

Vliv tuhosti statorového svazku na modální vlastnosti elektrických strojů točivých

Influence of stator stiffness on modal properties of rotating electrical machines

Daniel Dušek, Kirill Solodyankin

dusek@fme.vutbr.cz, solodyankin@ekolbrno.cz

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Abstrakt: Článek se zabývá vlivem tuhosti statorového svazku na modální vlastnosti točivých elektrických strojů. V článku je popsán postup výpočtu tuhosti statorového pro různé hodnoty výrobních tolerancí statorových plechů, které byly následně použity při výpočtu vlastních frekvencí a tvarů statoru synchronního generátoru.

Abstract: This paper deal with an influence of stator stiffness on modal properties of rotating electrical machines. In this paper a process of calculation of stator stiffness for different values of manufacturing tolerances is described. The calculated stator stiffness will consequently used for calculation of modal shapes and frequencies of whole stator part of the rotating electricla machine.

VLIV TUHOSTI STATOROVÉHO SVAZKU NA MODÁLNÍ VLASTNOSTI ELEKTRICKÝCH STROJŮ TOČIVÝCH

Ing. Daniel Dušek Ph.D.,

Ing. Kirill Solodyankin,

Ústav Mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno

Email: dusek@fme.vutbr.cz, solodyankin@seznam.cz

Abstrakt – Článek se zabývá vlivem tuhosti statorového svazku na modální vlastnosti točivých elektrických strojů. V článku je popsán postup výpočtu tuhosti statorového pro různé hodnoty výrobních tolerancí statorových plechů, které byly následně použity při výpočtu vlastních frekvencí a tvarů statoru synchronního generátoru.

1. ÚVOD

Stejně jako při návrhu všech konstrukcí vystavených působení časově proměnných sil, tak i při návrhu točivých elektrických strojů by se měl značný důraz klást na jejich budoucí modální vlastnosti, tzn. navrhnout konstrukci stroje tak, aby jeho vlastní frekvence neležely v blízkosti frekvencí budících, o čemž rozhoduje jednak hmotnost stroje a jednak jeho tuhost. Dlouhodobý provoz konstrukce v blízkosti rezonančních frekvencí je nežádoucí v lepším případě z důvodu zvýšené hlučnosti stroje a v horším případě z důvodů zvýšeného mechanického namáhání s možnými fatálními následky, které mohou vyústit až v celkovou destrukci konstrukce.

Na modální vlastnosti točivých elektrických strojů má velice významný vliv statorový svazek. Jednak představuje mnohdy až polovinu hmotnosti statoru a jednak výrazně přispívá k celkové tuhosti statoru. Statorový svazek je složen ze statorových plechů, na jejichž vnějším obvodu jsou drážky, ve kterých je uloženo statorové vinutí. Statorové vinutí je od statorových plechů odděleno izolací, naimpregnováno a zaklínováno. Statorové vinutí je složeno v případě nízkonapěťových vinutí z jednotlivých drátů kruhového průřezu, nebo v případě vysoko napěťového vinutí ze čtvercových tyčí. Celý statorový svazek je tedy poměrně složitá struktura a modelování jeho chování z hlediska mechaniky je značně komplikované.

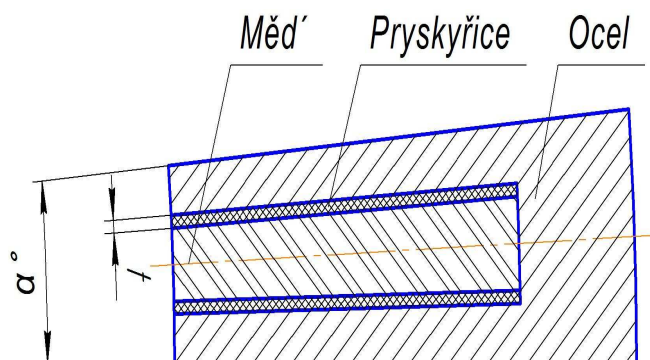
V praxi je nutno model statorového svazku z důvodu úspory výpočetního času výrazně zjednodušit. Obvykle se statorové vinutí modeluje pouze jako dutý válec popřípadě jako dutý válec s drážkami, tak aby výsledná tuhost a hmotnost válce co nejlépe odpovídala skutečné hmotnosti a tuhosti celého statorového svazku [2-8]. Obvykle však není popsán postup, jak byla tato ekvivalentní tuhost a hmotnost určena s výjimkou článku [1], kde je popsán postup měření modulu pružnosti statorového svazku na reálném vzorku pomocí ultrazvuku. Tento postup zjišťování modulu pružnosti při návrhu elektrických strojů je však v praxi možné aplikovat pouze v případě malých elektrických strojů, kde navíc náklady na výrobu prototypů pro ověření vlastností před samotnou sériovou výrobou nejsou velké. V případě větších strojů je nutno tuhost statorového vinutí zjistit nějak jinak.

Cílem této práce bylo určení vlivu různé tuhosti statorového svazku na změnu vlastních tvarů a vlastních frekvencí statoru elektrického stroje. Výpočty byly prováděny konkrétně na modelu vertikálního synchronního generátoru pro malé vodní elektrárny o průměru 1600mm.

2. POSTUP VÝPOČTU TUHOSTI STATOROVÉHO SVAZKU

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1 je z důvodu dosažení rozumných výpočetních časů (popř. dosažení řešitelnosti úlohy vůbec) potřeba vytvořit zjednodušený model statorového svazku. Tento zjednodušený model by se však měl svými mechanickými vlastnostmi co nejvíce blížit vlastnostem skutečného statorového svazku. Celý statorový svazek byl modelován jako dutý válec s přepočítanou ekvivalentní hustotou a modulem pružnosti.

Přepočet ekvivalentní hustoty je velice jednoduchý, neboť hmotnost statorového svazku je většinou známá a objem dutého válce je možno velice lehce spočítat. Pak ekvivalentní hustotu lze spočítat jako podíl celkové hmotnosti statorového svazku a objemu dutého válce.

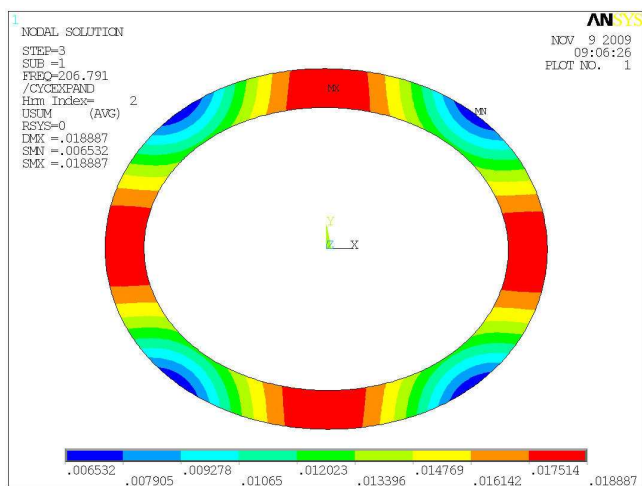


Obr. č. 1: Schéma jednoho segmentu použitého při výpočtu vlastních frekvencí statorového svazku

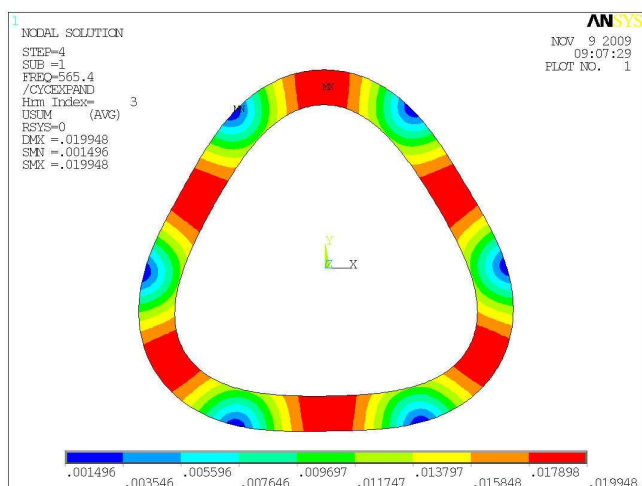
Podstatně složitější situace nastává v případě výpočtu ekvivalentní tuhosti. Na celkovou tuhost statorového svazku má značný vliv tloušťka impregnační vrstvy oddělující vinutí od statorových plechů, tvar a materiál zaklínování, použitý typ vinutí (měděné dráty nebo čtvercové tyče) atd.. Vzhledem k tomu, že jak statorové plechy, tak i statorové vinutí je vyráběno s určitými

tolerancemi, tak je výsledná tloušťka impregnační vrstvy po výrobě předem neznámá a může se pohybovat v určitém rozmezí.

Postup výpočtu ekvivalentní tuhosti dutého válce byl následující: nejdříve byly spočítány první dvě vlastní frekvence statorového svazku s namodelovaným vnutím a impregnační vrstvou. Poté byl hledán takový modul pružnosti dutého válce, který by měl první dvě vlastní frekvence přibližně stejné jako model se zahrnutím impregnační vrstvy a vnutí. Při řešení nebylo uvažováno se zaklínováním vnutí, a to protože pro řešený případ (tj. synchronní generátor) byly použity k zaklínování laminátové pásy, u nichž nebyly známy přesné hodnoty modulu pružnosti a hustoty. Schéma jednoho segmentu použitého při výpočtu vlastních frekvencí statorového svazku je zobrazeno na obrázku 1. V tomto případě se jedná o výpočet s vysokonapětovým vnutím ve formě obdélníkových tyčí.



Obr. č. 2: První vlastní tvar statorového svazku



Obr. č. 3: Druhý vlastní tvar statorového svazku

Výpočty ekvivalentního modulu pružnosti byly provedeny pro různé hodnoty tloušťky impregnační vrstvy od 0,1mm do 1mm. Toto rozmezí by mělo jednak zajistit variabilitu výrobních nepřesností a jednak také možný vliv statorových klínů na vlastní frekvence. Dále byly pro porovnání spočítány ještě varianty, kdy nebyla

vůbec uvažována impregnační vrstva mezi vnutím a plechy. Tento výpočet byl proveden pro zjištění vlastních frekvencí v případě, že je vliv snížení tuhosti vnutí zanedbán. Teoreticky se jedná o nejvyšší dosažitelnou tuhost statorového svazku.

Další varianta byla spočítána pro případ, kdy byla celá statorová drážka vyplněna impregnační pryskyřicí, ale s hustotou odpovídající přibližně mědi. Tento výpočet měl za cíl přibližně spočítat tuhost statorového svazku s vnutím složeného ze samostatných drátů pro nízkonapětové vnutí, neboť z teorie vláknových kompozitů je známo, že pro příčnou tuhost je rozhodující tuhost matrice (v tomto případě byl jako kompozit uvažován svazek drátů zalitý impregnační pryskyřicí, kde pryskyřice je matrice a dráty jsou vlákna).

Poslední počítanou variantou byl výpočet se zcela prázdnými statorovými drážkami s hustotou přepočítanou tak, aby hmotnost odpovídala skutečné hmotnosti statorového svazku. Teoreticky se jedná v tomto případě o nejnižší dosažitelnou tuhost statorového svazku.

Vzhledem k tomu, že je statorový svazek rotačně symetrickou strukturou, byla v rámci řešení v programovém systému Ansys využita podmínka rotační symetrie, což znamená, že byl modelován jen jeden segment, tak jak je schématicky naznačen na obrázku 1, čímž byl model výrazně zjednodušen.

Při výpočtu bylo uvažováno s následujícími materiálovými charakteristikami:

Statorové plechy- ocel, modul pružnosti $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Pa, hustota $\rho=7850$ kg/m³.

Vnutí- měď, modul pružnosti $E=1,2 \cdot 10^{11}$ Pa, hustota $\rho=8950$ kg/m³.

Impregnační vrstva- pryskyřice, modul pružnosti $E=4,1 \cdot 10^9$ Pa, hustota $\rho=1200$ kg/m³.

Vlastní tvar statorového svazku odpovídající první vlastní frekvenci je zobrazen na obrázku 2 a vlastní tvar odpovídající druhé vlastní frekvenci je na obrázku 3. tyto tvary jsou v literatuře [9] popsány jako tvary druhého a třetího řádu.

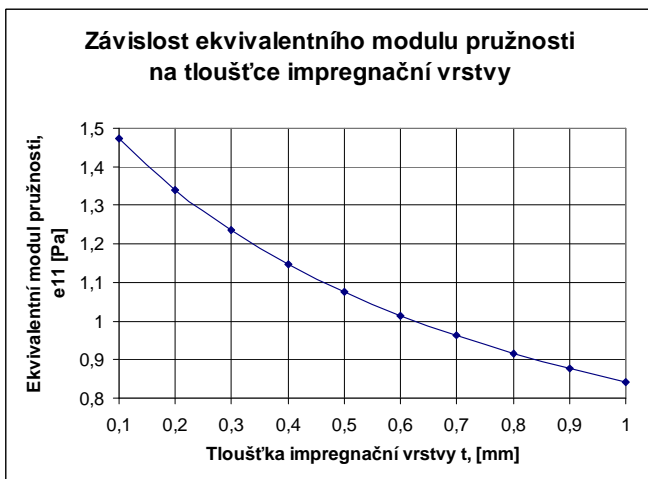
Na obrázku 4 je vyneseno graf závislosti spočítaného ekvivalentního modulu pružnosti v závislosti na tloušťce impregnační vrstvy. Dle očekávání je největší ekvivalentní modul pružnosti pro tloušťku impregnační vrstvy 0,1mm a má hodnotu přibližně $E=1,47 \cdot 10^{11}$ Pa, s narůstající tloušťkou impregnační vrstvy začíná být výraznější vliv nízké tuhosti pryskyřice (cca o dva řády nižší ve srovnání s ocelí a mědí) a modul pružnosti klesá až na hodnotu $E=0,84 \cdot 10^{11}$ Pa pro tloušťku 1mm.

Pro případ výpočtu bez impregnační vrstvy (tj. pouze měď a ocel) vychází modul pružnosti přibližně stejný jako modul pružnosti oceli $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Pa.

V případě kdy celý prostor drážek statorových plechů je vyplněn impregnační pryskyřicí (ovšem s hustotou

odpovídající mědi aby byl zahrnut vliv hmotnosti mědi na výpočet vlastních frekvencí) za účelem simulace vlivu nízkonapětového vinutí vychází modul pružnosti přibližně $E=0,44 \cdot 10^{11} \text{Pa}$.

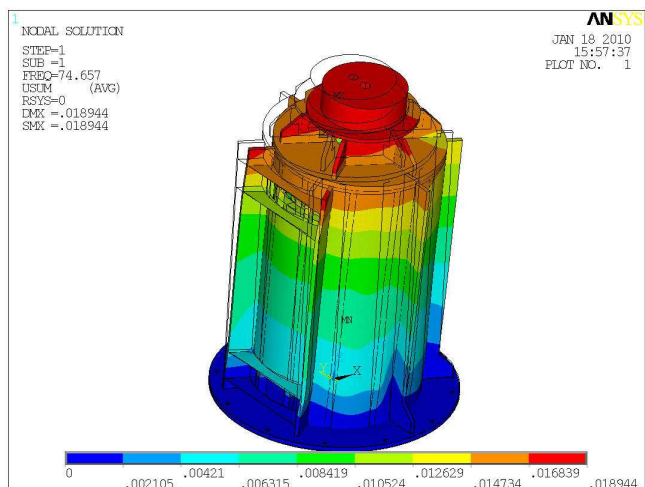
V případě výpočtu se zcela prázdnou drážkou satorového vinutí a pouze přepočítanou hustotou vychází modul pružnosti asi desetkrát menší než pro ocel, tj. přibližně $E=0,21 \cdot 10^{11} \text{Pa}$.



Obr. 4: Závislost ekvivalentního modulu pružnosti dutého válce pro různé hodnoty tloušťky impregnační vrstvy

3. VÝPOČET VLASTNÍCH TVARŮ A FREKVENCÍ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU V ZÁVISLOSTI NA TUHOSTI STATOROVÉHO SVAZKU

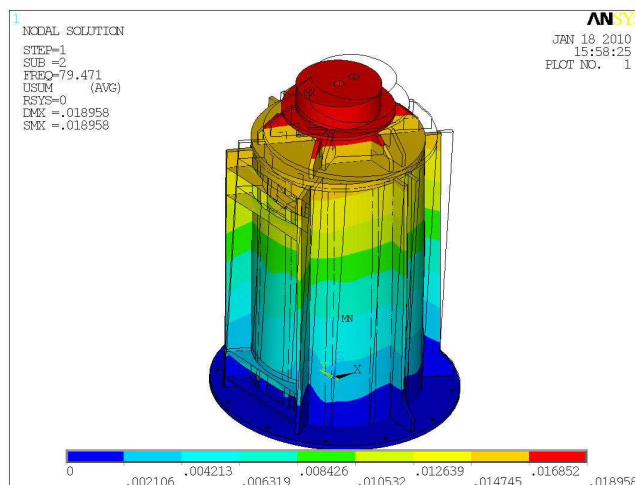
Aby mohl být určen vliv tuhosti satorového svazku na modální vlastnosti konstrukce elektrických strojů, tak byly vypočítané moduly pružnosti satorového svazku následně využity při výpočtu vlastních frekvencí a tvarů celého satoru synchronního generátoru pro malé vodní generátory s průměrem 1600mm.



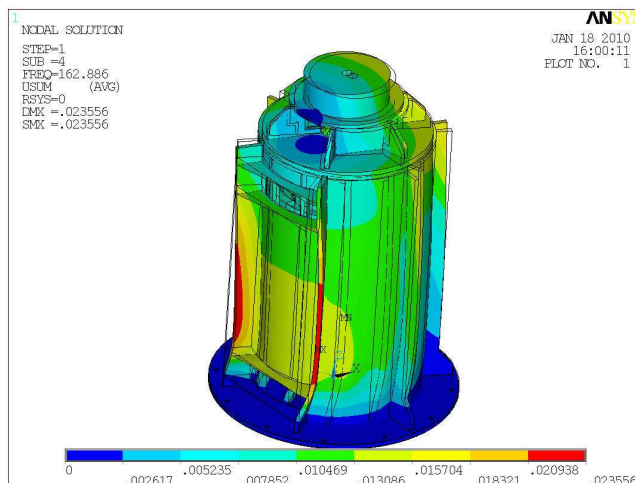
Obr. 5: První vlastní tvar satoru generátoru

Výpočet byl proveden pro generátor pevně uchycený k základu, což bylo při výpočtu realizováno zamezením

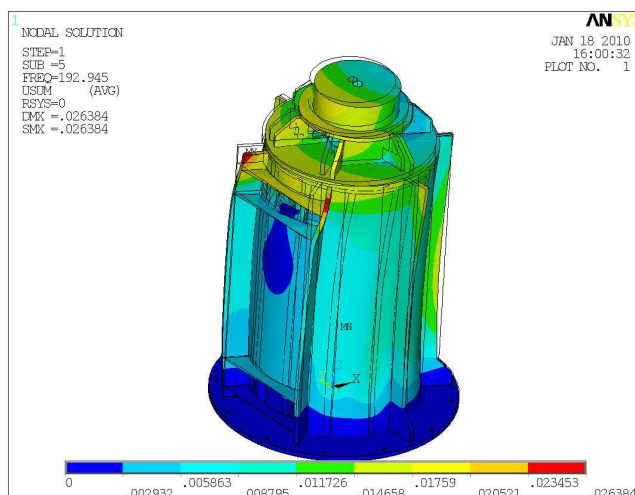
všech posuvů v místě patek stroje. Počítáno bylo prvních deset vlastních tvarů a frekvencí v rozsahu od 0Hz do 1000Hz.



Obr. 6: Druhý vlastní tvar satoru generátoru



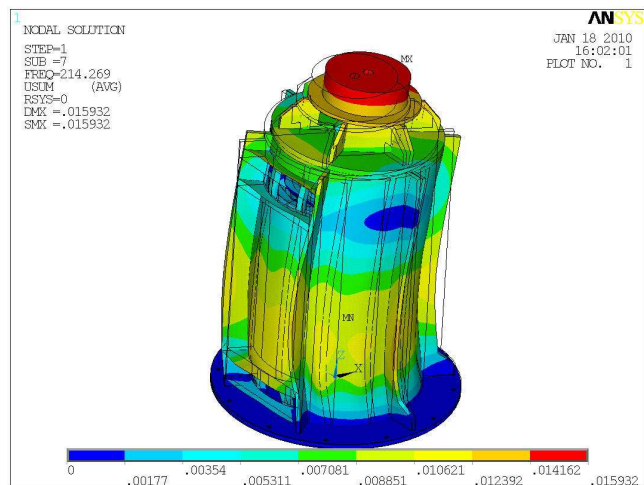
Obr. 7: Třetí vlastní tvar satoru generátoru



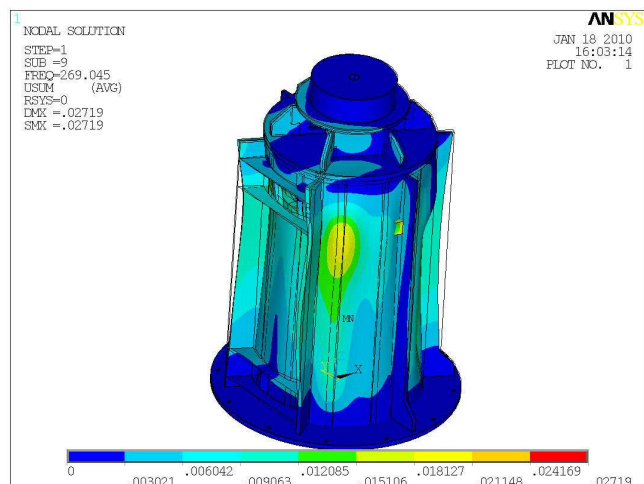
Obr. 8: Čtvrtý vlastní tvar satoru generátoru

Z uvedených deseti spočítaných vlastních tvarů kmitu bylo sedm tvarů kmitu celého satoru, které je možno vybudit (zbývající tvary byly například pouze kmitání

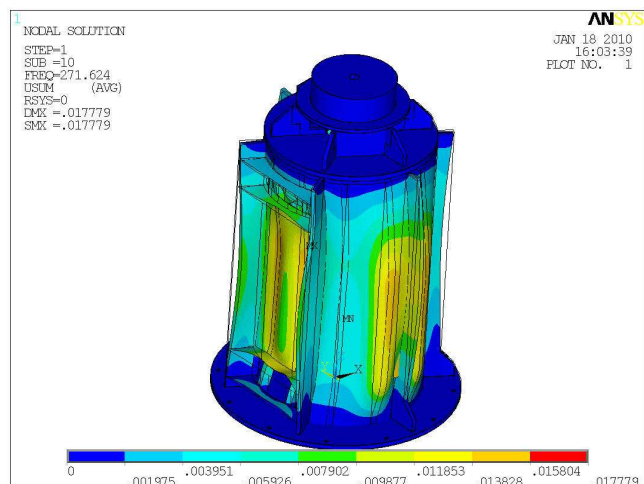
struktur budiče uvnitř stroje, nebo podélné kmity ve směru osy stroje, které však nemohou být při provozu vybudeny). Uvedených sedm vlastních tvarů kmitu je zobrazeno na obrázcích 5 až 11. Na obrázcích je také vidět obrys původního nedeformovaného tvaru stroje.



Obr. č. 9: Pátý vlastní tvar statoru generátoru



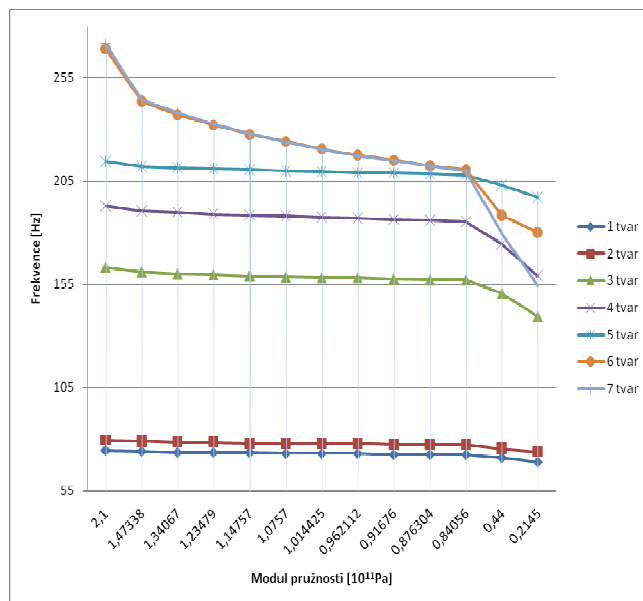
Obr. č. 10: Šestý vlastní tvar statoru generátoru



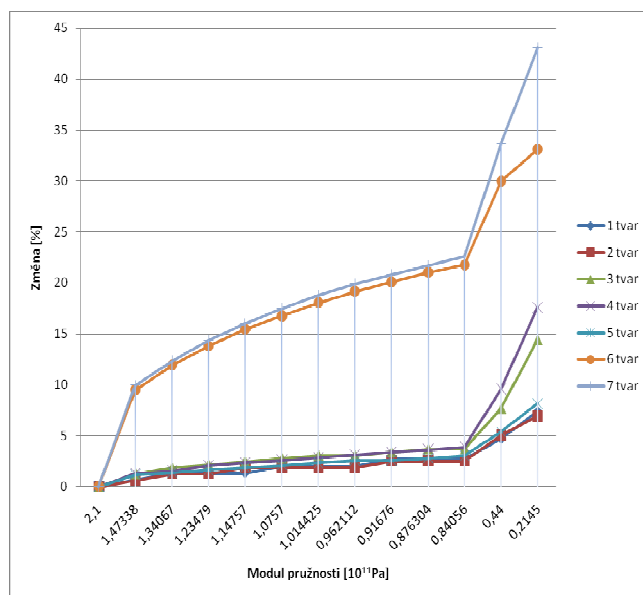
Obr. č. 11: Sedmý vlastní tvar statoru generátoru

První dva vlastní tvary kmitu mají charakter kývavého pohybu ve dvou na sebe kolmých rovinách. Třetí a čtvrtý

vlastní tvar má charakter kroucení kostry generátoru kolem své osy. Pátý vlastní tvar má charakter ohýbání celého statoru v rovině procházející osou generátoru. Šestý a sedmý tvar má charakter kmitání statorového svazku jeho prvním tvarem tak, jak je zobrazen na obrázku 2.



Obr. č. 12: Závislost vlastních frekvencí statoru synchronního generátoru na modulu pružnosti statorového svazku



Obr. č. 13: Změna vlastních frekvencí statoru synchronního generátoru na modulu pružnosti statorového svazku

Na obrázku 12 je vyneseno graf zobrazující závislost vlastních frekvencí jednotlivých tvarů kmitu na modulu pružnosti statorového svazku. Na obrázku 13 je pak vynesena závislost změny vlastních frekvencí ve srovnání s vlastními frekvencemi spočítanými pro model s modulem pružnosti statorového svazku $E=2,1 \cdot 10^{11} \text{Pa}$.

Z grafů je vidět, že na první dva tvary kmitání statoru synchronního generátoru (tj. kývavý pohyb celého statoru) a pátý tvar (ohýbání celého statoru) je vliv tuhosti statorového svazku poměrně zanedbatelný. Rozdíl výsledků pro výpočty teoreticky nejvyšší a nejmenší možné tuhosti statorového svazku se liší o méně než 8%. Pro případ vysokonapěťových strojů (tj. přibližně pro hodnotu modulu pružnosti statorového svazku $E=0,84 \cdot 10^{11}$ Pa a větší) je rozdíl dokonce menší než 3%

O něco větší rozdíl při srovnání výsledků spočítaných pro největší a nejmenší tuhost je v případě třetího a čtvrtého vlastního tvaru (tj. kroucení celého statoru kolem své osy), kde je rozdíl přibližně 15%. Pro případ vysokonapěťových strojů je i v tomto případě rozdíl menší než 4%.

Nejvýraznější rozdíl ve výsledcích spočítaných pro různé tuhosti statorového svazku byl dle očekávání spočítán pro šestý a sedmý vlastní tvar, kde tento rozdíl ve výsledcích může činit i více než 40%. Tento velký rozdíl je právě způsoben charakterem kmitání těchto dvou vlastních tvarů, kdy je rozhodující právě deformace statorového svazku. V případě šestého a sedmého vlastního tvaru jsou poměrně značné rozdíly i pro případ vysokonapěťových strojů, kde změna vlastních frekvencí přesahuje 10%.

Analyzovaný synchronní generátor je buzen jednak frekvencí dvojnásobku elektrické sítě (tj. většinou 100Hz) a jednak otáčkovou frekvencí (maximálně pro analyzovaný stroj 25Hz ve čtyřpólové variantě). Občas se ve frekvenčním spektru mohou objevit i další násobky frekvence elektrické sítě (tj. např. 200Hz, 300Hz atd.), ale nejvýraznější je zpravidla uvedený dvojnásobek, tj. 100Hz.

Výsledky modální analýzy ukázaly, že ani jedna vlastní frekvence počítaného statoru generátoru se nepřiblížila výrazným budícím frekvencím (tj. 100Hz a otáčkové frekvenci, která může být v tomto případě maximálně 25Hz) pro žádnou s počítaných variant. Avšak pátý až sedmý tvar kmitu má frekvence poměrně blízké čtyřnásobku frekvence sítě tj. 200Hz a za jistých okolností by tyto tvary mohly být vybuzeny.

4. ZÁVĚR

V článku je popsán zjednodušený postup výpočtu tuhosti modelu statorového svazku elektrických strojů točivých. Byly spočítány moduly pružnosti pro různé hodnoty tloušťky impregnační vrstvy mezi statorovým vinutím a statorovými plechy a také moduly pružnosti pro extrémní případy, kdy byla uvažována tloušťka impregnační vrstvy nulová (nejtužší varianty) a kdy byl uvažován pouze výpočet tuhosti statorových plechů bez vlivu vinutí (nejnižší tuhost).

Vypočítané moduly pružnosti zjednodušeného modelu statorového svazku byly poté použity při výpočtu vlastních frekvencí celého statoru synchronního generátoru pro malé vodní elektrárny, aby mohl být

určen vliv tuhosti statorového svazku na modální chování generátoru jako celku.

Z výsledků vyplývá, že pro nejnižší tvary kmitu je vliv různé tuhosti statorového svazku víceméně zanedbatelný, ale pro tvary kmitu, kde je dominantním charakterem deformace statorového vinutí se mohou výsledky spočítané pro různé hodnoty tuhosti lišit až o 40%.

LITERATURA

- [1] TANG, Zhangjun, PILLAY, Pragasen, OMEKANDA, Aoki M., Young's Modulus for Laminated Machine Structures With Particular Reference to Switched Reluctance Motor Vibrations., IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS VOL. 40, NO. 3, MAY/JUNE 2004, s. 748-754.
- [2] ROIVAINEN, Janne, Unit-Wave Responce -Based Modeling of Electromechanical Noise and Vibration of Electrical Machines, Doctoral dissertation, Helsinki 2009.
- [3] FINLEY, William R., HODOWANEC, Mark M., HOLTER Warren G., An Analytical Approach to Solving motor Vibration Problems, Conference IEEE/PCIC 1999, paper No. PCIC-99-20.
- [4] DELAERE, Koen, IADEVAIA, Michele, SAS, Paul, BELMANS, Ronnie, HAMEYER, Kay, Coupling of Numerical Magnetic and Experimental Vibration Analysis for Electrical Machines, Proceedings of the 3rd Chinese International Conference on Electrical Machines, s. 475-478.
- [5] KUKULA, Pavel, ONDRŮŠEK, Čestmír, Electric Machine Vibration Analysis, Konference diplomových prací 2007.
- [6] RIESEN, Dirk van, HENROTTE, Francois, SCHLENSOK Christoph, HAMEYER, Kay, Coupled Simulations in the Design of Electrical machines. Int. Conf. on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering 2005.
- [7] TAMPION, A.A., STOLL, R.L., SYKULSKI, J.K., Variation of Turbogenerator Stator Core Vibration with Load, IEE Proceedings-C, vol. 138, No. 5, September 1991, s. 389-400.
- [8] CURIAC, Radu S., SINGHAL, Sumit, Magnetic Noise in Induction Motors, Proceedings of NCAD 2008, July 28-30 2008, Dearborn, Michigan.
- [9] HELLER, Bedřich, HAMATA, Václav, Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji, nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1961.