



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

Komplexní model synchronního motoru

*Radek Vlach , Čestmír Ondrůšek**

1. Úvod

Chlazení a ventilace elektrických strojů je v současné době samostatná disciplína stavby elektrických strojů, která používá speciální analytické, numerické a experimentální metody. Její složitost je dána skutečností, že elektrický stroj představuje kompromis mezi různými, někdy i protichůdnými požadavky.

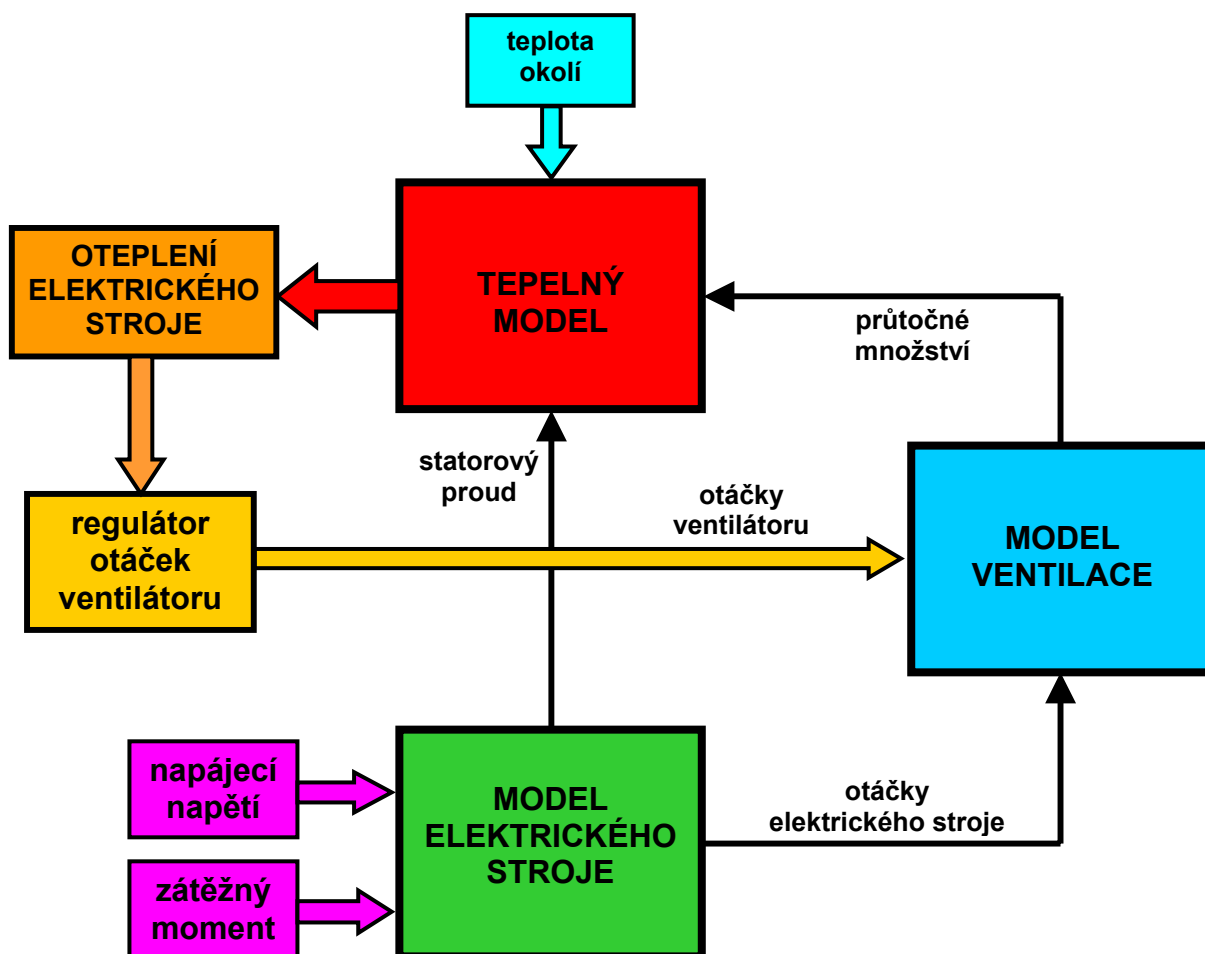
V současnosti chlazení a ventilace elektrického stroje využívá především poznatků dvou základních vědních oborů: aerodynamiky a termomechaniky, které umožňují rozpracovávat efektivní metody hydraulických a tepelných výpočtů.

Tepelně ventilační návrh stroje se dnes stal nedílnou součástí celkového konstrukčního návrhu stroje, neboť podstatně ovlivňuje dimenzování jak aktivních, tak i konstrukčních materiálů. Dnes je třeba získat komplexní přehled o chlazení stroje za různých podmínek již v etapě elektromagnetického návrhu nového stroje. Jen tak je možné navrhnout optimální ventilační systém. Chlazení se stále více stává jednou s částí návrhu elektrického stroje, která může značně ovlivnit efektivnost jeho využití. Zvláště v případech strojů s vlastním zdrojem ventilace se naskytuje možnost zefektivnit využití stroje z hlediska chlazení, hluku, spotřeby energie a dalších aspektů ovlivňující okolí, kde elektrický stroj pracuje. Velmi často nastává situace, že vlastní ventilátor pracuje na plný výkon, aniž by to bylo v daném okamžiku nezbytně nutné. Naopak se mohou objevit případy, kdy by krátkodobé zvýšení výkonu ventilátoru mohlo zabránit havarijnímu stavu.

Příspěvek popisuje vytvoření metodiky komplexního popisu elektrického stroje především z hlediska ventilačního a tepelného s uvážením všech vlivů ovlivňující tepelné poměry ve stroji. Komplexní model (Obr. 1) zahrnuje ventilační, tepelný a elektromagnetický model, jenž se vzájemně ovlivňují. Tato metodika byla aplikována na konkrétní elektrický stroj. Jde o synchronní motor s permanentními magnety na rotoru s vlastním zdrojem ventilace, který je používán jako výtahový motor. Na základě požadavku z praxe zlepšit chlazení tohoto motoru i s ohledem na hlučnost stroje byl proveden návrh řízení ventilace zajišťující optimální chlazení elektrického stroje.

* Ing. Radek Vlach : Ústav mechaniky těles, FSI VUT Brno; Technická 2, 619 69 Brno; tel. +420.5.41142757, fax: +420.5.41142876; E-mail: vlach@uvee.fee.vutbr.cz.

Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc. : Ústav výkonové elektroniky a elektrotechniky, FEKT VUT Brno; Technická 8, 619 69 Brno; tel. +420.5.41142463, E-mail: ondrusek@uvee.fee.vutbr.cz.



Obr.1 Komplexní model synchronního motoru

2. Výpočtové modelování

K řešení problému bylo využito celé řady poznatku z oblasti modelování ventilace a oteplení elektrických strojů. Ze získaných informací o modelování chlazení byly vybrány ty, které se nejvíce hodily pro sestavení metodiky pro vytváření komplexního modelu elektrického stroje. Některé použité přístupy k modelování oteplení a ventilace byly kromě jiného použity k ověření nových nebo rozšíření dříve používaných metod modelování. Pro verifikaci dílčích modelů bylo provedeno měření na reálném synchronním motoru. Výsledky experimentu byly mimo jiné využity pro minimalizaci odchylek mezi výpočtovou simulací a experimentálním měřením, k čemuž byly využity i algoritmy umělé inteligence, které jsou na tyto problémy snadno aplikovatelné.

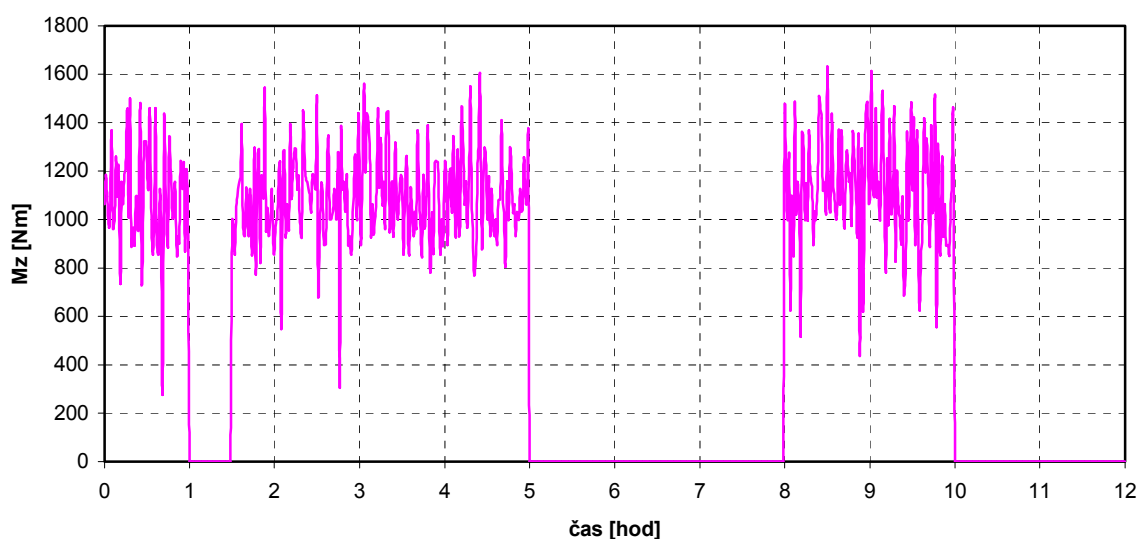
Komplexní model byl realizován v programovém systému MATLAB, zvláště v jeho nadstavbě SIMULINK. Koncepce byla zvolena tak, aby bylo možné provádět výpočtové simulace různých provozních režimů a sledovat jejich vliv na chlazení jednotlivých částí stroje. V modelu je možné nastavit požadovanou teplotu vinutí statoru podle níž jsou v závislosti na zatížení stroje nastavovány použitým typem regulátoru otáčky ventilátoru. V jakémkoliv okamžiku je možné měnit teplotu okolí a také zapnout a vypnout motor.

Pomocí komplexního modelu bylo sledováno chování motoru pro dvě varianty uspořádání ventilace. V prvním případě jde o variantu stávajícího uspořádání respektive pouze s rotorovými axiálními kanály. V druhé variantě jsou navíc uvažovány satorové kanály. Pro řízení ventilace byly rovněž použity dva typy regulátoru otáček ventilátoru a sledován jejich vliv na chlazení synchronního motoru.

První regulátor je pouze dvupolohový (on-off). Pokud teplota vinutí dosáhne $62,5^{\circ}\text{C}$ dojde k zapnutí ventilátoru na jmenovité otáčky 2350 ot/min . V případě poklesu teploty vinutí pod $57,5^{\circ}\text{C}$ dochází k vypnutí ventilátoru. Pokud je teplota vinutí v rozmezí $57,5^{\circ}\text{C} - 62,5^{\circ}\text{C}$ zůstávají otáčky ventilátoru stejné jako v předešlém časovém kroku. Druhý ventilátor má již plynulou regulaci otáček v závislosti na teplotě vinutí. Pokud je teplota vinutí menší jak 85°C je ventilátor vypnut. Jestliže však teplota vinutí překročí hodnotu 95°C jsou otáčky nastaveny na dvojnásobek jmenovitých, tedy 4700 ot/min . Mezi teplotami vinutí $85^{\circ}\text{C} - 95^{\circ}\text{C}$ jsou otáčky nastavovány plynule jako lineární závislost na teplotě a to v rozmezí $0 - 4700\text{ ot/min}$.

3. Výpočtové simulace

Výpočtové simulace byly pro oba regulátory vždy provedeny pro variantu stávajícího uspořádání a také pro variantu se satorovými kanály. Pro oba regulátory byl náhodně vygenerován zátěžný moment (Graf 1) odpovídající provozu výtahu po dobu 12-ti hodin, kde místa s nulovým momentem odpovídají nepoužívání výtahu.

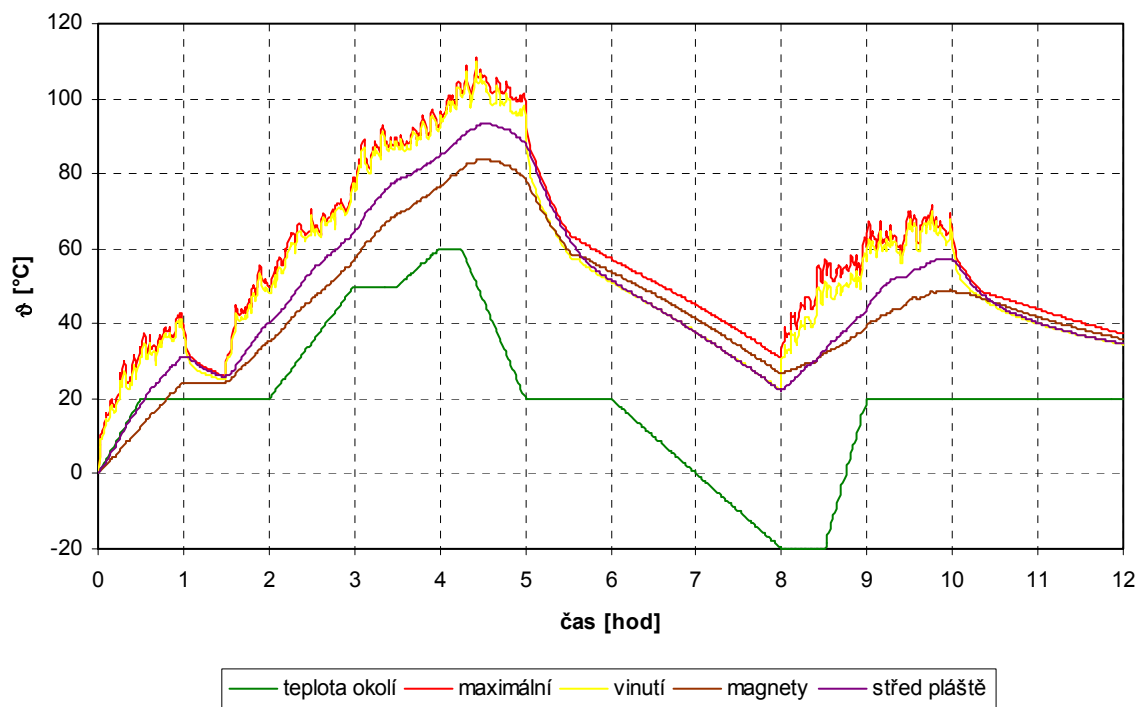


Graf 1: Průběh zátěžného momentu

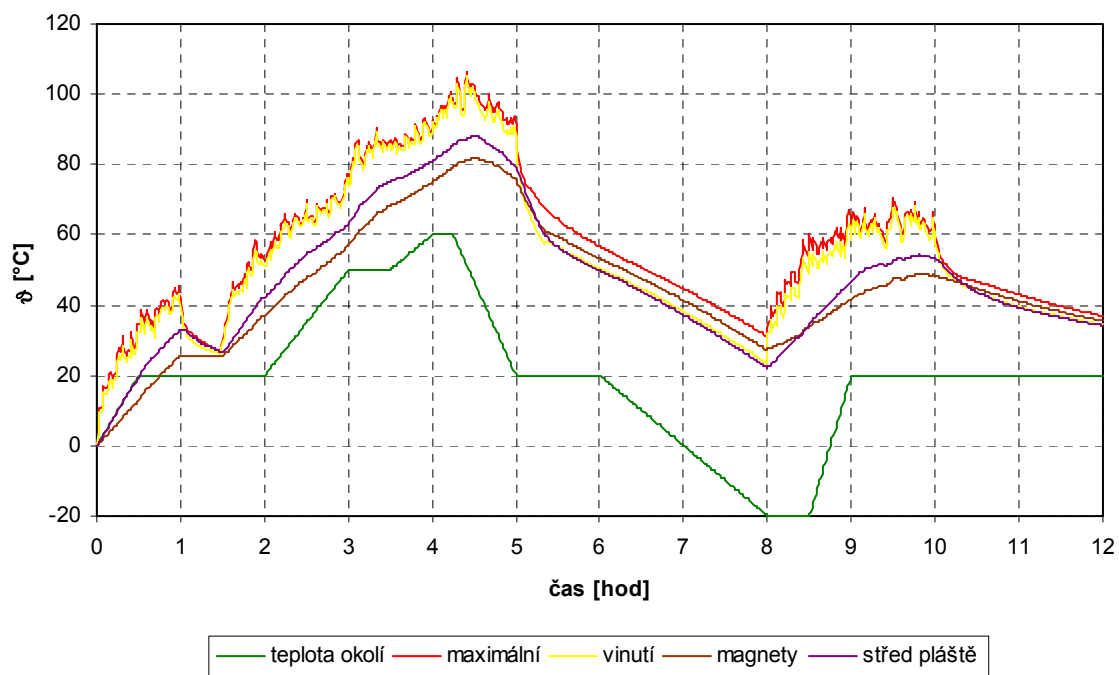
Výpočtovými simulacemi byly sledovány čtyři základní teploty částí synchronního motoru. Těmito teplotami byly střední teplota vinutí, maximální teplota synchronního motoru, teplota středu pláště a střední teplota magnetů.

3. Výsledky výpočtových simulací

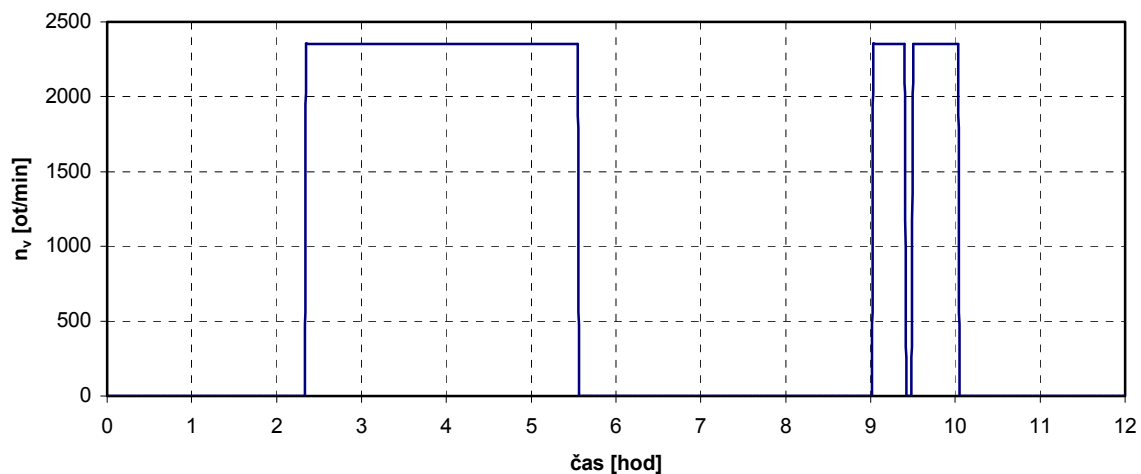
a) Výsledky výpočtových simulací s dvoupolohovým regulátorem



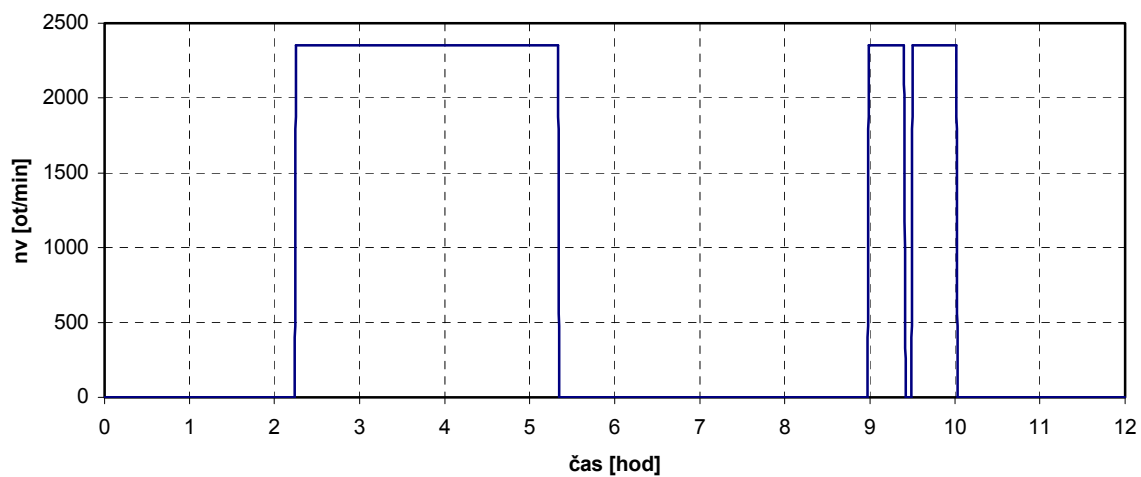
Graf 2: Průběh teplot pro stávající uspořádání



Graf 3: Průběh teplot pro uspořádání se statorovými kanály



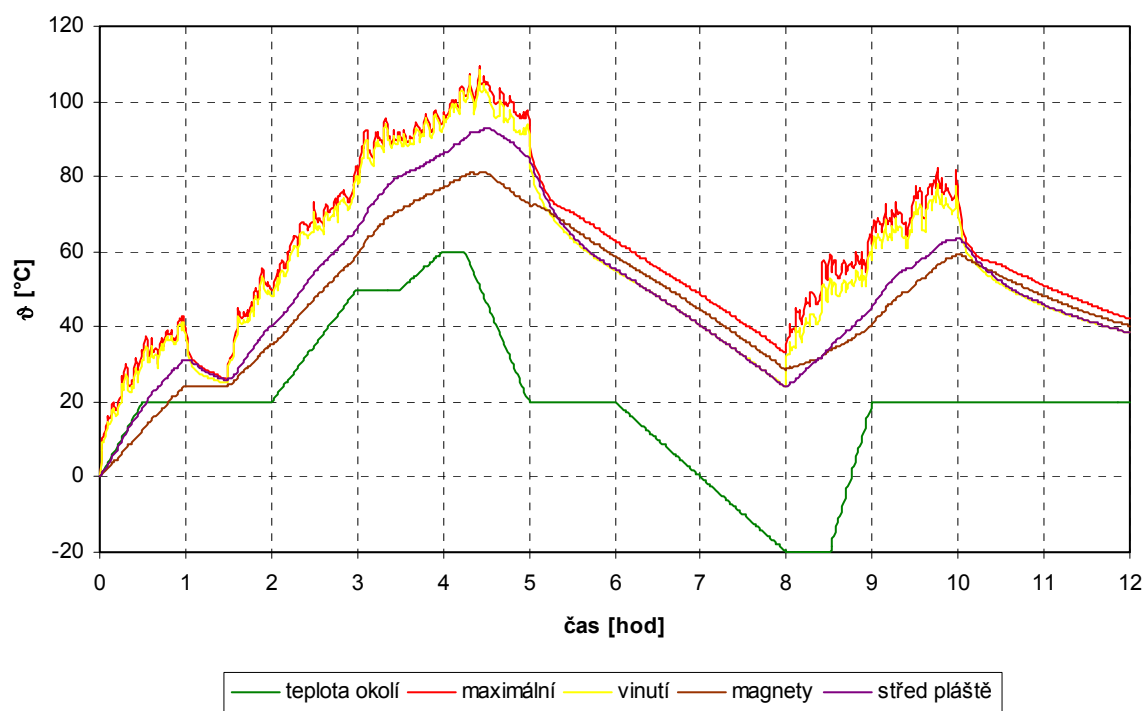
Graf 4: Průběh otáček ventilátoru pro stávající uspořádání



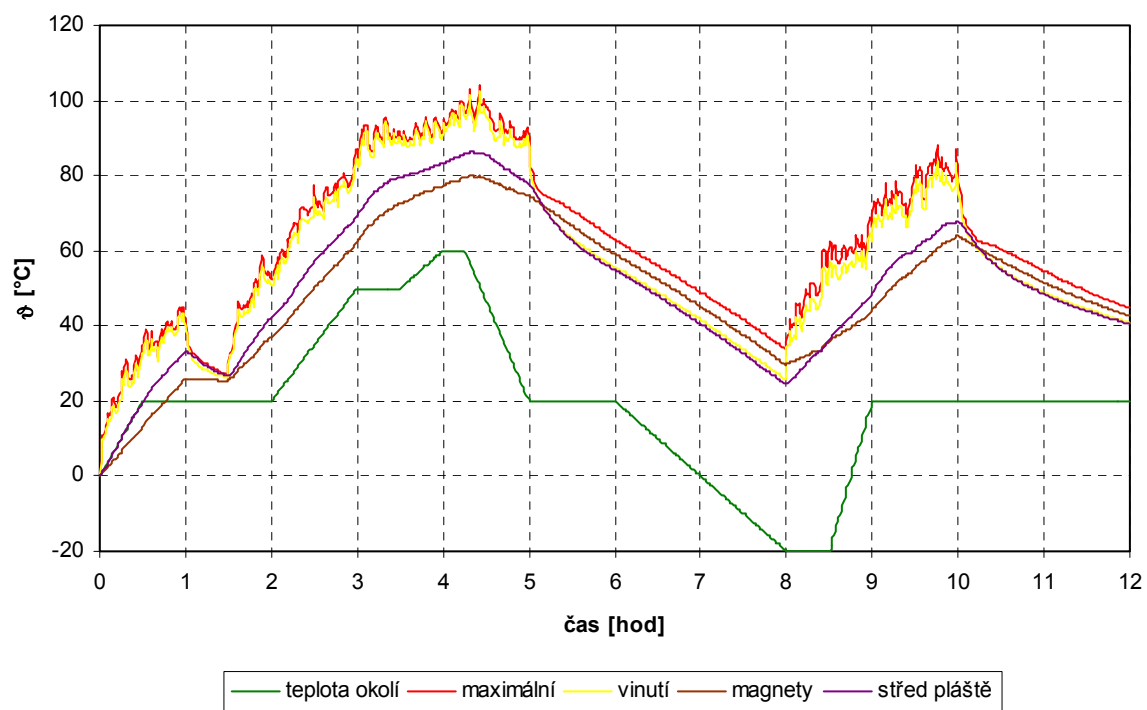
Graf 5: Průběh otáček ventilátoru pro uspořádání se satorovými kanály

Při výpočtových simulacích s regulátorem s plynulou změnou otáček byly pro porovnání nastaveny stejné podmínky jako v předešlém případě, jako je zátěžný moment, průběh teploty okolí atd.

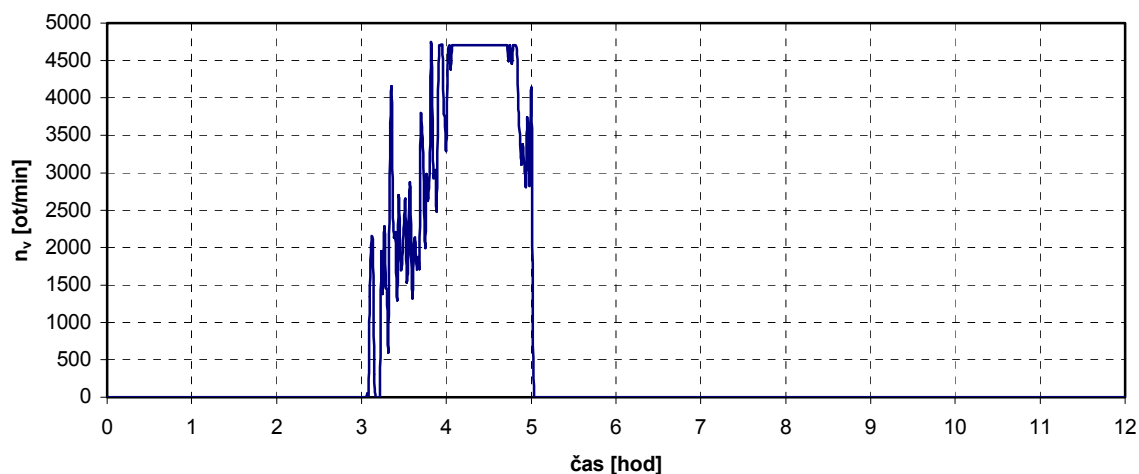
b) Výsledky výpočtových simulací s plynulou regulací otáček



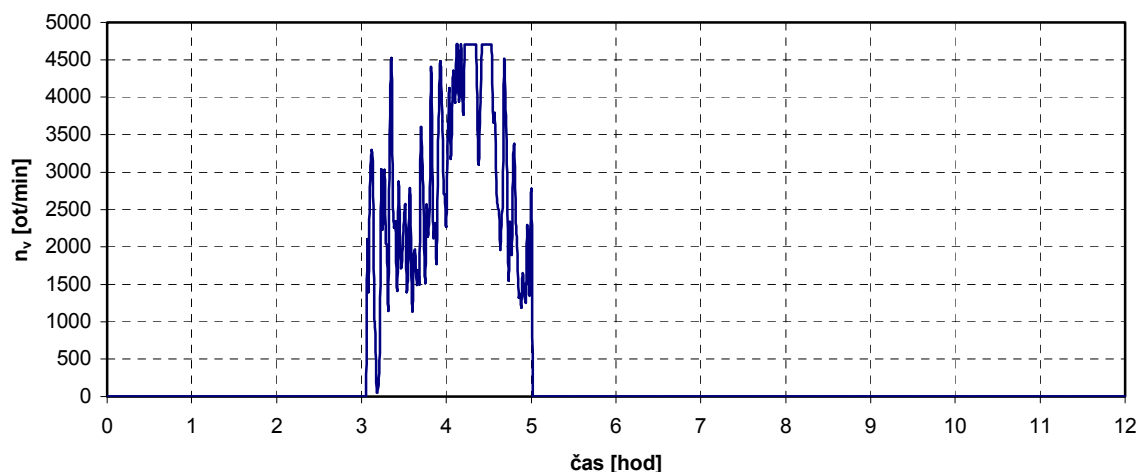
Graf 6: Průběh teplot pro stávající uspořádání



Graf 7: Průběh teplot pro uspořádání se statorovými kanály



Graf 8: Průběh otáček ventilátoru pro stávající uspořádání



Graf 9: Průběh otáček ventilátoru pro uspořádání se statorovými kanály

4. Analýza výsledků

Z výše uvedených grafů je zřejmý vliv uspořádání synchronního motoru a také použitý typ regulace otáček ventilátoru. Zajímavé je porovnání průběhů teplot a zejména otáček ventilátoru pro jednotlivé simulace.

Z hlediska teplot se jeví jako nejlepší varianta uspořádání se statorovými kanály pro oba typy regulátoru otáček, kde navíc v případě plynulé regulace jsou dosažené teploty o něco menší než u dvoupolohového regulátoru, což je dáno možností nastavit až dvojnásobné otáčky ventilátoru. V případě plynulé regulace je nárůst teplot rychlejší, ale pouze do teploty 85°C, kdy se začíná projevovat vliv ventilátoru. Avšak při vyšších teplotách je teplota vinutí udržována v určitém pásmu. S dvoupolohovým regulátorem je nárůst teplot zpomalen u teploty 60°C, kdy je zapnut ventilátor. Při vyšších teplotách dochází k většímu kolísání teplot, které již nelze ventilátorem ovlivnit. Pro varianty se statorovými kanály je nárůst teplot rychlejší než v případě stávajícího uspořádání. To je dáno tím, že vlivem statorových kanálů je zhoršen odvod tepla z vinutí povrchem kostry

přes jho. Naopak velkou výhodou statorových kanálů je podstatně rychlejší citlivost (pokles) teploty vinutí na množství vzduchu dodávaného ventilátorem a tím odezva na změnu otáček ventilátoru, protože je podstatně zvětšen odvod tepla ze statoru vlivem proudění vzduchu statorovými kanály.

Dalším kritériem pro posouzení byly průměrné otáčky ventilátoru pro jednotlivé varianty. Z výsledků je jednak zřejmé, že vlivem statorových kanálů jsou průměrné otáčky nižší. Také se ukázal vliv plynulé regulace otáček, kde došlo k jejich podstatnému snížení oproti dvoupolohové regulaci. Z průběhů otáček ventilátoru je zřejmé, že při variantách se statorovými kanály vlivem rychlejšího nárůstu teplot dochází v obou případech regulátorů k jejich zapnutí dříve než pro stávající uspořádání a naopak vlivem intenzivnějšího chlazení k dřívějšímu vypnutí (snížení) otáček. Také lze říci, že otáčky jsou měněny častěji při variantě se statorovými kanály.

V otázce hluku je to obdobné pro jednotlivé varianty jako u průměrných otáček. Oproti jmenovité hodnotě hladiny hluku dochází k podstatnému snížení průměrné hladiny hluku někdy až o cca 90%. Maximální hodnoty pro plynulou regulaci však mohou dosáhnout až hodnoty 76,3 dB, ale pouze ve velmi krátkých časových intervalech při kritických hodnotách teploty vinutí. Jedná se však o navýšení oproti jmenovité hodnotě (61 dB) pouze o 15,3 dB (25%).

Spotřeba energie je různá pro jednotlivé varianty a je závislá zejména na průběhu otáček ventilátoru. V případech varianty se statorovými kanály je spotřeba nižší než u stávajícího uspořádání. Ačkoli výkon ventilátoru roste se třetí mocninou otáček tak je spotřeba energie větší u varianty stávajícího uspořádání.

5. Závěr

Příspěvek popisuje výpočtové simulace komplexního modelu synchronního motoru. Takto navržený komplexní model zahrnuje ventilační, tepelný a elektromagnetický model, jenž se vzájemně ovlivňují. Komplexní model je možné případně doplnit o další dílčí modely podle typu řešeného objektu a priorit na něm sledovaných charakteristik.

Pomocí komplexního modelu bude možné simulovat různé provozní stavy. Rovněž bude možné simulovat havarijní stavy jako je požár a stanovit okamžik kdy dojde k porušení motoru nebo jakéhokoliv zařízení.

Na základě simulací bude možné navrhnout vhodné řízení otáček ventilátoru a zajistit tak efektivní využití stroje. Na základě dosažených výsledků je možné získané poznatky uplatnit v široké praxi pro jakýkoliv elektrický stroj nebo zařízení. Příkladem může být lepší nastavení ochrany a tím lepší využití zařízení. Často se objevují případy, kdy je stroj vypnut aniž by to bylo nezbytně nutné a naopak může dojít k vypnutí příliš pozdě. Řídící jednotka elektrického stroje nebo zařízení by provedla určité zásahy do chladicího systému a při znalostech předpokládaného vývoje teplot mohla zajistit efektivnější provoz.

Na základě simulací bude možné navrhnout vhodné řízení otáček ventilátoru. Dosažené výsledky by bylo možné využít v praxi, majícího podobu řídicí jednotky, která by byla součástí elektrického stroje. Na základě signálů ze snímačů umístěných na stroji by řídicí jednotka předpovídala oteplení, které by bylo uvnitř jednotky okamžitě vyhodnoceno. Na základě vyhodnocení by byl dán signál k nastavení otáček ventilátoru, zajišťující optimální chlazení stroje.

Poděkování

Príspevek byl vypracován za finanční podpory MŠMT v rámci projektu č. MSM 2621 00024 a rovněž za pomoci grantového projektu GAČR 102/00/1586.

6. Literatura

- [1] Hak, J. , Ošlejšek, O. : Výpočet chlazení elektrických strojů , 1.díl. VUES Brno 1973
- [2] Ondruška, E. , Maloušek, A. : Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha 1985
- [3] Hak, J. , Libora, K. , List, V. , Ošlejšek, O. : Termika elektrických strojů točivých.
- [4] Hynšt, R. : Výpočet chlazení elektrických strojů. TZ 1159, VÚES Brno, 1964
- [5] Kotrba, V. : Ventilační sítě, Hrušky, 1993
- [6] Měřička, J. , Zoubek, Z. : Obecná teorie elektrického stroje. SNTL, 1973