

## Vliv nesymetrie rotoru na pulsaci radiální síly u elektricky komutovaného motoru

*Bc. Martin Rolf, Ing. Miroslav Novák, Ph.D.*

### Abstrakt

Práce se zabývá tvorbou modelu EC motoru s vnějším rotorem a vnitřním segmentovým statorem. Seznamuje s principy modelování magnetických a silových účinků v motoru metodou konečných prvků a přináší základní poznatky z problematiky o vlivu asymetrie rotoru na pulsaci radiální síly. Pro vytvoření modelu využívá sadu programů souhrnně nazývaných FEMM, obsluhovaných programovacím jazykem Lua. Podrobně se práce věnuje modelování rotoru, který reflektuje nastavení reálných pólových permanentních magnetů změřených Hallovo sondou. V závěrečné části seznamuje s analýzou radiální síly u EC motoru, nazývané zkráceně jako UMP. Na základě dosažených výsledků vyhodnocuje vliv rotorových vad na pulsaci radiální síly.

---

### Úvod

Zkoumaným objektem je elektricky komutovaný motor vyvinutý v komerčním sektoru, který dosahuje vysokých otáček (více než 100 000 rpm). Pohon vykazuje vysokou citlivost na přesnost mechanického provedení, proto v některých případech dochází ke vzniku vibrací, které svým působením znemožňují správnou funkci motoru. Požadavkem je odhalit zdroj těchto vibrací, přičemž prvotní podezření směřuje na rotorovou část.

Cílem práce je vytvoření modelu EC motoru na základě dostupných parametrů reálné předlohy, seznámit se s problematikou nesymetrií motoru a vybrané příčiny aplikovat do modelu. Dalším cílem je analyzovat získaná data z uskutečněných simulací a vyhodnotit vliv nesymetrií, respektive excentricity, na UMP.

### Experiment a metody

Návrh, simulace a výpočty veličin modelu elektricky komutovaného (EC) motoru jsou uskutečněny v programu FEMM, který umožňuje řešit elektromagnetické úlohy pomocí metody konečných prvků. Model je simulován za statických podmínek při zvolené konfiguraci, natočení rotoru a nastavení fázových proudů vinutí. Nadefinovanou úlohu následně řeší metoda konečných prvků. Na základě získaných hodnot rozložení magnetického pole jsou v post-processingu určeny radiální síly působící ve směru osy x a y, přičemž metodiku výpočtu popisuje [1] a [3]. Radiální síly je vhodné převést z hlediska projevu na vektor UMP (nevyvážený magnetický tah) s velikostí danou rovnicí (1) a úhlem vyjádřeným rovnicí (2).

$$UMP = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (1)$$

$$\varphi_{UMP} = \operatorname{tg}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \quad (2)$$

Geometrie je navrhována ve dvojdimenzionální úloze (příčný řez motoru), přičemž třetí rozměr (hloubka motoru) je zadán jako parametr. Výhoda tohoto přístupu spočívá v zjednodušeném modelu, který umožňuje shodný výpočet potřebných veličin jako při návrhu 3D. Při definování vlastností rotorové části byl kladen důraz zejména na přesnost polarizace jednotlivých segmentů pólu. Nastavení prošlo verifikací s hodnotami indukce měřenými Hallovo sondou ve vzduchové mezeře skutečného rotoru. Podoba statoru vychází z parametrů vzorového EC motoru. Doplněním vlastností prostředí a hraničních podmínek vznikla konečná podoba EC motoru.

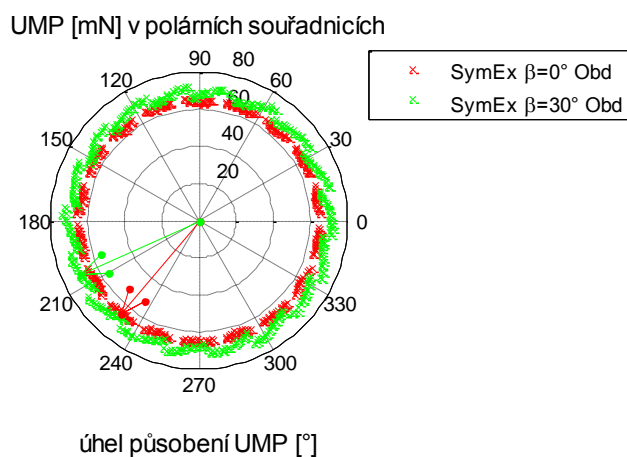
### Rozšířený Abstrakt

Ovládat program FEMM je vhodné příkazy jazyka Lua. Pomocí makra napsaného v tomto jazyce lze vytvořit celý návrh úlohy a její zpracování včetně nastavení veškerých potřebných parametrů. Cyklickým otáčením rotoru o zvolený krok umožnilo naměřit průběh radiální síly v rozsahu jedné otáčky.

Do základního symetrického modelu byly implementovány potenciální vady, které se mohly u daného typu motoru vyskytnout. Konkrétně byla simulována varianta nevycentrovaného statoru motoru, posunutého pólu (magnetu) rotoru a jejich kombinace. Testována byla i vada v podobě snížení magnetického účinku jednoho z pólu.

### Výsledky a diskuze

Výsledkem práce je analýza průběhu radiálních sil u elektricky komutovaného motoru během jedné otáčky. S ohledem na projevy byla simulována statická excentricita posunutím statoru z centra motoru. Dynamická excentricita se projevila při posunutí pólu rotoru nebo změně magnetických účinků jednoho z pólu. Na základě zjištění pólového posunutí při měření indukce v okolí reálného rotoru je uveden průběh rotujícího vektoru UMP na obrázku 1. Vektor se pohybuje rychlostí rovnající se otáčkám motoru a na jeho průběh má vliv i volba statorových proudů.



**Obrázek 1.** Průběh vektoru UMP během otáčky rotoru ( $\beta$  – zátěžný úhel)

### Závěr

Výstupem této práce je model EC motoru s jednoduchým řízením obdélníkovými a sinusovými průběhy proudů. Model prošel řadou modifikací v podobě statické a dynamické excentricity, u kterých došlo k vyšetření radiálních sil a UMP. Měřením reálného rotoru byla odhalena vada v podobě pólového posunutí, která byla označena za možný zdroj vibrací. Simulace tuto myšlenku potvrdila. Podobný účinek dosahuje model se snížením magnetické indukce jednoho pólu rotoru, přičemž tato vada nebyla u reálného rotoru naměřena.

Při srovnání reálného EC motoru a jeho modelu je třeba zmínit několik základních zjednodušení, k nimž se muselo přistoupit. Simulace jsou prováděny za statických podmínek, nejsou tak zahrnuty přechodové děje. Neuplatní se některé jevy, jako např. vířivé proudy, hysterezní ztráty a deformace mechanických částí.

### Reference

- [1] MEEKER, D. Finite Element Method Magnetics, Version 4.2 User's Manual. [online]. [cit. 2013-03-31] 2010. Dostupné z: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
- [2] PUC-RIO. Lua: the programming language [online]. Thu Nov 22 21:50:19 BRST 2012 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.lua.org/>
- [3] DORRELL, D. G., POPESCU, M.. Unbalanced Magnetic Pull Due to Asymmetry and Low-Level Static Rotor Eccentricity in Fractional-Slot Brushless PM Motors With Surface-Magnet and Consequent-Pole Rotors. IEEE Transactions on magnetics, Vol. 46, No. 7, July 2010.