



MODAL AND SPECTRAL PROPERTIES OF THE ROTOR ON PERMANENT MAGNET BEARINGS

Jan Kozánek, Damien Scopel, Rudolf Svoboda, Milan Šafr*

***Summary:** In this article the spectral and modal properties of the rotor on contactless bearings are investigated. The dynamic behaviour, especially the eigenfrequencies and corresponding modes have been calculated in two different ways, by the FEM ANSYS software in the Institute of Thermomechanics and by the program DYNROT in TECHLAB company. The importance of this analysis is supported by the fact that the first non-rigid body resonance is not far from the working rotation speed 40 000 rpm .*

1. Úvod

V rámci společného projektu Ústavu termomechaniky AV ČR, Katedry elektrických pohonů a trakce FEL ČVUT, ČKD NOVÉ ENERGO, a.s., VUES, a.s. Brno a Centra mechatroniky ÚT AV ČR v Brně je vyvíjen nový způsob bezkontaktního uložení rotoru elektrického motoru pomocí permanentních magnetů. Toto uložení má být realizováno pro rotor synchronního motoru (generátoru) – viz [1]. Ještě před tím, než budou experimentálně ověřeny dynamické vlastnosti stroje při různých provozních režimech, je nutno provést předběžnou dynamickou analýzu. Je to proto, že jde o nový, netradiční způsob uložení, navíc s malou tuhostí ložisek, řádu 10^5 N/m a poměrně vysokými provozními otáčkami 40 000 ot/min. V tomto příspěvku uvádíme výsledky výpočtů vlastního kmitání navrhovaného rotoru dvěma různými programy. V Ústavu termomechaniky byl využit pro výpočet vlastních frekvencí a odpovídajících reálných vlastních tvarů kmitání programový soubor MKP ANSYS, TECHLAB, s.r.o. Praha použil vlastní programový soubor DYNROT, který kontroloval programem MKP s objemovými prvky.

2. MODEL ROTORU

Rotor byl vyroben ve VUES, a.s. Brno moderní technologií bez vinutí a pracuje na principu permanentního pole magnetů ze vzácných zemin, umístěných v plášti – Obr. 1. Také jeho uložení bude realizováno pomocí permanentních magnetických kroužků – Obr. 2,3 na bázi Fe-Nd-B z materiálu Vacodym 633 od firmy Vacuumschmelze Hanau, SRN a zmagnetovaných v axiálním směru – [1].

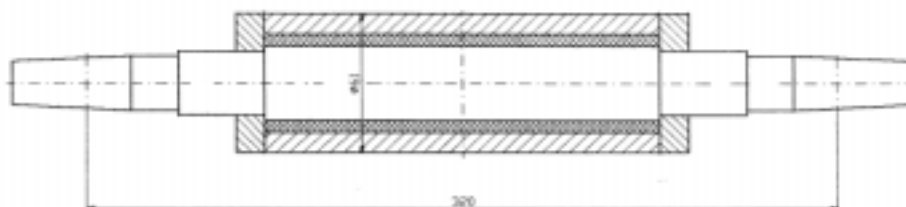
* Ing. Jan Kozánek, CSc., Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8, kozanek@it.cas.cz

Ing. M. Damien Scopel, Universita Franche-Comté, Besançon, Francie

RNDr. Rudolf Svoboda, CSc., TECHLAB s.r.o., Sokolovská 207, 190 00 Praha 9, techlab@czn.cz

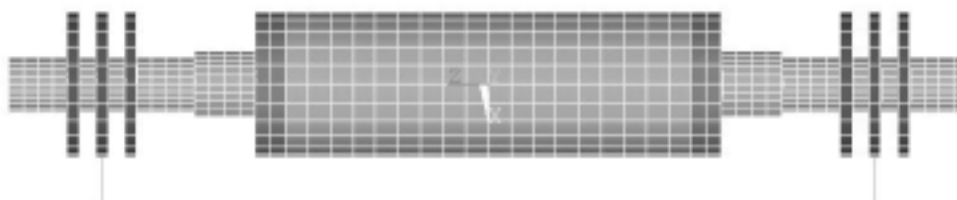
Ing. Milan Šafr, CSc., ČKD NOVÉ ENERGO, a.s., Klečákova 1947, 190 02 Praha 9

Radiální síla vzniká vychýlením kroužku ze středové polohy v radiálním směru a odpovídající tuhost tohoto uložení byla předběžně odhadnuta pro ložisko se čtyřmi satorovými a třemi rotorovými kroužky na $1,8 \cdot 10^5 \text{ N/m}$. Nástavce ložisek jsou nasazeny na kuželové konce hřídele a dotaženy šroubem a způsobují jak jeho vyztužení v místech ložisek tak i vliv přídavné hmotnosti.



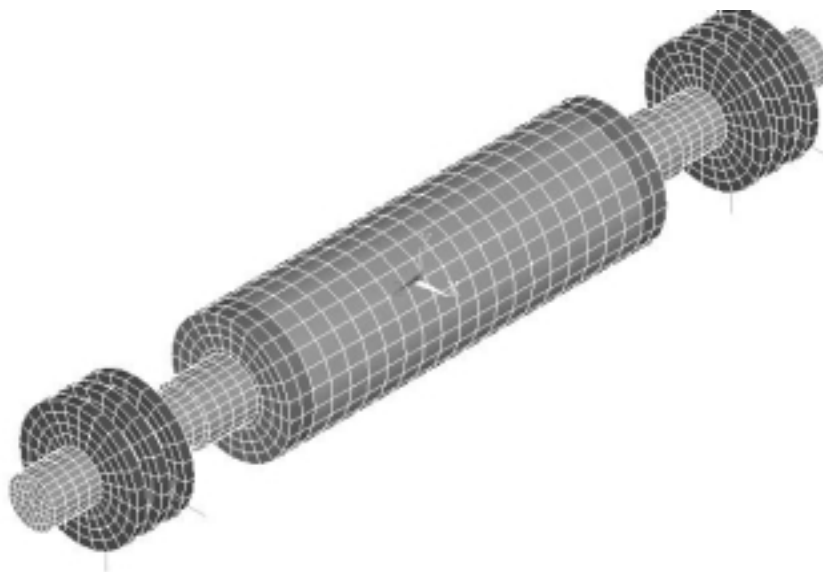
Obr. 1 Rotor s permanentními magnety v plášti a s osou rotace z, bez ložiskových kroužků

Rotor byl modelován programovým souborem ANSYS 5.6 jako prostorový – Obr. 2, 3, 4, 5, což do jisté míry umožnilo postihnout i jeho složitou vnitřní strukturu, v níž předpokládáme dynamický vliv permanentních magnetů převážně jako přídavné hmotnosti.

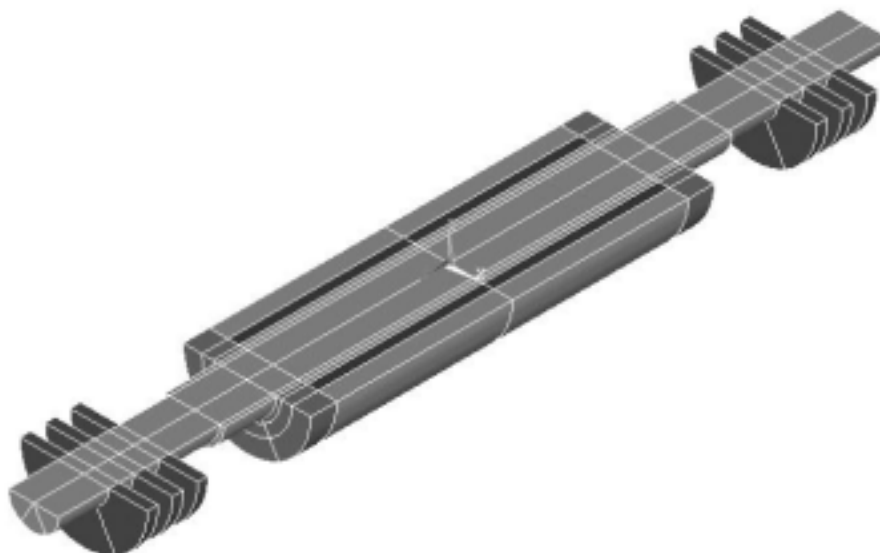


Obr. 2 Rotor s ložiskovými kroužky modelovaný prostorovými prvky MKP - rovina (z,x)

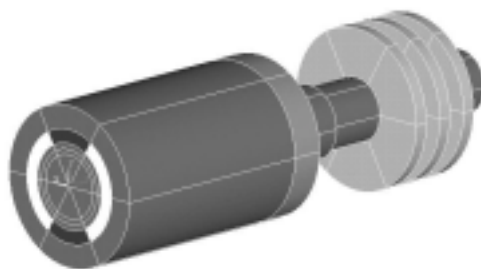
Rotor je složen z více materiálů – Obr. 4, které byly modelovány Youngovými moduly od $2,1 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ do $2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$, Poissonovým poměrem $\mu = 0,3$ a měrnými hmotnostmi 6000 kg/m^3 až 8000 kg/m^3 . Výsledný prostorový model používá prvky SOLID95 s 20 uzly a pro modelování tuhosti ložisek jednoduchý lineární prvek LINK11 se dvěma uzly ze souboru ANSYS. Celkový počet prvků byl 7012. Tlumení není v tomto modelu uvažováno. Model rotoru vykazuje malou nesymetrii střední části k osám x a y.



Obr. 3 Pohled na rotor s označením směrů působení pružin modelujících ložiskovou tuhost



Obr 4. Podélný řez rotorem a ložiskovými kroužky s označením různých typů materiálů

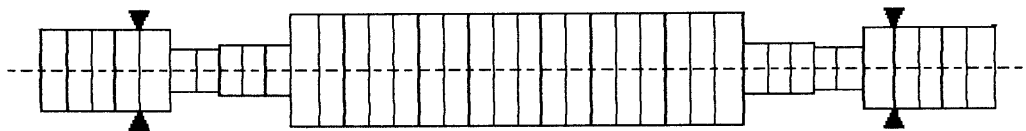


Obr. 5 Příčný řez v polovině rotoru znázorňující malou nesymetrii jeho střední části k osám x a y

Program DYNROT – [2], který pracuje pouze s jednorozměrným kontinuem, hřídel diskretizoval na 38 konečných válcových prvků – Obr. 6. Při modelování byla respektována vnitřní struktura rotoru tak, že tuhost jednotlivých prvků byla zvolena mezi dvěma krajními možnostmi, kdy ve střední části

- jsou magnety a plášť rotoru uvažovány pouze za hmotné zatížení,
- je rotor modelován podle vnějších rozměrů válcového pláště.

Konečná volba se blížila druhé, tzn. tužší variantě a byla ověřena jednoduchým programem používajícím prostorové konečné prvky (osmistěny) v celkovém počtu 2560. Stejná hmotnost válcových prvků jako u modelovaného hřídele byla dosažena jejich různými měrnými hmotnostmi. Hmotnosti na koncích hřídele, které se na tuhosti hřídele nepodílí, byly do modelu zahrnuty jako osamělé hmoty působící na jeho koncích. V modelu programu DYNROT byl rotor uvažován jako symetrický k osám x a y . V obou modelech, programových souborů ANSYS i DYNROT je rotor zrcadlově symetrický vzhledem k rovině (x,y) procházející jeho středem.



Obr. 6 Diskretizace hřídele jako jednorozměrného kontinua pro program DYNROT

3. VÝPOČET VLASTNÍHO KMITÁNÍ

Pracovní otáčky rotoru na ložiskách s permanentními magnety se předpokládají do 40 000 ot/min, případně krátkodobě až do 60 000 ot/min. Proto byl interval hledaných vlastních frekvencí shora omezen 2 000 Hz, tzn. frekvencí odpovídající dvojnásobku maximálních otáček.

V tomto frekvenčním intervalu byly vypočteny vlastní frekvence a odpovídající vlastní tvary kmitání programovými soubory ANSYS i DYNROT pro 3 základní typy uložení:

- s tuhostí ložisek odhadnutou na $1,8 \cdot 10^5$ N/m - Obr. 7,8 a Tab. 1,
- jako rotoru volného v prostoru – Tab. 2,
- rotoru v jehož levém ložisku byl zamezen posuv ve všech třech směrech souřadných os včetně rotace a v pravém ložisku byl umožněn pohyb ve směru podélné osy hřídele – Tab. 3.

Poslední typ uložení byl zvolen proto, abychom získali informaci také o vlastní frekvenci torzního kmitání. I když první torzní frekvence hřídele "vetknutého" v místě ložiska padne na hranici pracovních otáček, jde o frekvenci fiktivní, odpovídající zvolenému způsobu uchycení. Protože se ve skutečnosti hřídel volně otáčí, tato frekvence se ve spektru neobjeví. Dalším důvodem výpočtu vlastních frekvencí pro různé typy okrajových podmínek je i snaha o porovnání výsledků získaných různými výpočtovými programy. Podélným kmitáním rotoru ve směru jeho osy z se zde nezabýváme. Vlastní frekvence kmitání rotoru jako tuhého tělesa ve směru osy y a kolem osy y a vlastní frekvence ohybových kmitů v rovině (y,z) jsou prakticky totožné s hodnotami uvedenými v tabulkách a proto je v tabulkách neuvádíme, jejich existenci respektujeme alespoň pořadovými čísly.

U navrhovaného zkušebního rotoru se předpokládají významné budící síly pouze od zbytkové nevyváženosti, tzn. harmonické síly s otáčkovou frekvencí.

Vlastní frekvence kmitání rotoru jako tuhého tělesa dané odhadnutou ložiskovou tuhostí (a jeho celkovou hmotností resp. příslušnými momenty setrvačnosti) jsou velmi nízké do 75 Hz, tzn. do 4 500 ot/min. Navíc se u nich mohou uplatnit menší tlumící schopnosti ložisek s permanentními magnety alespoň tím, že výchylky v ložiskách budou srovnatelné s výchylkami po délce rotoru u posuvného pohybu ve směrech os x resp. y a v ložisku téměř maximální při kývání rotoru kolem osy x resp. y .

Pro provoz rotoru tedy představují největší nebezpečí vlastní, převážně ohybové kmity, jejichž první vlastní frekvence (v rovině (z,x)) 1058,9 Hz (DYNROT) resp. 1293,1 Hz (ANSYS) není příliš daleko od maximálních předpokládaných otáček. S ohledem na malé tlumení u navrhovaného typu ložisek a protože navíc i uzly ohybových tvarů kmitání budou v jejich blízkosti, lze rezonanci očekávat jako velmi významnou a nebezpečnou.

S ohledem na relativně malou tuhost ložisek ve srovnání s tuhostí hřídele jsou vlastní frekvence ohybového kmitání na ložiskách a rotoru volného v prostoru prakticky stejné. To znamená, že případné přeladění prvního ohybového vlastního kmity je možné pouze změnou ložiskové vzdálenosti (jejím zkrácením) nebo vyztužením hřídele mezi ložisky a koncem jeho střední části.

Systematický rozdíl vyšších hodnot vlastních frekvencí určených souborem programů ANSYS v porovnání s programy DYNROT si vysvětlujeme rozdílným způsobem vytvoření matematického modelu, zejména ve střední části rotoru a odlišnou realizací okrajových podmínek.



Obr. 7 První ohybový tvar vl. kmitu (1293,1 Hz) v rovině (z,x) pro ložiskovou tuhost $1,8 \cdot 10^5$ N / m



Obr. 8 Druhý ohybový tvar vl. kmitu (1899,2 Hz) v rovině (z,x) pro ložiskovou tuhost $1,8 \cdot 10^5$ N / m

Pořadí	ANSYS		DYNROT		Vlastní tvar (posuv, rotace)
	[Hz]	[ot/min]	[Hz]	[ot/min]	
3.	40,38	2423	38,75	2325	ve směru x (TT)
5.	73,51	4411	62,00	3720	kolem x (TT)
7.	1293,1	77586	1058,95	63537	1. ohybový v (z,x)
9.	1899,2	113952	1820,9	109254	2. ohybový v (z,x)

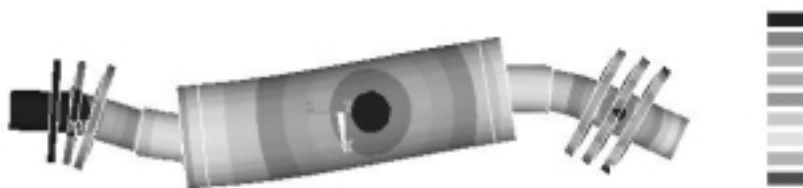
Tab. 1 Vlastní frekvence pro ložiskovou tuhost $1,8 \cdot 10^5$ N / m ; TT – tuhé těleso, frekvence kmitání odpovídající axiálnímu posuvu, příslušné rotaci kolem této osy, ve směru y, kolem osy y a ohybovým kmitům převážně v rovině (y,z) nejsou uvedeny

Pořadí	ANSYS		DYNROT		Vlastní tvar (posuv)
	[Hz]	[ot/min]	[Hz]	[ot/min]	
7.	1290,9	77454	1057,5	63450	1. ohybový v (z,x)
9.	1898,8	113928	1820,8	109248	2. ohybový v (z,x)

Tab. 2 Vlastní frekvence rotoru volného v prostoru; nulové frekvence, odpovídající kmitání rotoru jako tuhého tělesa a ohybovým kmitům převážně v rovině (y,z) nejsou uvedeny



Obr. 9 První ohybový tvar vl. kmitu (730,7 Hz) v rovině (z,x) při vetknutí v levém a podepření v pravém ložisku



Obr. 10 Druhý ohybový tvar vl. kmitu (1973,57 Hz) v rovině (z,x) při vetknutí v levém a podepření v pravém ložisku

Pořadí	ANSYS		DYNROT		Vlastní tvar (posuv, rotace)
	[Hz]	[ot/min]	[Hz]	[ot/min]	
1.	710,8	42647	903,1	54186	1. torzní kolem (z)
2.	730,7	43843	687,7	41262	1. ohybový v (z,x)
4.	1973,5	118410	1807,4	108444	2. ohybový v (z,x)

Tab. 3 Vlastní frekvence pro případ vetknutí v levém a podepření v pravém ložisku; frekvence kmitání odpovídající ohybovým kmitům převážně v rovině (y,z) nejsou uvedeny

4. ZÁVĚR

Nadměrné kmitání rotoru při provozu může být způsobeno 1. ohybovým tvarem kmitu jehož vlastní frekvence se sice nachází nad pracovními otáčkami, ale v případě experimentálních zkoušek na otáčkách až 60 000 ot/min přejde v kmitání rezonanční, navíc s malým odpovídajícím tlumením. Pokud by měly být pracovní otáčky rotoru zvýšeny, bylo by nutné provést konstrukční úpravy na hřídeli (vyztužení) nebo na magnetických ložiskách (zvýšení tlumení).

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vypracován v rámci řešení grantového projektu “Stabilita a řízení rotorů na magnetických ložiskách” GA ČR č. 101/00/1471.

5. LITERATURA

- [1] Kozánek J., Stolařík M., Šafr M.: Ložiska s permanentními a řízenými magnety, In.: Sborník Kolokvia Diagnostika a aktivní řízení 2000, Třešť, 2000, s. 29
- [2] Svoboda R.: Analýza dynamických vlastností zkušebního rotoru při různých parametrech uložení a přehled možností měření vibrací, Technická zpráva TECHLAB s.r.o., Praha, 2000