

# Uravnotežavanje krutih rotora segmentne konfiguracije

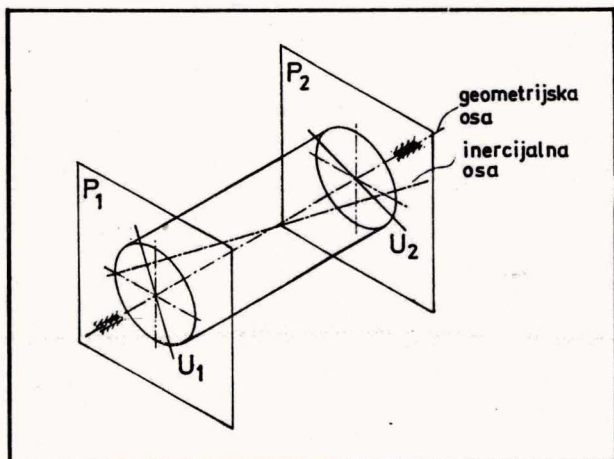
Velimir Ristić, dipl. inž., mr Aleksandar Veg, dipl. inž., Aco Gobeljić, dipl. inž. i dr Aleksandar Sekulić, dipl. inž., Mašinski fakultet, 27. marta 80, 11000 Beograd

*Susretanje sa krutim rotorima segmentne konfiguracije, u procesnoj opremi je često. Oblik segmenata, kao i njihov broj, zavisi od namene samog rotora i obuhvata širok dijapazon različitih formi i veličina. Pored tehnoloških i konstrukcionih kriterijuma, koji se moraju poštovati, njihova segmentna konfiguracija predstavlja ograničavajući faktor za korekciju njihove neuravnoteženosti. Metoda uravnotežavanja krutih rotora segmentne konfiguracije zasniva se na mogućnosti razlaganja vektora neuravnoteženosti na komponentne vektore u mogućim ravnima korekcije i po odgovarajućim pravcima.*

## 1. Uvod

Zamislimo slobodno telo koje rotira u prostoru bez ograničenja koja nameće uležištenje. Obrtanje ovog tela će se odvijati oko glavne inercijalne ose. U realnom sistemu, rotor se obrće oko ose koja je definisana položajem ležišta. Ova osa se naziva obrtna ili geometrijska osa. MIMOILAŽENJE ovih dveju osa (slika 1) ima za posledicu neravnomeran raspored masa oko geometrijske ose, što dovodi do pojave inercijalnih sila. Usled ovoga dolazi do dinamičkih reakcija u ležištima. Smirivanje neželjenog efekta moguće je izvesti smanjenjem odstupanja inercijalne od geometrijske ose, što predstavlja osnovni zadatak uravnotežavanja.

Prema odnosu dužine rotora i njegovog prečnika, usvojena je



Slika 1.

podela na diskaste i na valjkaste rotore. Uravnotežavanje se kod diskastih rotora vrši u jednoj ravni, a kod valjkastih u dve ravni.

Čest je slučaj da raspored masa po obimu u duž ose rotora nije ravnomeran. Otuda potiče podela na "pune" i rotore segmentne konfiguracije.

## 2. Rotori segmentne konfiguracije

Skup različitih tehnoloških zahteva i odgovarajuća konstrukciona ograničenja čine postojanje širokog dijapazona različitih oblika rotora. Radna kola pumpi, kolenasta vratila, ventilatori, elise, mešalice, separatori itd., predstavljaju rotore kod kojih raspored masa nije obimno kontinualan. Kod njih je masa raspoređena po poljima (segmentima), odakle potiče odgovarajući naziv. Veličina segmenta, kao i njihov broj i oblik zavise od namene rotora.

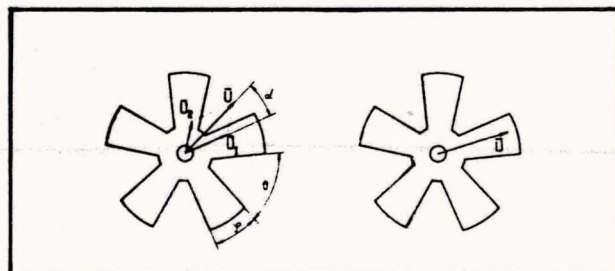
## 3. Uravnotežavanje krutih rotora segmentne konfiguracije

Osnovni cilj dinamičkog uravnotežavanja je konvergencija položaja inercijalne ose ka obrtnoj osi. Bez obzira na postojanje većeg broja različitih metoda dinamičkog i statičkog uravnotežavanja, zajedničko im je operisanje korekcijskom masom. Oduzimanjem ili dodavanjem korekcijske mase menja se položaj inercijalne ose, do momenta kada njeno rastojanje u odnosu na osu obrtanja ne dostigne propisne granice (u zavisnosti od vrste rotora, mase i broja obrtanja).

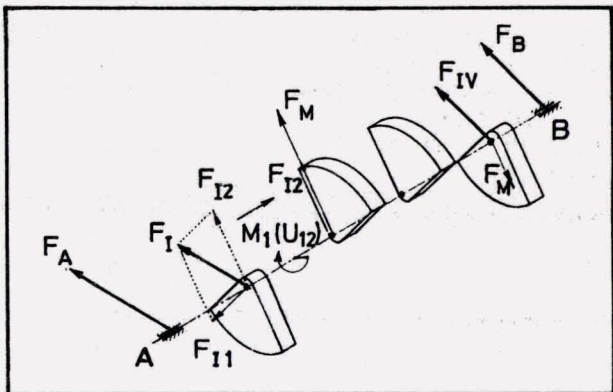
Svojom specifičnom građom kruti rotori segmentne konfiguracije iziskuju primenu specifične metode uravnotežavanja, koja, uz sva ograničenja geometrijske forme, daje prihvatljive rezultate.

Metoda uravnoteženja krutih rotora segmentne konfiguracije polazi od činjenice da je moguće vektor neuravnoteženosti razložiti na moguće korekcijske komponente (slika 2).

Kod diskastog rotora, kao na slici 2, vektor neuravnoteženosti može da zauzme bilo koji položaj u okviru punog ugla rotora. Ukoliko je vektor u polju segmenta (slika 2b), tada se korekcija vrši na tom pravcu, znači na segmentu u čijem se



Slika 2.



Slika 3.

polju vektor nalazi. Nepovoljniji slučaj, sa stanovišta uravnotežavanja, je kada se vektor nalazi u delu rotora između segmenata (slika 2a). U toj situaciji je potrebno izvršiti njegovo razlaganje na komponente po pravcima moguće korekcije.

Kod valjkastih segmentnih rotora, kod kojih se segmenti ne nalaze u istoj ravni, javlja se potreba razlaganja vektora neuravnoteženosti ne samo po pravcima, već i u ravnima moguće korekcije.

Na slici 3. je uprošćeno dat rotor segmentne konfiguracije. Veličine  $F_A$  i  $F_B$  predstavljaju detektovane sile u ležištima, koje su posledica potojanja neuravnoteženosti. Njihova veza sa odgovarajućim vektorom neuravnoteženosti je data jednačinama:

$$\vec{F}_A = \vec{U}_A \omega \quad \vec{F}_B = \vec{U}_B \omega$$

Ove sile svedene na ravni korekcije najbliže ležištima obeležene su sa  $F_I$  i  $F_{IV}$ . (Usvojeno je označavanje ravni segmenata od 1 do 4, u smeru od ležaja A ka ležaju B.)

S obzirom da vektor  $F_I$  ne leži u zahvatnom uglu segmenata, potrebno je razložiti ga na komponente koje se mogu dovesti na pravce i ravni na kojima ih je moguće korigovati. Komponenta  $F_{I1}$  leži u ravni segmenta i njena korekcija se vrši na tom pravcu u toj ravni. Komponentu  $F_{I2}$  je potrebno translirati do ravni drugog segmenta na kojoj je moguća korekcija. Premeštanje vektora  $F_{I2}$  iz ravni jednog segmenta u ravan drugog, izaziva pojavu momenta neuravnoteženosti  $M_I$ . Ovaj moment je moguće zameniti spregom vektora  $F_M$  u ravnima u kojima se oni nalaze u okviru polja segmenta. Nakon ovoga moguće je vršiti smanjivanje intenziteta sila, po poljima. Kako između ovih sila i vektora neuravnoteženosti postoji veza, na taj način se vrši uravnotežavanje. Postupak razlaganja i uravnotežavanja vektora  $F_{IV}$  teče na isti način.

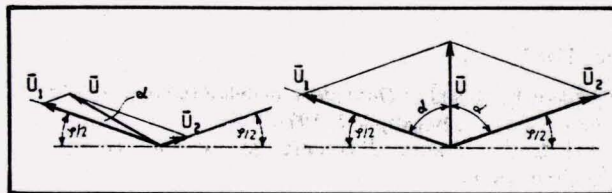
#### 4. Analiza položaja vektora neuravnoteženosti unutar polja rotora

Položaj vektora neuravnoteženosti, označen uglom  $\alpha$ , pokazuje otklon vektora u odnosu na pravac najbliže moguće korekcije (slika 2a). Ugao  $\alpha$  može imati sve vrednosti unutar ugla  $\theta$ . U zavisnosti od broja segmenata, za ugao  $\alpha$  važi relacija:

$$360/n - \varphi = \theta \quad n - \text{broj segmenata}$$

Centralni ugao segmenata koji određuje njihovu veličinu označen je sa  $\varphi$ . Veza između vektora neuravnoteženosti, njegovih komponenti i pomenutih uglova može se izraziti poznatom sinusnom teoremom:

$$\frac{u}{\sin \varphi} = \frac{u_1}{\sin(\varphi + \alpha)} = \frac{u_2}{\sin \alpha}$$



Slika 4.

Analizom veličina projekcija  $u_1$  i  $u_2$  na odgovarajuće pravce, slučaj kada je  $n = 2$  i  $\alpha = \theta/2$ , predstavlja sa gledišta uravnotežavanja najnepovoljniji slučaj. Korekcijska masa za takvu situaciju ima ukupne vrednosti za oba pravca veće nego za bilo koje drugo  $\alpha$  iz oblasti  $\theta$ , uz nepromenjenu vrednost intenziteta vektora  $u$  (slika 4).

Za tako postavljeno  $\alpha$ , rast komponenti  $u$  u zavisnosti od veličine segmentnog ugla  $\varphi$  dat je dijagramom i relacijom (slika 5).

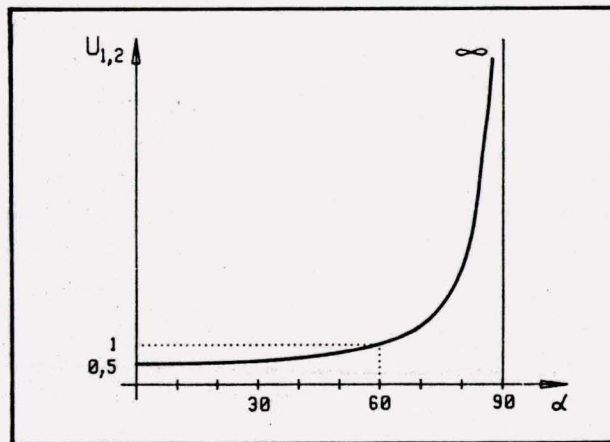
Na dijagramu se vidi da intenzitet projekcija raste do beskonačnosti približavanjem ugla  $\alpha$  ka  $90^\circ$ , odnosno ugla  $\varphi$  ka 0. Vrednost intenziteta projekcija po bilo kom pravcu ne treba da prelazi K puta intenzitet vektora neuravnoteženosti i predstavlja izlazni nivo kvaliteta izrade rotora.

Sa povećanjem broja segmenata  $n > 3$  projekcije po bilo kom pravcu moguće korekcije u najnepovoljnijem slučaju mogu da budu jednake, po intenzitetu, glavnom vektoru neuravnoteženosti.

#### 5. Zaključak

Usled postojanja konkretne potrebe za automatizacijom procesa uravnotežavanja kolenastih vratila, pojavila se mogućnost razvoja metode uravnotežavanja krutih rotora segmentne konfiguracije. Kod diskastih rotora razlaganje vektora neuravnoteženosti se vrši u istoj ravni. Kod valjkastih rotora segmentne konfiguracije za primenu pomenute metode potrebno je da postoje najmanje tri korekcijske ravni (usled translacije komponente vektora neuravnoteženosti i radi korekcije momenta neuravnoteženosti).

Podatak da se u opisanoj metodi korekcija mase vrši oduzimanjem, proističe iz činjenice da je jedna od najlakših mogućnosti automatske korekcije mase, zabušivanjem (skidanjem mase). Treba znati, da ukoliko korigujemo masu dodavanjem, merodavan je negativni smer vektora neuravnoteženosti, i odgovarajuće projekcije. Ovaj podatak znači da ukoliko način korekcije mase možemo da biramo, vršimo izbor prema povoljnijem položaju vektora neuravnoteženosti.



Slika 5.

## Literatura

- [1] GLIGORIĆ, Branko: *Dinamičko uravnotežavanje rotora obrtnih mašina*, Kragujevac, 1978.
- [2] PANTELIĆ, Todor: *Priručnik za uravnotežavanje*, Beograd, 1976.
- [3] DEN HARTOG, J. P.: *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, New York, 1956.
- [4] HOLOWENKO, A. R.: *Dynamics of Machinery*, Wiley, New York, 1955.
- [5] BURTON, P., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

---

**АТМ БГ**

---

**ПРЕДУЗЕЋЕ ЗА АУТОМАТИЗАЦИЈУ И ТЕХНИКУ МЕРЕЊА**  
11070 НОВИ БЕОГРАД, Бул. Лењина 127  
Телефон: (011) 134-346, 2223-249  
Телекс: 11050 – Телефакс: (011) 138-844  
Телеграм: АТМ БГ – Нови Београд, Бул. Лењина 127

---

**ЕНЕРГЕТИКА, ПЕТРОХЕМИЈА, ХЕМИЈА,  
ФАРМАЦИЈА, ПРЕХРАМБЕНА ИНДУСТРИЈА, МЕТАЛУРГИЈА, ЕКОЛОГИЈА**

**ИНЖЕЊЕРИНГ, ПРОЈЕКТОВАЊЕ, ПРОИЗВОДЊА**

мерење температуре  
претварачи температуре  
претварачи притиска  
мерење протока  
мерење количина  
регулатори нивоа и сигнализатори  
напајање и претварање сигнала  
показивање и регистрација  
алармирање и сигнализација  
регулација и управљање  
регулациони вентили  
редукционе станице

**МОНТАЖА, ИСПИТИВАЊЕ, ПУШТАЊЕ У РАД**