

## Primerjava masnega ter magnetnega neuravnoteženja rotorja glede na vibracije enosmernih elektromotorjev

### A Comparison of the Mass Unbalance and the Magnetic Unbalance with Respect to the Vibration of DC Electric Motors

Matej Petrič - Martin Furlan - Miha Boltežar

*V prispevku obravnavamo vpliv magnetnega neuravnoteženja rotorjev na vibracije enosmernega elektromotorja s trajnimi magneti v primerjavi z masnim neuravnoteženjem. Obravnavani problem se pojavi pri uravnoteženju rotorjev z odvzemanjem materiala, pri čemer nastanejo zareze na površini rotorja, ki vplivajo na magnetno neuravnoteženost. Z namenom potrditve vpliva magnetne neuravnoteženosti na vibracije elektromotorja, smo izvedli meritve vibracij, tako na uravnoteženih kakor tudi na neuravnoteženih rotorjih in jih pozneje medsebojno primerjali. Dvorazsežni (2D) in trirazsežni (3D) elektromagnetni model elektromotorja, kjer smo na površini rotorja modelirali določeno število zarez, je omogočil, da smo ovrednotili vpliv zarez na magnetne sile na rotor in na posamezne magnetne. Raziskava je bila opravljena na enosmernih elektromotorjih s trajnimi magneti, ki se uporabljajo za pogon hidravlične črpalke na krmilnem mehanizmu v avtomobilu. Pokazala je pomen magnetne neuravnoteženosti na vibracije enosmernega elektromotorja.*

© 2003 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: elektromotorji enosmerni, uravnoteženje rotorjev, vibracije, analize končnih elementov, sile magnetne)**

*The influence of magnetic unbalance in comparison to mass unbalance on the vibrations of permanent-magnet DC electric motors was studied. The phenomenon of magnetic unbalance is a result of removing the mass when balancing rotors. As a result the notches on the rotor surface cause the magnetic unbalance. Vibration measurements on balanced and unbalanced electric motors were carried out to confirm the existence of magnetic unbalance. Numerical modelling included two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) electromagnetic models of an electric motor. Notches were modelled on the surface enabling the estimation of the magnetic forces on the rotor and on the magnets. Electric motors with permanent magnets are used to drive the hydraulic pump in the steering mechanism in a car. The results of the research confirm the importance of magnetic unbalance on the vibrations of electric motors.*

© 2003 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: DC electric motors, rotors balancing, vibrations, finite element analysis, magnetic forces)**

#### 0 UVOD

Zahteva po vse tišjem delovanju strojev sili tudi proizvajalce enosmernih elektromotorjev k izdelavi vedno mirnejših elektromotorjev. Če želimo zmanjšati hrupnost električnih strojev nasploh, je pomembno, da najprej spoznamo vzroke in mehanizme nastanka vibracij. Vibracije enosmernih elektromotorjev delimo na mehansko, ki so posledica gibanja mehanskih delov, ter magnetno tresenje, ki je posledica delovanja magnetnih sil ([1] do [3]).

Dejstvo je, da je za zmanjšanje mehanskih tresenj zelo pomembno, da rotorje čim bolj masno uravnotežimo.

Pri masnem uravnoteženju togih rotorjev običajno ločimo uravnoteženje v eni in dveh ravninah. Pri uravnoteženju v eni ravnini za ozke ter počasi tekoče rotorje poskušamo odpraviti njihovo izsrednost oz. uravnotežiti momente teže. V našem primeru, pri katerem imamo opravka s hitrovrtječimi se rotorji, uporabljamo uravnoteženje v dveh ravninah. Tako poskušamo odpraviti masne deviacijske

momente glede na par pravokotnih osi, od katerih je ena vedno os vrtenja. Z drugimi besedami; želimo odpraviti momente centrifugalnih sil pri vrtenju.

Masno uravnoteženje rotorjev smo izvajali na avtomatizirani balansirni napravi, kjer smo rotorjem najprej ugotavljali stopnjo neuravnoteženosti. Pri postopku uravnoteženja, ki ga v nadaljevanju raziskujemo, pride do odvzemanja materiala, kar se kaže v obliki zarez na obodu rotorja (sl. 1). Le-te pa vplivajo na magnetno neuravnoteženost.

Vzrok za pojav magnetne neuravnoteženosti je v zarezah, zaradi katerih imamo v zračni reži manjšo gostoto magnetnega pretoka in posledično manjše privlačne sile, ki delujejo na rotor in stator. Ker zareze niso porazdeljene simetrično po obodu, pride do neuravnoteženega delovanja magnetnih sil na rotor, kar se kaže v rezultirajoči magnetni sili na rotor [4]. Naš namen je raziskati vpliv zarez, ki nastanejo pri uravnoteženju z odvzemanjem materiala, na velikost sil na rotor in stator ter na vibracije elektromotorja. Vpliv smo raziskovali tako eksperimentalno kakor tudi numerično.

V delu so najprej predstavljeni eksperimentalni rezultati, sledi jim predstavitev rezultatov numeričnih simulacij. Prikazana je tudi njihova primerjava.

## 1 MERJENJE VIBRACIJ ELEKTROMOTORJA

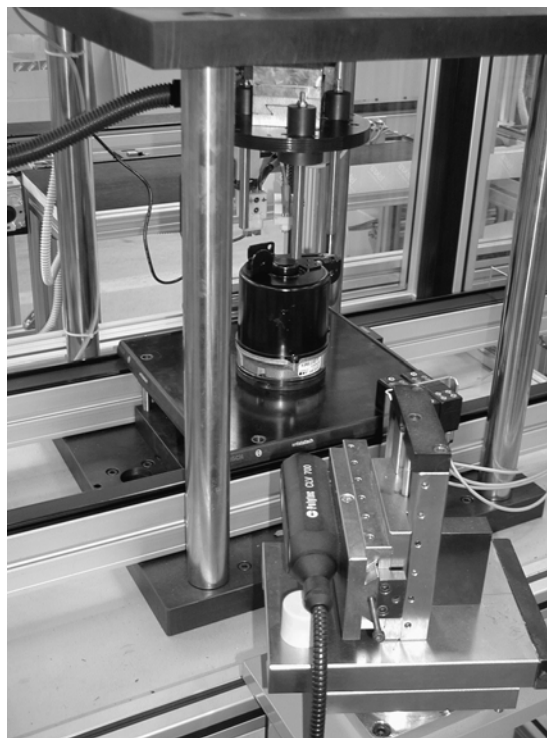
Vpliv zarez na površini rotorja na vibracije elektromotorja smo raziskovali na enosmernem elektromotorju s trajnimi magneti tipa AMJ1515. Merjenje vibracij je potekalo na proizvodni nadzorni napravi za nadzor vibracij (sl. 2) [5]. Meritve tresenja smo izvajali tako, da smo merili hitrost gibanja izbrane točke na okrovu elektromotorja. Da bi spoznali vpliv obremenitve na vibracije, kot posledico magnetne neuravnoteženosti motorja, smo meritve opravili pri različnih zaviralnih momentih elektromotorja (0,7; 0,8; ..., 1,7 Nm). Nadzorna naprava s programsko opremo in na podlagi diskretne Fourierjeve preslikave (DFP) izmerjenih vibracijskih hitrosti, oceni spekter vibracij,



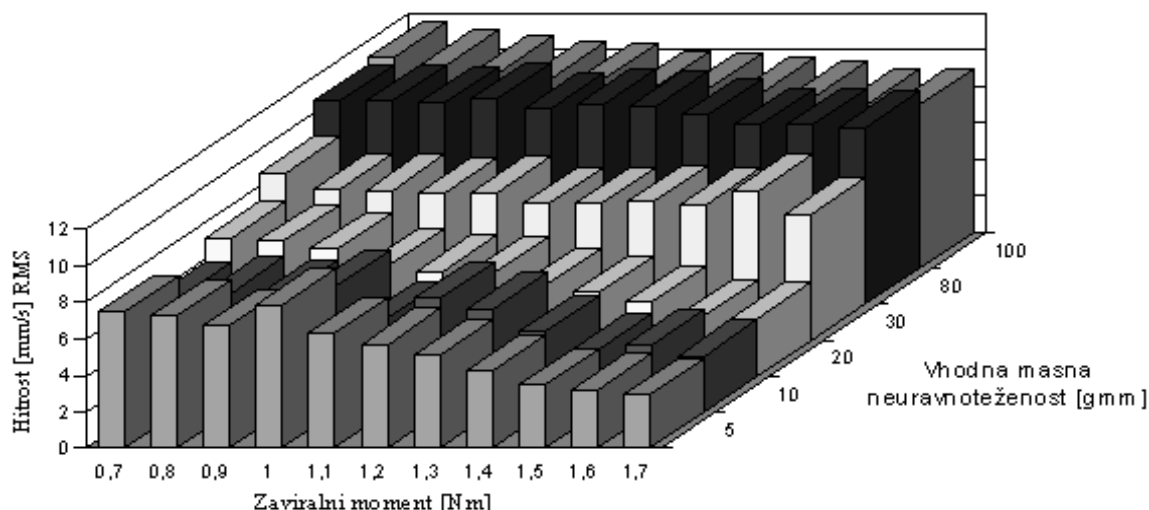
Sl. 1. Rotor z zarezami na površini

na katerem temelji najprej izračun dejanskih vrednosti vibracijskih hitrosti ter nato še harmonskih komponent, ki jih povežemo z magnetnim in masnim neuravnoteženjem rotorja [1]. To sta 1. in 2. harmonska vrtilne frekvence motorja.

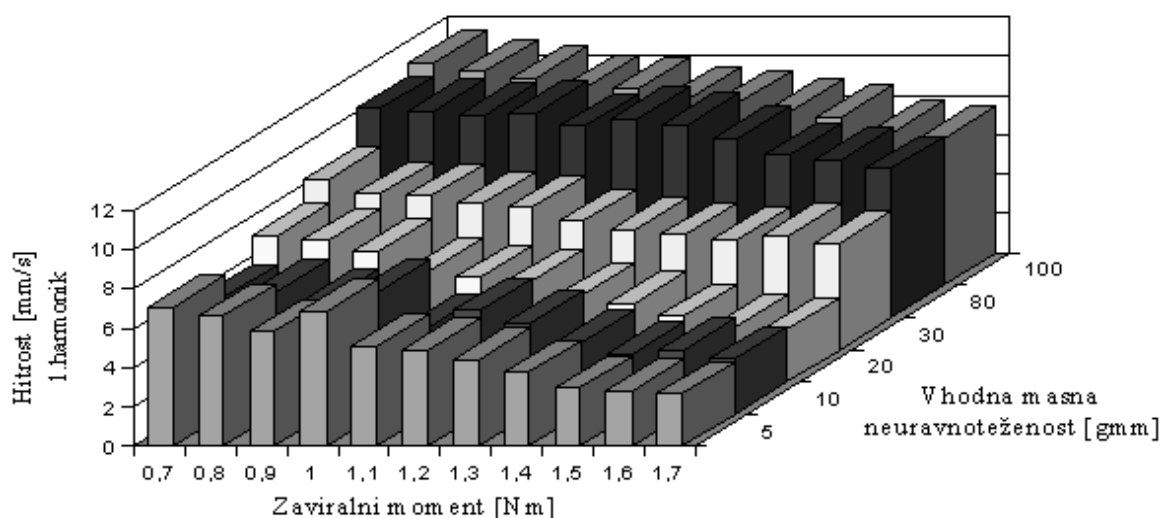
Z namenom ločitve vpliva masnega in magnetnega neuravnoteženja rotorjev smo najprej naredili več vzorcev masno neuravnoteženih rotorjev. To smo izvedli z dodajanjem materiala, tako da smo vnesli različno veliko, vendar znano masno dinamično neuravnoteženost. Rotorjem smo dodajali material tako, da je bila statična masna neuravnoteženost pri vseh rotorjih nična. Na tak način smo lahko opazovali le vpliv masne dinamične neuravnoteženosti. Tako pripravljene rotorje smo vgrajevali vedno v isti okrov elektromotorja in zanje izmerili vibracije pri različnih vrednostih zaviralnih momentov. Iste rotorje smo kasneje uravnotežili še z odvzemanjem materiala ter jih nazadnje ponovno vgradili v isto okrov elektromotorja in izmerili vibracije. Tako so imeli vsi rotorji pred merjenjem tako masno dinamično kakor tudi masno statično neuravnoteženost nižjo od 5 gmm, kolikor je tudi natančnost balansirnega stroja. Razlikovali so se le v velikosti vhodne masne dinamične neuravnoteženosti pred uravnoteženjem z odvzemanjem materiala. Slednje pomeni, da so imeli rotorji različno število zarez na površini. Na podlagi omenjenega smo kasneje lahko izvedli primerjavo vibracij istega elektromotorja z enkrat masno neuravnoteženim rotorjem in drugič z magnetno neuravnoteženim rotorjem.



Sl. 2. Nadzorna naprava za nadzor vibracij



Sl. 3. Vrednosti RMS kot funkcija zaviralnega momenta in vhodne masne neuravnoteženosti



Sl. 4. Vrednosti H1 kot funkcija zaviralnega momenta in vhodne masne neuravnoteženosti

### 1.1 Rezultati meritev vibracij elektromotorjev z rotorji, uravnoveženimi z odvzemanjem materiala

Na slikah 3 in 4 so prikazane dejanske vrednosti hitrosti gibanja točke okrova motorja, in sicer najprej na celotnem frekvenčnem območju s prikazom dejanskih vrednosti (RMS) na sliki 3 ter nato tudi v območju 1. harmonske (H1) na sliki 4 v odvisnosti od velikosti vhodne masne dinamične neuravnoteženosti za različne zaviralne momente.

Opazovali smo tudi vrednosti RMS hitrosti gibanja točke okrova pri višjih harmonskih, kjer pa spremembe niso bile značilne [4].

Meritve so pokazale, da je vpliv vhodne masne neuravnoteženosti rotorja na vibracije točke na okrovu elektromotorja velik. S slike 3, kjer je prikazan graf vrednosti RMS hitrosti tresenja v odvisnosti od zaviralnega momenta za različne velikosti vhodne masne neuravnoteženosti, in na sliki 4, kjer je prikazan graf vrednosti za H1 v odvisnosti od zaviralnega

momenta za različne velikosti vhodne masne neuravnoteženosti, se vidi, da se z večanjem vhodne masne neuravnoteženosti večajo tako vrednosti RMS kakor tudi vrednosti H1. Vrednosti RMS in H1 so za rotor z največjo vhodno masno neuravnoteženostjo (100 gmm) skoraj dvakrat večje kakor pri rotorju z najmanjšo vhodno masno neuravnoteženostjo (5 gmm). Opazimo lahko, da so pri nekaterih zaviralnih momentih vrednosti RMS in H1 pri rotorju z 80 gmm vhodne neuravnoteženosti večje kakor pri rotorju s 100 gmm vhodne neuravnoteženosti. Vendar se je treba zavedati, da na vibracije elektromotorja vplivajo številni dejavniki in ni mogoče, da bi jih povsem izločiti. Problem, s katerim smo se srečali, je bil tudi v zagotavljanju enakih vrtilnih frekvenc pri vseh elektromotorjih za določen zaviralni moment. Pri večkratnem menjavanju okrova elektromotorja prihaja tudi do obrabe ščetk, lahko pride do slabega naleganja ležajev in vrste drugih vplivov, ki različno vplivajo na rezultate meritev.

## 1.2 Primerjava rezultatov meritev vibracij elektromotorjev z rotorji pred uravnoteženjem in z rotorji po uravnoteženju

Zanimiva je primerjava vrednosti RMS hitrosti vibracij med elektromotorji z neuravnoteženimi rotorji in med elektromotorji z istimi rotorji po masnem uravnoteženju z odvzemanjem materiala. Na sliki 5 je prikazan graf odvisnosti vrednosti RMS od masne dinamične neuravnoteženosti za zaviralni moment 0,7 Nm. Treba je poudariti, da na vodoravno os v primeru uravnoteženega rotorja nanašamo vhodno masno dinamično neuravnoteženost (neuravnoteženost pred uravnoteženjem). Končna neuravnoteženost je namreč po uravnoteženju pri vseh rotorjih manjša od 5 gmm, kolikor znaša natančnost balansirnega stroja. V primeru neuravnoteženega rotorja pa na vodoravno os nanašamo masno dinamično neuravnoteženost rotorja, ki jo je imel rotor pred merjenjem vibracij.

S slike 5 je razvidno, da se z uravnoteženjem rotorja z odvzemanjem materiala vibracije elektromotorja samo povečujejo oziroma ostane nespremenjeno. Iz tega bi lahko sklepali, da je uravnoteženje rotorjev nepotrebno, vendar smo pri merjenju uporabljali samo take rotorje, katerih masna statična neuravnoteženost je znašala približno nič. V našem primeru, ko imamo kratek rotor, masna dinamična neuravnoteženost nima tako velikega vpliva na vibracije, zato tudi nismo dobili velikih tresenj pri neuravnoteženih rotorjih. Balansirni ravnini sta v našem primeru zelo blizu skupaj, zato je zaradi kratke ročice tudi moment, ki nastane zaradi masne dinamične neuravnoteženosti, majhen. Sredobežni sili se pri masni dinamični neuravnoteženosti izničita. Ker balansiramo v dveh ravninah, se dogaja pri rotorjih z veliko masno dinamično neuravnoteženostjo in najmanjšo masno statično neuravnoteženostjo to, da balansirni stroj takim rotorjem na obeh balansirnih ravninah odvzame precej materiala oziroma naredi mnogo zarez, da izniči masno dinamično

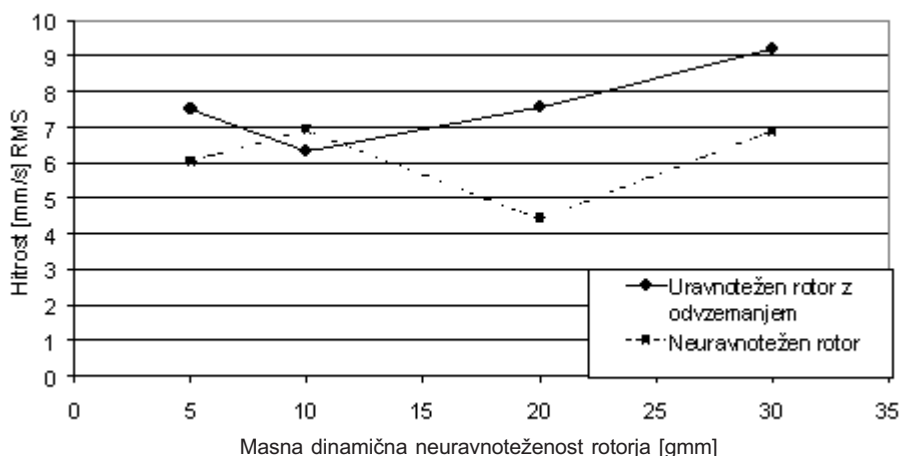
neuravnoteženost. Posledica zarez so večje vibracije elektromotorja, kakor če ga sploh ne bi uravnotežili, ker je vpliv zarez na magnetno neuravnoteženost in posledično na vibracije elektromotorja večji, kakor pa je vpliv masne dinamične neuravnoteženosti.

## 2 RAČUNANJE ELEKTROMAGNETNIH SIL Z METODO KONČNIH ELEMENTOV (MKE)

Za simulacijo magnetnih sil smo uporabili programski paket ANSYS, ki za reševanje enačb uporablja MKE. Najprej smo naredili 2D, pozneje pa še 3D model MKE elektromotorja z možnostjo vrtenja rotorja za poljuben kot. Tako smo lahko simulirali poljubno lego rotorja glede na stator. Simulirali smo tudi zarez na površini rotorja (sl. 6). Na 3D modelu smo simulirali le štiri zarez na zgornji strani in štiri na spodnji strani ter tako simulirali dinamično neuravnoteženost (sl. 7). Na teh dveh modelih smo raziskovali vpliv zarez na gostoto magnetnega toka ter posledično njihov vpliv na sile in momente na rotorju.

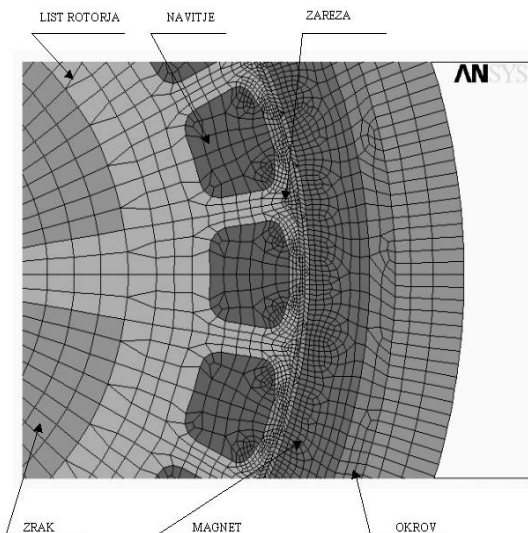
Zarez na površini rotorja porušijo simetrijo geometrijske oblike rotorja in s tem se poruši tudi magnetna simetričnost, saj se na mestu zarez pojavi krajevno povečanje zračne reže med rotorjem in magnetom. Posledica manjše gostote magnetnega polja na mestu zarez pa je na tistem mestu tudi manjša magnetna sila na rotor, kar dokazujeta tako 2D kot tudi 3D analizi MKE (sl. 8, 9).

S slik 8 in 9 je razvidno, da je na mestu zarez sila na rotor manjša. Na velikost rezultante sil na rotor vpliva lega zarez. Kadar je zarez na takem mestu, da bi bilo na tistem mestu pričakovati majhne sile, če ne bi bilo zarez, se rezultanta sil bistveno ne poveča. Na mestih, kjer je pričakovati večje sile, pa je tudi povečanje rezultante sil večje. Na sliki 10 lepo vidimo, kako se velikost rezultante sil na rotor spreminja v odvisnosti od kota vrtenja rotorja za različno število zarez na površini rotorja pri 2D modelu.

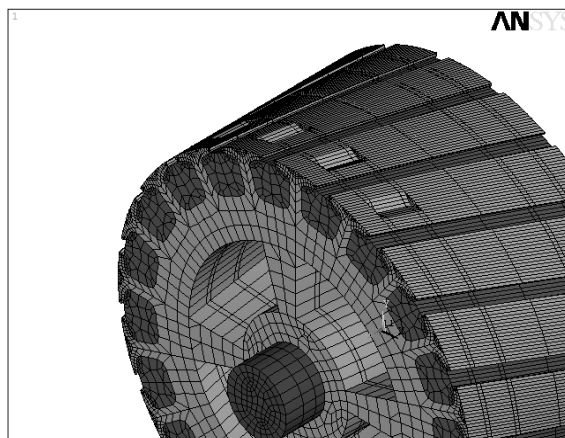


Sl. 5. Vrednosti RMS v odvisnosti od masne dinamične neuravnoteženosti rotorja za uravnotežen rotor z odvzemanjem in za neuravnotežen rotor

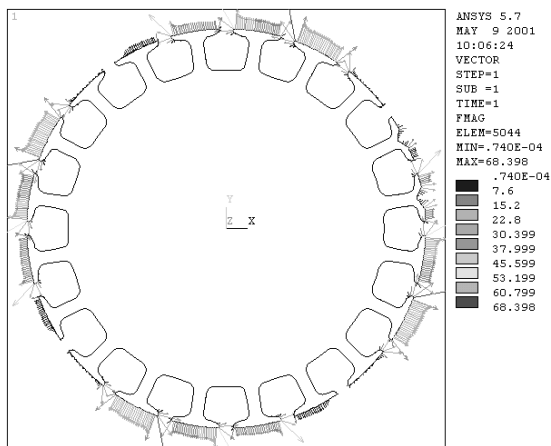




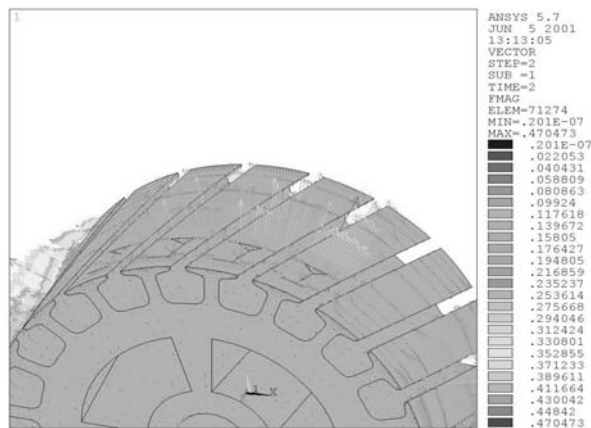
Sl. 6. 2D model rotorja MKE



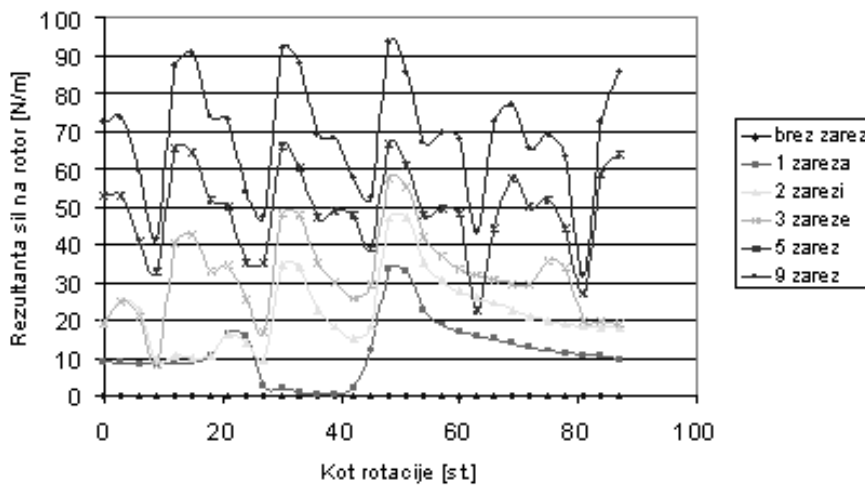
Sl. 7. 3D model rotorja MKE



Sl. 8. Magnetne sile na rotor pri 2D modelu MKE



Sl. 9. Magnetne sile na rotor pri 3D modelu MKE



Sl. 10. Graf rezultante sil na rotor v odvisnosti od kota vrtenja rotorja za različno število zarez

## 2.1 Razlaga rezultatov analize MKE

Magnetnih sil, ki delujejo na rotor in stator, ne moremo neposredno povezati z vibracijami elektromotorja. Vemo pa, da so posledica magnetne neuravnoteženosti. Velikost magnetne neuravnoteženosti izračunamo tako, da jo primerjamo z ekvivalentno masno statično neuravnoteženostjo, ki bi povzročila enako veliko silo na rotor.

Iz enačbe za sredobežno silo:

$$F_c = mr\omega^2 \quad (1),$$

kjer je  $m$  masa, ki kroži na razdalji  $r$  od osi vrtenja s kotno hitrostjo  $\omega$ , izrazimo zmnožek  $mr$ , ki pomeni velikost masne statične neuravnoteženosti in izračunamo velikost masne statične neuravnoteženosti oziroma magnetne neuravnoteženosti. Za  $F_c$  vstavimo povprečno vrednost rezultante sil na rotor, za  $\omega$  pa vstavimo ustrezno vrednost za kotno hitrost vrtenja rotorja. V našem primeru se je elektromotor vrtel s 4000 min<sup>-1</sup>. Pri 3D modelu pa z analizo MKE izračunamo skupni moment na rotor v smeri X in Y.  $F_c$  izračunamo tako, da skupni moment v smeri X in Y delimo s širino rotorja.

Za lažjo primerjavo smo izračunali tudi, kolikšno masno statično neuravnoteženost bi povzročila ena zarez dolžine enega centimetra. Masna statična neuravnoteženost mase ene zareze znaša 10,58 gmm. V preglednici 1 so prikazane vrednosti masne statične neuravnoteženosti pred uravnoteženjem, povprečna magnetna sila na rotor in magnetna neuravnoteženost za različno število zarez na površini rotorja.

Iz rezultatov v preglednici 1 je razvidno, da bi v primeru rotorja z vhodno masno statično neuravnoteženostjo (pred uravnoteženjem) 95 gmm tak rotor imel po uravnoteženju z odvzemanjem materiala na površini 9 zarez in bi njegova magnetna neuravnoteženost, ki je posledica spremembe gostote magnetnega pretoka, zaradi zarez na površini rotorja znašala 3,14 gmm. Vidimo tudi, da so rezultati pri 3D modelu približno dvakrat večji kakor pri 2D modelu. Pričakovati je večjo natančnost rezultatov pri 3D modelu, ker bolj prepričljivo popisuje obliko elektromotorja in tako upošteva tudi vpliv robnih

pogojev, ki imajo pri kratkih rotorjih toliko večji vpliv. Glede na eksperimentalno dobljene rezultate smo pričakovali večji vpliv zarez na magnetno neuravnoteženost. Vendar smo to magnetno neuravnoteženost izračunali glede na sile in momente na rotor, ki pa niso edine vzbujevalne sile.

### 3 SKLEP

Na podlagi meritev hitrosti vibracij točke na okrovu elektromotorjev z rotorji, uravnoteženimi z odvzemanjem materiala, smo ugotovili, da se dejanski vrednosti hitrosti na celotnem frekvenčnem območju, predvsem pa tudi v območju prvega harmonika, povečujeta z povečevanjem vhodne masne dinamične neuravnoteženosti. Za primer elektromotorja z rotorjem z vhodno masno dinamično neuravnoteženostjo 5 mm je znašala vrednost RMS 7,5 mm/s, vrednost H1 pa 7 mm/s; za rotor z vhodno masno dinamično neuravnoteženostjo 100 mm, je znašala vrednost RMS 11,5 mm/s in H1 vrednost 11 mm/s. S tem smo potrdili naše domneve, da število zarez, ki nastane pri uravnoteženju z odvzemanjem materiala, vpliva na velikost vibracij.

Da pa bi ugotovili, kako močan je ta vpliv, smo rezultate meritev vibracij na okrovu elektromotorjev z uravnoteženimi rotorji primerjali še z rezultati meritev istih rotorjev pred uravnoteženjem. Ugotovili smo, da je tresenje elektromotorjev z uravnoteženimi rotorji približno enako veliko in včasih celo večje kakor pri neuravnoteženih.

Z namenom potrditve vpliva uravnoteženja z odvzemanjem materiala na vibracije elektromotorjev, smo naredili še dvorazsežni in trirazsežni model elektromotorja in z analizo MKE ugotovili, da je na mestu zarez gostota magnetnega polja manjša. Zato so tam tudi manjše sile. Zaradi porušitve geometrijske in posledično magnetne simetrije pride do pojava rezultante magnetnih sil na rotor, ki se z večanjem zarez povečuje. Tudi sile na posamezne magnete se spreminjajo s spreminjanjem števila zarez. Na podlagi izračunanih magnetnih sil na rotor pri 2D modelu smo ugotovili, da bi rotor z vhodno masno statično neuravnoteženostjo 50 gmm dobil zaradi poškodbe površine pri uravnoteženju magnetno neuravnoteženost 2,2 gmm. Pri računanju s 3D modelom pa smo ugotovili, da bi rotor z vhodno

Preglednica 1. Velikosti magnetne neuravnoteženosti za določeno število zarez

Število zarez	Statična neuravnoteženost pred uravnoteženjem v gmm	Povprečna sila na rotor N	Magnetna neuravnoteženost gmm	Model
1	10,58	0,094	0,54	2D
2	21,17	0,178	1,02	2D
3	31,75	0,256	1,46	2D
4	42,32	0,716	4,08	3D
5	52,92	0,397	2,29	2D
9	95,26	0,550	3,14	2D

statično neuravnoteženostjo 40 gmm imel po uravnoteženju magnetno neuravnoteženost 4 gmm. Pri tem gre verjeti rezultatom 3D analize, pri kateri ta model bolj prepričljivo opiše dejansko obliko elektromotorja.

Zavedati se je treba, da je rezultirajoča magnetna sil na rotor le ena od povzročiteljev vibracij elektromotorja. Ne smemo zanemariti dejstva, da tudi magnetne sile na magnete vplivajo na vibracije, vendar je njihov vpliv teže ovrednotiti.

#### 4 LITERATURA

- [1] Furlan, M. (1998) Identifikacija, ovrednotenje in zmanjšanje hrupa družine enosmernih elektromotorjev, Magistrsko delo, FS Ljubljana.
- [2] Yang, S.J. (1981) Low-noise electrical motors, Clarendon Press, Oxford.
- [3] Timar, P.L. (1989) Noise and vibration of electric machines, Akademiai Kiado, Budapest.
- [4] Petrič, M. (2001) Primerjava masnega ter magnetnega neuravnoteženja rotorja z ozirom na vibracije enosmernih elektromotorjev, Diplomsko naloga, FS Ljubljana.
- [5] Vodopivec, B. (2000) Naprave za analizo kvalitete montaže ZF motorjev, Diplomsko naloga, FS Ljubljana.

Naslovi avtorjev: Matej Petrič  
Gostol-gopan d.o.o.  
Prvomajska 37  
5000 Nova Gorica  
petric.m@gostol-gopan.si

dr. Martin Furlan  
Iskra Avtoelektrika d.d.  
Polje 15  
5290 Šempeter pri Gorici  
martin.furlan@avtoel-go.si

doc.dr. Miha Boltežar  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana  
miha.boltezar@fs.uni-lj.si

Prejeto: 7.2.2003  
Received:

Sprejeto: 12.9.2003  
Accepted:

Odprto za diskusijo: 1 leto  
Open for discussion: 1 year