

Numerický výpočet zploštění magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Jan Laksar

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

laksar@kev.zcu.cz

Numerical calculation of the flattened air gap magnetic flux density

Abstract – In this paper, calculation of one of the parameters affecting the air gap magnetic flux density is described. It is the saturation effect which causes the flattening of the flux density distribution. The flattening is calculated numerically by the application of the nonlinear BH curve of used electrical steel.

Keywords – Air gap; magnetic flux density; flattening

I. ÚVOD

Znalost rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře se stala důležitou součástí návrhu elektrických točivých strojů. To je však možné určit až na po návrhu stroje pomocí metody konečných prvků. Existují články, které se věnují analytickému výpočtu rozložení indukce ve vzduchové mezeře [1], [2]. Ty však většinou uvažují pouze vliv otevření drážek a tím způsobenou pulzaci magnetické indukce. Důležitým faktorem kromě otevření drážek je také rozložení vinutí a zejména vliv sycení stroje, který se projevuje ve zploštění indukce ve vzduchové mezeře. Použitím rozloženého satorového vinutí je ideální průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře považován za sinusový. Vlivem výše uvedených faktorů se může skutečný průběh od ideálního velmi odlišovat.

II. ZAHRNUTÍ VLIVU SATURACE DO ANALYTICKÝCH VÝPOČTŮ

Za předpokladu ideálního magnetického obvodu, veškerá energie elektromechanického systému je koncentrována ve vzduchové mezeře. Vzhledem k nelineární BH charakteristice elektrotechnických plechů může dojít v místě amplitudy magnetické indukce k saturaci. Efekt saturace je umocněn drážkováním statoru a rotoru a průběh magnetické indukce je pak zploštělý. Magnetický tok připadající na jeden pól se však nemění a lze jej vypočítat jako

$$\Phi = \int_0^{\tau_p} B_{\delta}(x) l dx \quad (1)$$

kde B_{δ} je amplituda indukce ve vzduchové mezeře,

τ_p je pólová rozteč

a l je délka satorového plechového svazku.

Definováním průměrné indukce ve vzduchové mezeře jako $B_{av} = \alpha_i B_{\delta}$, rovnice pro magnetický tok může být vyjádřena vztahem

$$\Phi = \alpha_i B_\delta l \tau_p, \quad (2)$$

kde α_i je činitel pólového krytí.

Koeficient α_i je dán průměrnou magnetickou indukcí na jeden pól. Pro sinusové rozdělení magnetické indukce je $\alpha_i = 2/\pi = 0,64$. Vlivem zploštění indukce roste hodnota koeficientu α_i . Teoretické maximum je 1, v praxi nebývá překročena hodnota $\alpha_i = 0,77$. Zploštění indukce je důležité vzít v úvahu již při návrhu stroje a v různých literaturách je většinou popsáno podobně [3]. Je definovaný koeficient k jako

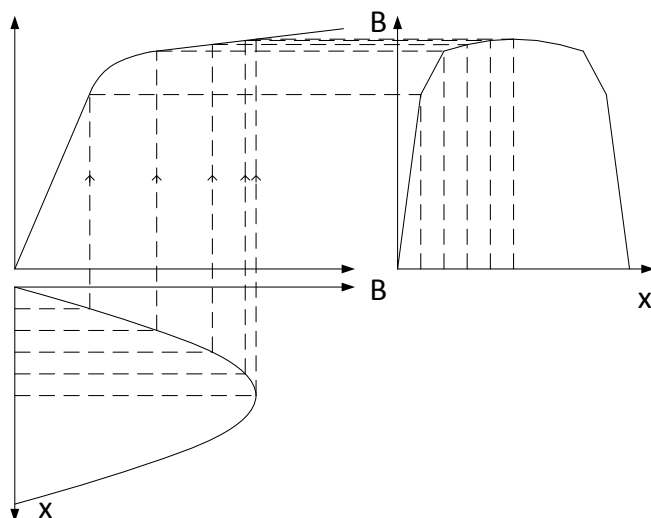
$$k = \frac{U_{mtot} - U_{m\delta}}{U_{m\delta}}, \quad (3)$$

kde U_{mtot} je součet magnetických napětí celého magnetického obvodu
a $U_{m\delta}$ je magnetické napětí dvou vzduchových mezer

Jinými slovy, k je poměr mezi magnetickým napětím železné části a oblasti vzduchové mezery. Na jeho základě je pak zpravidla graficky odvozen činitel pólového krytí α_i .

III. NUMERICKÝ VÝPOČET

Zploštění je způsobeno saturací magnetického obvodu dané jeho BH charakteristikou. Takže BH charakteristika magnetických plechů může být použita k získání zploštění dle Obrázku I.



Obrázek I. Převod na zploštěný průběh magnetické indukce

Z BH charakteristiky je většinou zadáno pouze pár bodů. Pro určení správného zploštění indukce bude nutné tyto body aproximovat vhodnou spojitou funkcí pomocí metody nejmenších čtverců. Tou se nejjednodušeji hledají koeficienty polynomu, tudíž pro jednoduchost budeme prokládat přímkou ve tvaru

$$B = a_1 \cdot H_{ln} + a_0, \quad (4)$$

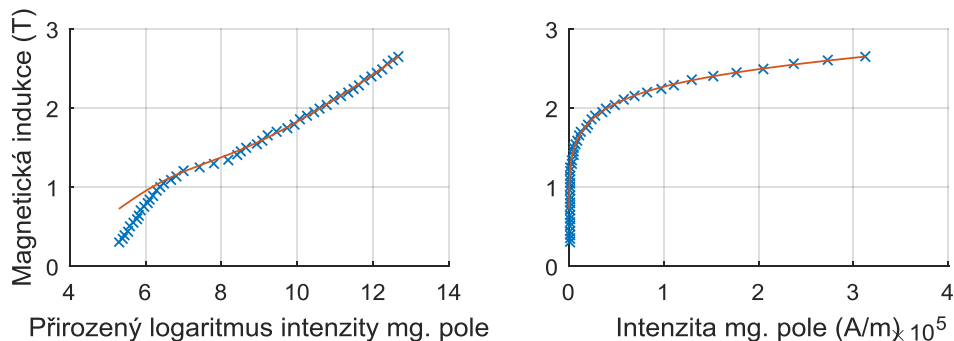
kde H_{ln} je přirozený logaritmus intenzity magnetického pole $H_{ln} = \ln(H)$
a a_i jsou koeficienty proložené přímkou.

Příklad BH charakteristiky v logaritmickém měřítku je zobrazen na Obrázku II. Je patrné, že se charakteristika od přímky odlišuje. Aby bylo možné získat lepší aproximaci, je možné použít aproximační polynom vyššího stupně. Ale s rostoucím stupněm polynomu roste také počet lokálních extrémů proložené funkce. Proto byl maximální možný stupeň polynomu zvolen 7. Zároveň je nutné aproximovanou funkci posunout, aby procházela počátkem souřadného systému (v lineárních souřadnicích). Výsledná aproximovaná funkce má tvar

$$B = \sum_{i=0}^7 a_i \cdot (\ln(H + H_0))^i, \quad (5)$$

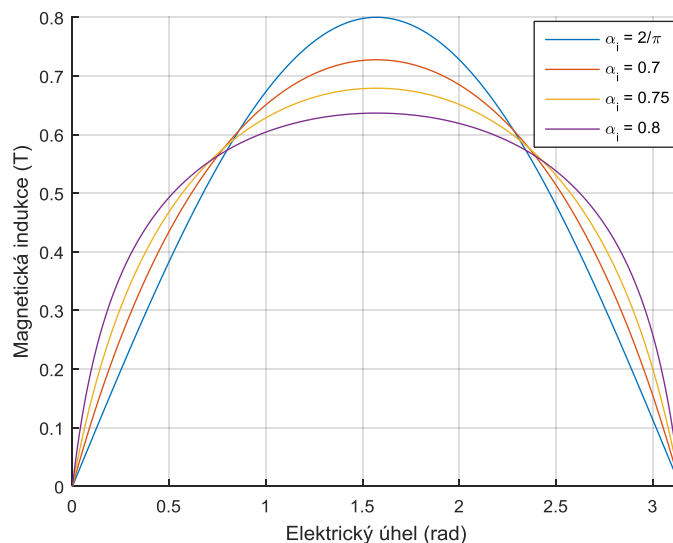
kde H_0 je průsečík aproximované BH charakteristiky s osou x.

Reálný posun aproximované křivky je pouze o desítky až stovky ampérů na metr, takže prakticky neovlivní položenou funkci. Příklady BH charakteristiky a její aproximace je zobrazen na Obrázku II.



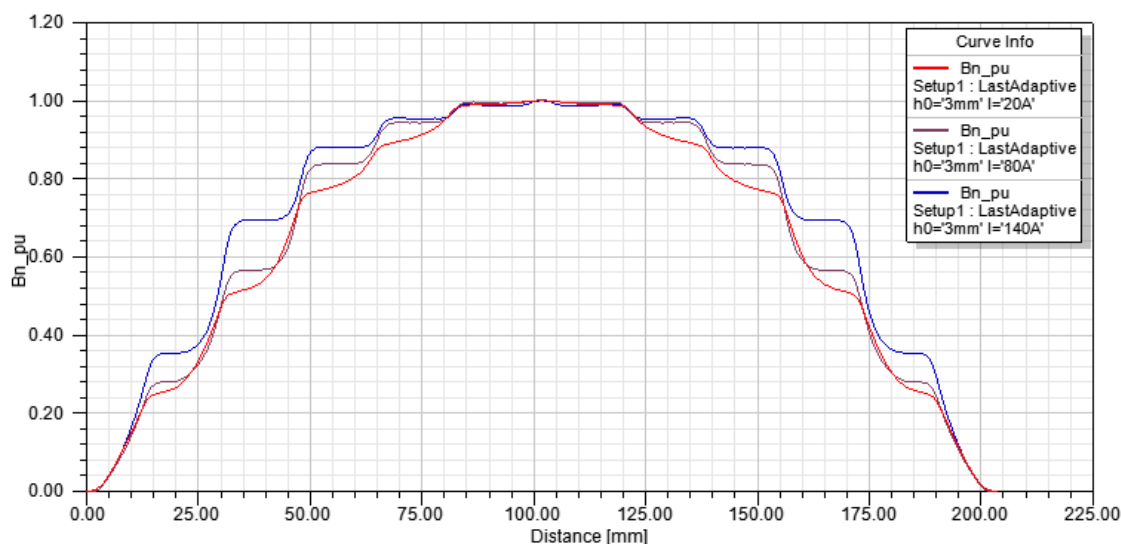
Obrázek II. Aproximace tří různých BH charakteristik

Po výpočtu převodní funkce, výpočet zploštění je proveden dle principu na Obrázku I. Protože celkový magnetický tok Φ zůstává konstantní, amplituda magnetické indukce klesá s rostoucím koeficientem α_i . Nalezení správného průběhu je iterativní proces, kdy je při každém kroku počítána průměrná hodnota magnetické indukce B_{av} a činitel α_i . Příklad vypočtených průběhů pro různé koeficienty α_i je zobrazen na Obrázku III.



Obrázek III. Průběh magnetické indukce pro různé činitele pólového krytí

Bylo by vhodné nyní zkontrolovat průběhy vypočtené numericky a metodou konečných prvků. Nelze však sestavit takovou geometrii, kde by jediný účinek na indukci ve vzduchové mezeře mělo sycení magnetického obvodu, a vliv drážkování byl zanedbán. Použitím geometrie s dostatečně malým otevřením drážek lze potlačit pulzaci indukce a zobrazit pouze vliv sycení společně s rozložením vinutí do drážek. Na Obrázku IV lze pozorovat vytlačení magnetického toku směrem od pozice maximální hodnoty, a tedy je potvrzeno zploštění indukce s rostoucím sycením obvodu. Není však možné porovnávat amplitudy indukce, protože byly použity rozdílné napájecí proudy.



Obrázek IV. Potvrzení zploštění indukce metodou konečných prvků

IV. ZÁVĚR

V článku je popsána část numerického výpočtu průběhu indukce ve vzduchové mezeře, konkrétně vliv saturace magnetického obvodu na zploštění indukce. Výpočet zploštění je proveden pomocí nelineární BH charakteristiky použitých elektrotechnických plechů. Ověření správnosti výsledků pomocí metody konečných prvků není v tomto stadiu možné, protože nelze v konečněprvkovém modelu zahrnout pouze sycení magnetického obvodu bez vlivu uložení vodičů v drážkách. Proto bude nutné nejprve zkombinovat více vlivů na průběh indukce ve vzduchové mezeře a pak ověřit metodou konečných prvků.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK1-2016-006 a projektu SGS-2015-038: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích II.

LITERATURA

- [1] C. A. M. Weber, F. W. Lee, "Harmonics Due to Slot Openings", in *Journal of the A.I.E.E.*, vol. 43, pp. 1129-1132.
- [2] G. Dajaku, D. Gerling, "Determination of Air-Gap Flux Density due to Magnets using the New Analytical Model", v *Electrical Machines (ICEM)*, 2010 XIX International Conference on, Sept. 2010.
- [3] J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, "Design of Rotating Electrical Machines", 2nd ed., Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, 2014.