Mașinile de echilibrat la turație joasă sunt disponibile în majoritatea atelierelor de reparații.

Pe de altă parte, nu toate mașinile de echilibrat de joasă turație pot fi utilizate cu succes la echilibrarea rotoarelor elastice.

Aceste mașini de echilibrat trebuie să aibă următoarele caracteristici:

- *Sensibilitate suficientă la turația de echilibrare.* Mașinile de echilibrat cu lagăre rigide măsoară forța exercitată în lagăr datorită dezechilibrului. De aceea, răspunsul la dezechilibru nu este liniar cu turația de echilibrare. Dimpotrivă, mașinile cu lagăre

"moi" sau elastice măsoară deplasarea, care nu depinde de turația de echilibrare. Datorită sensibilității reduse, mașinile de echilibrat cu lagăre rigide nu pot fi utilizate la echilibrarea rotoarelor elastice.

- *Sensibilitatea canalului de măsurare trebuie să fie suficientă la turația de echilibrare.* Chiar dacă partea mecanică permite transmiterea deplasării datorate dezechilibrului, canalul de măsurare (traductor + amplificator) trebuie la rândul lui să asigure o amplificare suficientă a semnalului util. Deoarece semnalul util se manifestă în cazul dezechilibrului la  $\times 1\text{RPM}$ , înainte de amplificare semnalul trebuie filtrat, înlăturându-se toate frecvențele cu excepția celei de la turația de lucru. Sistemele moderne electrice utilizează un filtru "trece-banda" îngust, care are frecvența de trecere  $\times 1\text{RPM}$ . Sistemele electronice analogice, produse la nivelul anilor 1980 sunt neperformante, ceea ce conduce în cazul unei amplificări excesive la un raport semnal/zgomot inacceptabil, cu alte cuvinte, în loc ca rezultatul măsurătorii să conțină în majoritate frecvența  $\times 1\text{RPM}$ , acesta va conține în majoritate zgomot.
- *Traductorul utilizat trebuie să fie un traductor de viteză, bobina mobilă a acestuia trebuie să fie solidar-rigidă cu partea în mișcare a lagărelor mașinii de echilibrat.* Utilizarea accelerometrelor în locul traductoarelor de viteză, conduce la necesitatea dublei integrări a semnalului pentru a se obține deplasare, lucru care conduce la creșterea zgomotului în semnalul util.
- *Sistemul de antrenare nu trebuie să introducă un dezechilibru suplimentar în sistem.* Într-adevăr, deoarece echilibrarea trebuie să conducă la un dezechilibru rezidual cât mai redus, utilizarea cuplajului cu cardan a motorului de antrenare cu rotorul va conduce în final, mai degrabă la echilibrarea ansamblului cardan + piesă de legătură + rotor, decât a rotorului propriu-zis. De aceea, pentru echilibrarea dinamică la joasă turație a rotoarelor elastice, se impune antrenarea cu curea.
- *Turația de echilibrare.* Datorită faptului că orice turație de echilibrare este mult mai mică decât cea de regim, nu este prea importantă alegerea unei anumite turații de echilibrare. De fapt, alegerea acesteia ține doar de două aspecte: condițiile de securitate și realizarea unei rotiri "liniștite" a rotorului de echilibrat. În special, pentru rotoarele care dezvoltă forțe aerodinamice importante, s-a constatat din practică că anumite paliere de turații joase fac ca rotorul să creeze turbulențe. Dimpotrivă, alegerea altor paliere, foarte apropiate de primele, pot conduce la o rotire lină a rotorului. Turația de echilibrare se alege în intervalul 90-700RPM, fiind cu atât mai

joasă cu cât acesta dezvoltă forțe aerodinamice mai importante. În concluzie, mașina de echilibrat va trebui să aibă posibilitatea de a regla turația de echilibrare, fin, în intervalul mai sus menționat.

### 3. Operații preliminare

Înainte de echilibrarea unui rotor flexibil pe o mașină de echilibrat de joasă turație trebuie realizate o serie de operații preliminare:

- *Curățarea și degresarea perfectă a rotorului.* Orice urme de impurități și depuneri de pe suprafața axului sau rotoarelor pot conduce la un rezultat eronat. Deoarece se alege un grad unic de calitate a echilibrării (de obicei G1), chiar câteva miligrame în plus pot conta în economia echilibrării.
- *Lubrifierea lagărelor mașinii de echilibrat.* Pentru a ușura rotirea, lagărele mașinii de echilibrat trebuie lubrificate cu un lubrifiant suficient de vâscos pentru a forma o peliculă permanentă între suprafața roților și axul rotorului. Folosirea unui lubrifiant lichid obișnuit conduce la îndepărtarea rapidă a acestuia datorită forțelor centrifuge, iar utilizarea unui lubrifiant solid, face ca rotorul să nu ruleze corect pe role. În practică se alege un aditiv de lubrifiere furnizat de majoritatea producătorilor de lubrifianți.
- *Imperfecțiuni geometrice.* Rotorul de echilibrat trebuie să fie perfect simetric în plan transversal. Orice "bătăie" face ca rotorul să nu poată fi echilibrat corect. De aceea, înainte de echilibrare rotorul se va prelucra mecanic în toleranțe strânse.
- *Săgeata arborelui în poziție staționară trebuie să fie minimă.* Săgeata la un rotor greu poate să apară și datorită depozitării incorecte. Dacă rotorul prezintă săgeată semnificativă, atunci el trebuie rotit la turație foarte joasă (sub 20 RPM) timp îndelungat, uneori 48 de ore. Din timp în timp se măsoară săgeata. Dacă aceasta nu scade, se poate presupune că aceasta este de natură plastică și în aceste condiții rotorul nu este echilibrabil.

#### 4. Tehnica de echilibrare

Echilibrarea rotoarelor elastici la turație redusă pornește de la două axiome:

*Dezechilibrul dinamic este o caracteristică fizică a rotorului, care nu este dependentă de turație. Dezechilibrul dinamic se poate defini ca o distribuție neuniformă a masei de-a lungul rotorului față de axa de simetrie.* Doar efectul dezechilibrului este diferit la viteze de rotație diferite. Cu alte cuvinte, un rotor cu masa perfect distribuită, rotit la orice viteză (dar în afara turațiilor critice) nu se va deforma, neexistând cauza care produce deformarea sa.

Rotorul are turația nominală departe de turațiile critice proprii.

În aceste condiții rotorul poate fi echilibrat similar cu cel rigid.

Dacă este posibil și rotorul este format din mai multe componente, fiecare dintre acestea se va echilibra separat. La asamblare se va ține cont de dezechilibrul rezidual al fiecărui component, astfel încât acesta să se distribuie uniform în spațiu.

Calculul dezechilibrului rezidual maxim admisibil se face în mod similar ca pentru rotoarele rigide, dar este bine să se încerce o echilibrare mult sub aceste valori.

Pentru rotoarele flexibile se va aplica întotdeauna soluția static-cuplu.

Componenta statică va fi împărțită în mod egal pe rotoarele din mijloc, iar componenta de cuplu se va compensa în planul de echilibrare din capete.

#### 5. Concluzii

- Echilibrarea rotoarelor flexibile la turație joasă este o tehnică mult utilizată în activitatea de întreținere-reparație.
- Chiar dacă echilibrarea finală nu este perfectă, ea conduce la scăderea suficientă a dezechilibrului rezidual final și implicit la o funcționare corectă a utilajului.
- Echilibrarea rotoarelor flexibili pe mașini de echilibrat la turație de regim este mult mai costisitoare. În plus, transportul rotorului pe distanță mare prezintă un factor de risc important.

*Bibliografie*

*ISO 1924 - Balancing - Vocabulary*

*R ISO 1940/1 - Condiții de calitate pentru echilibrarea rotoarelor rigide -  
Institutul Național de Standardizare*

*ISO 1923 - Balancing Machines - Description and Evaluation*

*ISO 5406 - Mechanical Balancing of Flexible Rotors*