

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF SYNCHRONOUS GENERATOR FAN**Radek Vlach, Čestmír Ondrůšek***

The paper is concerned with computational simulation of air flow in the individual parts of a synchronous machine. Software FLUENT 6 was used for computational modeling. CFD model of machine fan was built, which was used for calculation of ventilation characteristics. Ventilation characteristics were calculated for three ventilator diameters. The aim was to find operating point for each fan. The results of computer simulation are compared with the measurement, which was accomplished on the synchronous generator using pitot tube and digital micro manometer.

1. Úvod

Príspevek popisuje ventilační měření na vybraném typu stroje. Součástí experimentální části je návržení metodiky ventilačního měření. Výsledky měření jsou využity při nastavení okrajových podmínek ve výpočtovém modelování.

Pro výpočtové modelování byl využit programový systém FLUENT. Cílem výpočtů bylo nalezení pracovního bodu synchronního generátoru. Proto byla pomocí CFD modelování stanovena ventilátorová charakteristika a na základě měření stanoven pracovní bod. Dále byl sledován jednak vliv průměru ventilátoru ale i různé uspořádání prostoru kolem ventilátoru.

2. Ventilační měření

Pro ventilační měření bylo nutné provést určitá opatření. K zajištění přesnosti měření byl synchronní generátor měřen jako otevřený stroj. Tato úprava spočívala v odejmutí skříně chladiče. Na vstup předního štítu byla umístěna pro toto měření speciálně vyrobená skříň, ke které byl připevněn měřicí kanál (Obr. 1).

Ventilační měření spočívalo ve stanovení celkového průtočného množství procházejícího generátorem. Pro ověření správnosti měření bylo provedeno měření průtočného množství v závislosti na otáčkách, kde tato závislost má být lineární.

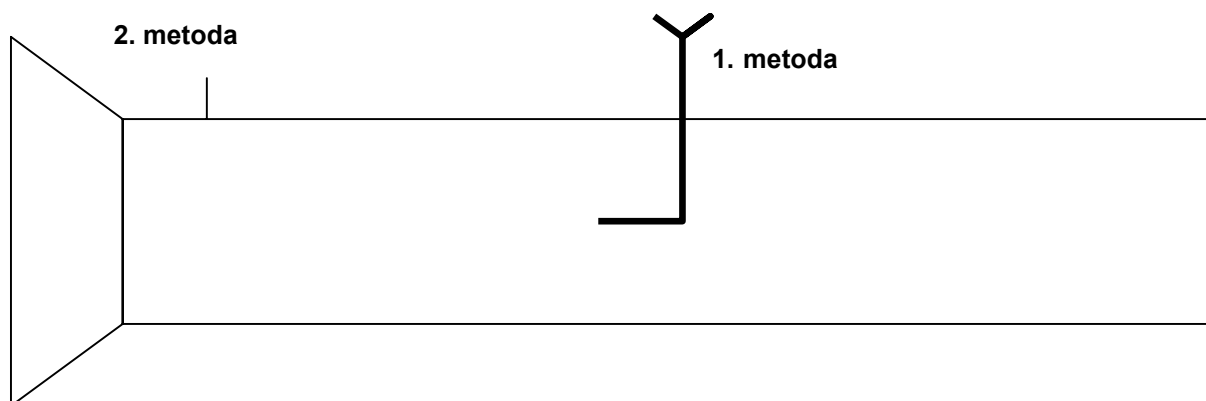
* Ing. Radek Vlach, Ph.D. : Ústav termomechaniky AV ČR a Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT Brno; Technická 2896/2, 619 69 Brno; tel. +420.5.41142757, fax: +420.5.41142876; E-mail: vlach@umt.fme.vutbr.cz.

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

Na měřicím kanále (Obr. 2) bylo provedeno měření průtočného množství dvěma nezávislými metodami. První metoda je založena na měření střední rychlosti proudění vzduchu v měřicím kanále pomocí rychlostní sondy. Druhá metoda je založena na stanovení průtočného množství z rozdílu statického tlaku měřeného před a za vstupem do měřicího kanálu.



Obrázek 1 Příprava synchronního generátoru pro ventilační měření



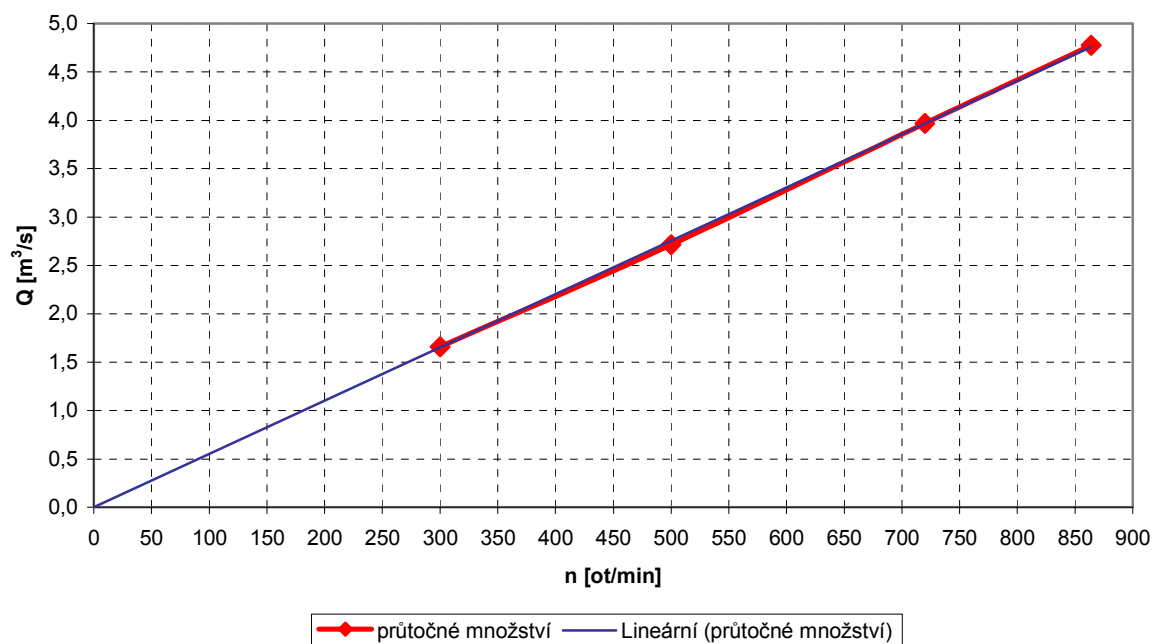
Obrázek 2 Měřicí kanál

Výsledky měření jsou shrnuty do následující tabulky 1 a grafu 1:

Tabulka. 1 Výsledky ventilačního měření

Otáčky ventilátoru [ot/min]	300	500	720	864
Průtočné množství stanovené pomocí rychlostní sondy [m ³ /s]	1,659	2,714	3,971	4,775
Průtočné množství stanovené z tlakového úbytku na vstupu [m ³ /s]	1,649	2,665	3,867	4,600
Průměrné průtočné množství [m ³ /s]	1,654	2,690	3,919	4,688

Pozn. Jmenovité otáčky synchronního generátoru jsou 720 ot/min

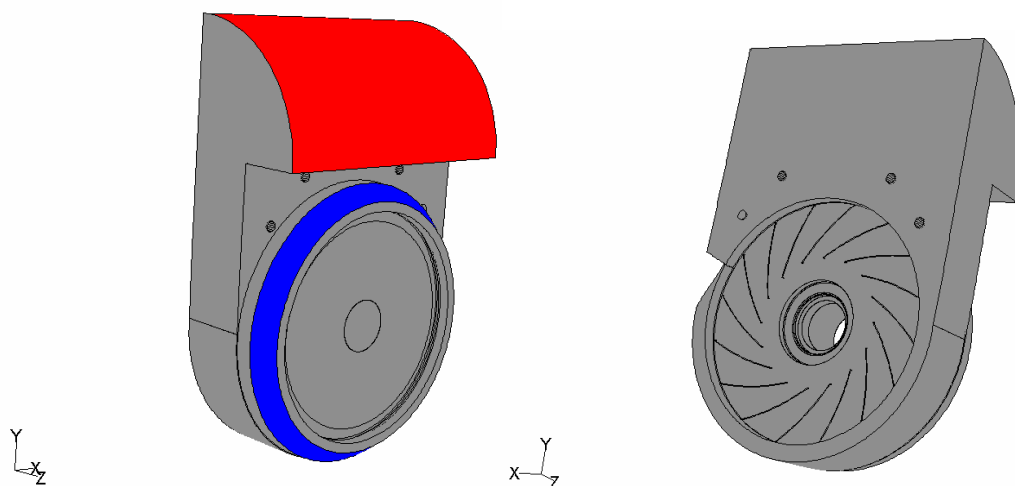


Graf 1 Závislost průtočného množství na otáčkách ventilátoru

Z uvedených výsledků je zřejmé, že obě metody měření vykazují dostatečnou shodu a změřená závislost celkového průtočného množství procházejícího synchronním generátorem na otáčkách je lineární.

3. CFD model

Na základě výkresové dokumentace byl vytvořen výpočtový model (Obr. 3) ventilátoru. Model je tvořen prostorem zadního štítu s ventilátorem a postačujícím prostorem na výfuku ze štítu zaručující dostatečné posouzení charakteru proudění v této oblasti. Dále byl modelován prostor na vstupu do ventilátoru mezi statorovým čelem a ventilátorem. V podstatě byl modelován prostor za výstupem ze statorových kanálů, prostor kolem čela vinutí, vstup do prostoru zadního štítu s ventilátorem a dostatečným výstupem.

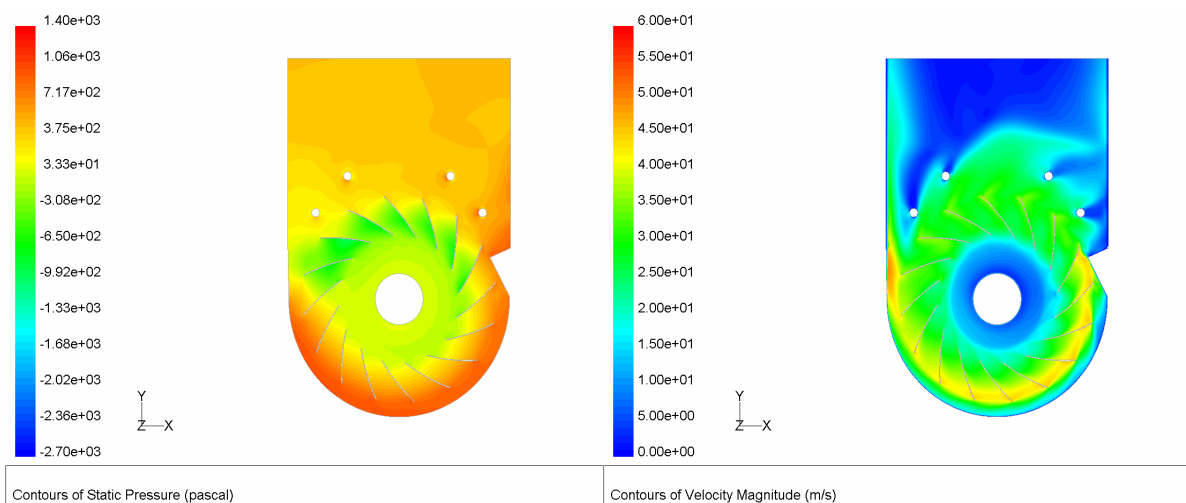


Obrázek 3 Výpočtový model ventilátoru

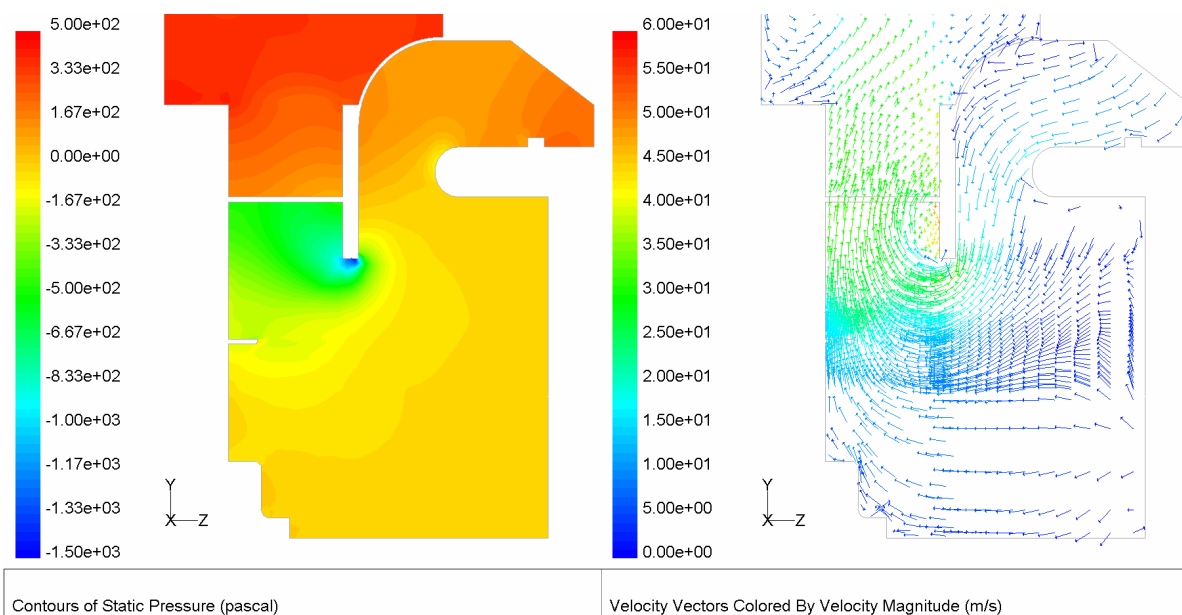
4. Výpočtové simulace

Po zadání všech okrajových podmínek do výpočtového modelu byly provedeny výpočtové simulace. Všechny výpočty byly provedeny pro jmenovité otáčky ventilátoru – $n_n=720\text{ot/min}$. Pro stanovení ventilátorové charakteristiky a závislosti hydraulického odporu stroje na průtočném množství byl zvolen následující postup – na vstupní plochu charakterizující vstup do výpočtového modelu bylo vždy zadáno průtočné množství, které má projít celým modelem. Při tomto zvoleném množství byl výpočtem stanoven tlakový rozdíl mezi vstupem a výstupem. Tímto způsobem bylo provedeno 8 výpočtů. Jeden z výpočtů byl zaměřen na stanovení tlaku H_0 , kdy na vstup bylo zadáno nulové průtočné množství. Ke stanovení tlaku v pracovním bodě, kde průtočné množství v tomto bodě bylo změřeno, byl proveden další z těchto výpočtů. Zbýlých 6 výpočtů bylo zvoleno tak, aby bylo rovnoměrně pokryto průtočné množství, které je ventilátor schopen dodávat.

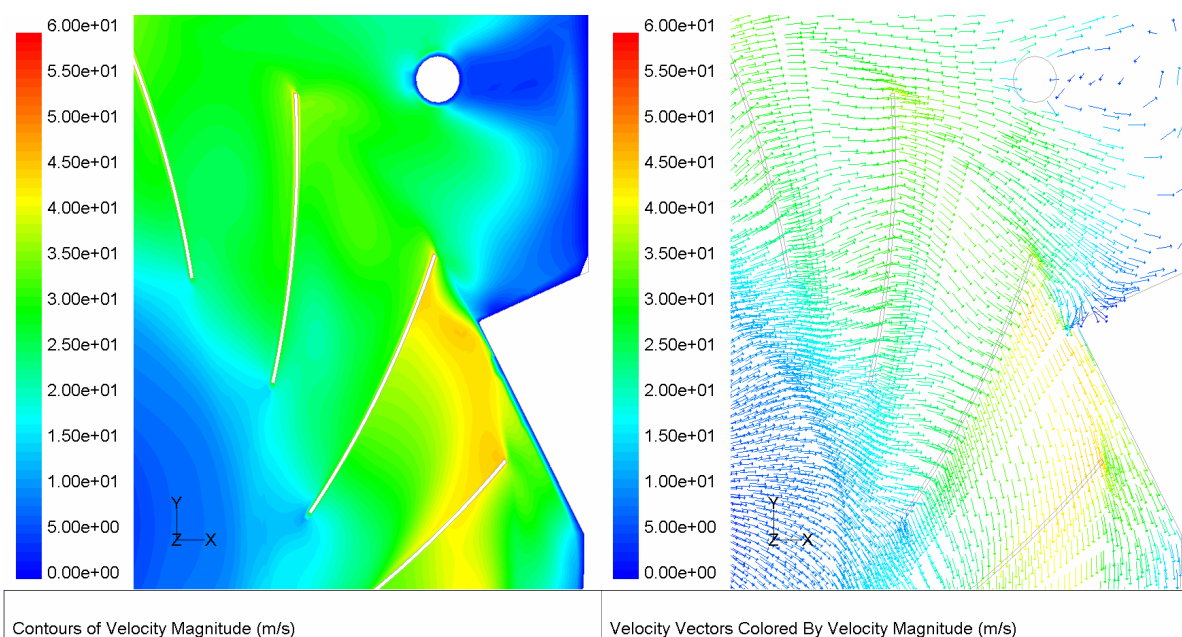
Výsledky výpočtových simulací jsou zobrazení rozložení rychlosti a tlaku ve zvolených řezech výpočtového modelu, jak je vidět na níže uvedených obrázcích popisující pracovní bod.



Obrázek 4 Rozložení tlaku a rychlosti



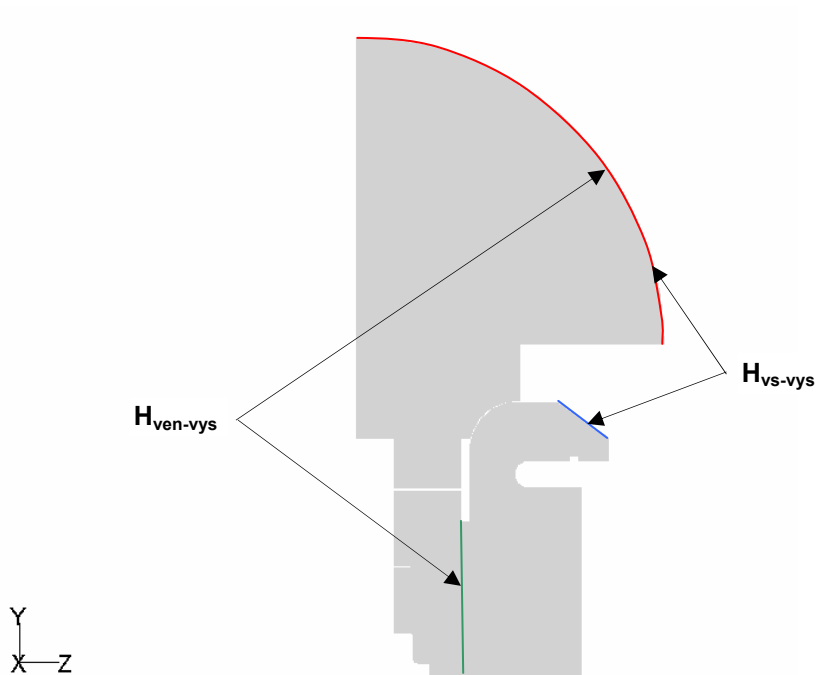
Obrázek 5 Rozložení tlaku a rychlosti na vstupu



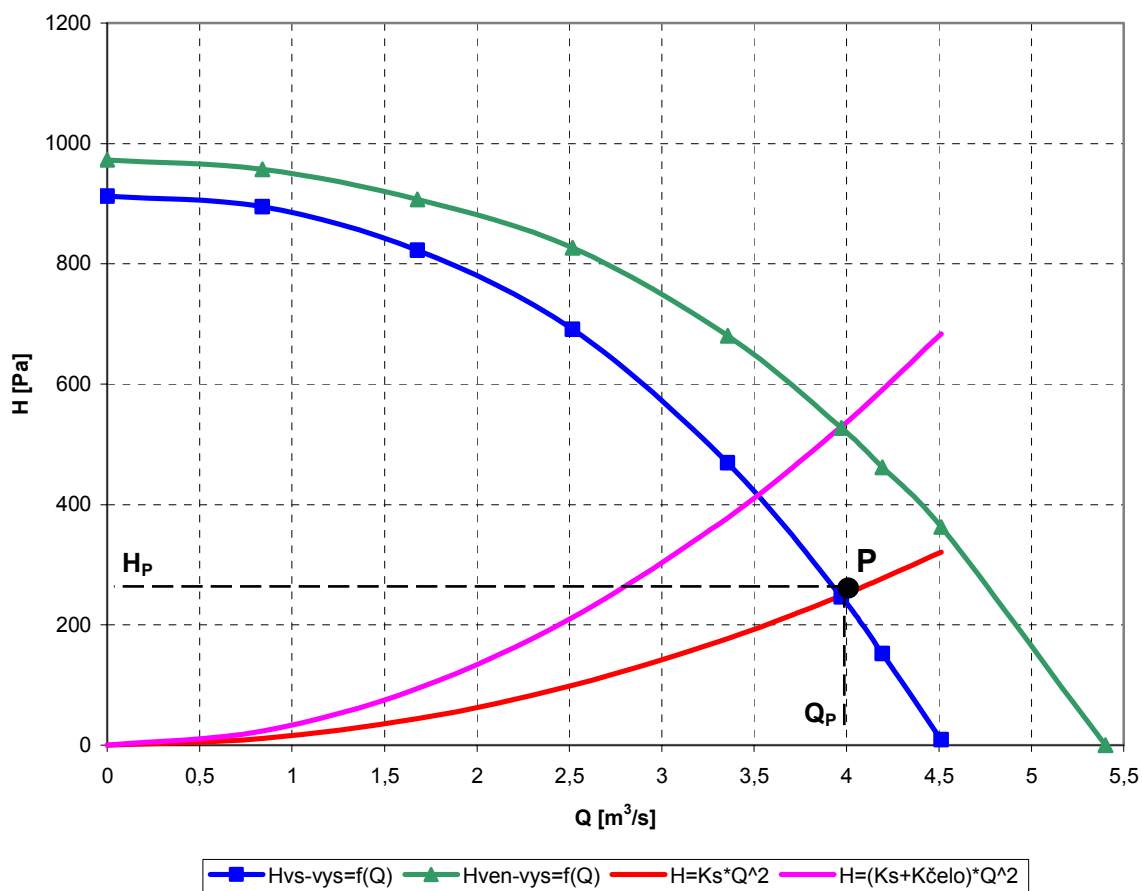
Obrázek 6 Rozložení rychlosti v okolí V-uzávěru

5. Ventilátorová charakteristika

Výsledky výpočtů jsou shrnuty do grafu 2. V tomto grafu jsou uvedeny dvě charakteristiky ventilátoru. První je charakteristika ventilátoru, kde byl brán jako tlak ventilátoru (H_{vs-vys}) rozdíl tlaku mezi plochou charakterizující výstup ze statorových kanálů a výstupní plochou. U druhé charakteristiky ventilátoru byl brán jako tlak ventilátoru ($H_{ven-vys}$) rozdíl tlaku mezi plochou charakterizující vstup do ventilátoru a výstupní plochou. Vše je zřejmé z obrázku 8.



Obrázek 8 Označení ploch pro stanovení tlaku ventilátoru



Graf 2 Ventilátorová charakteristika

Z ventilátorové charakteristiky je možné stanovit nejdůležitější parametry:

- $H_{0_{vs-vys}} = 912 \text{ Pa}$
- $H_{0_{ven-vys}} = 973 \text{ Pa}$
- $Q_{\max_{vs-vys}} = 4,51 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{\max_{ven-vys}} = 5,4 \text{ m}^3/\text{s}$
- $H_p = 246 \text{ Pa}$
- $Q_p = 3,971 \text{ m}^3/\text{s}$

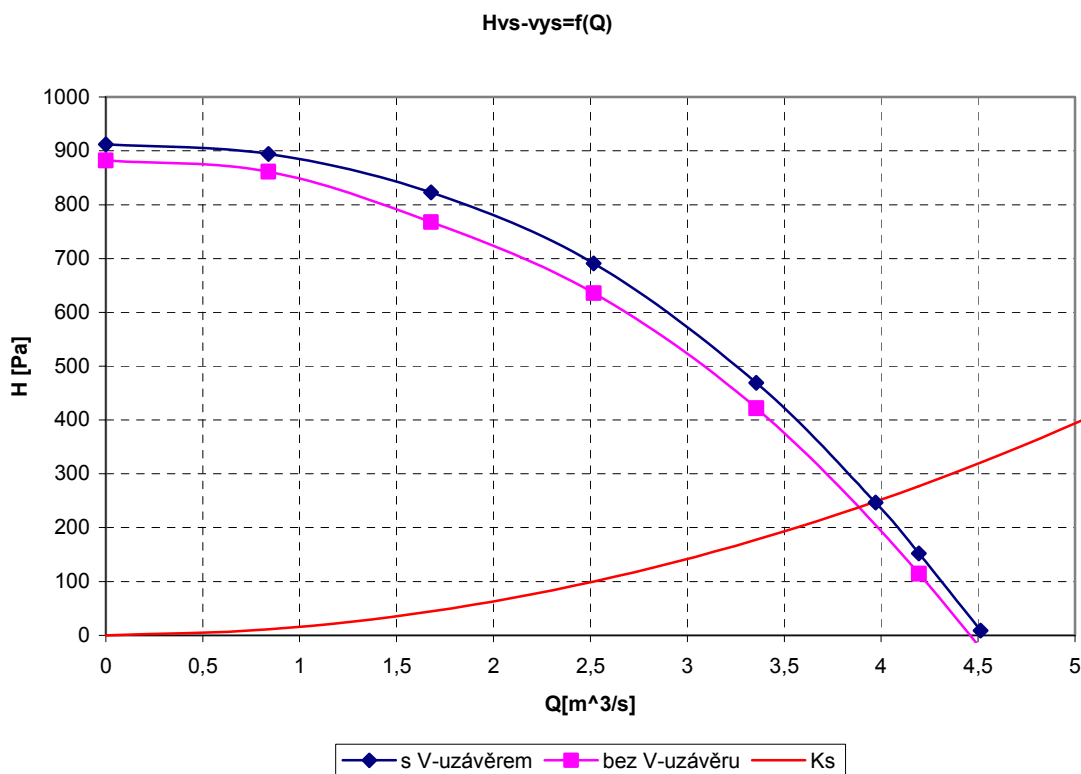
Pokud nahradíme ventilátorovou charakteristiku polynomem je možné určit hydraulický odpor stroje před výstupem ze satorových kanálu podle následujícího vztahu:

$$K_s = \frac{H_{0_{vs-vys}} + K_1 \cdot Q_P + K_2 \cdot Q_P^2 + K_3 \cdot Q_P^3}{Q_P^2} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{912 + 5,77 \cdot 3,971 - 27,47 \cdot 3,971^2 - 4,04 \cdot 3,971^3}{3,971^2} = 15,75 \text{Ns}^2 \text{m}^{-8}$$

6. Vliv V-uzávěru mezi oběžným kolem a stěnou skříně

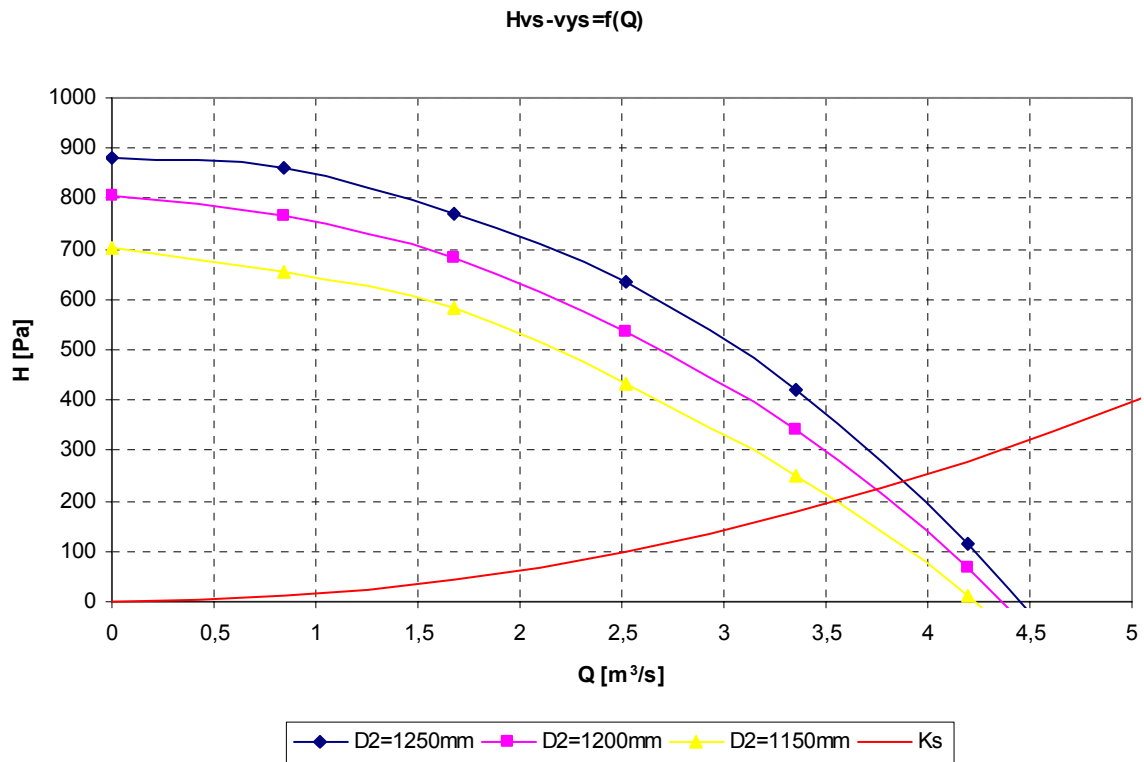
Pro posouzení vlivu V-uzávěru (Obr. 6) na ventilátorovou charakteristiku byl využit již vytvořený výpočtový model, který byl upraven tak, že byl odstraněn V-uzávěr na stěně štítu. S tímto modelem byly provedeny stejné výpočty jako v případě předešlého modelu, umožňující získat ventilátorovou charakteristiku a posoudit vliv V-uzávěru na proudění vzduchu zejména v prostoru výstupu ze štítu.



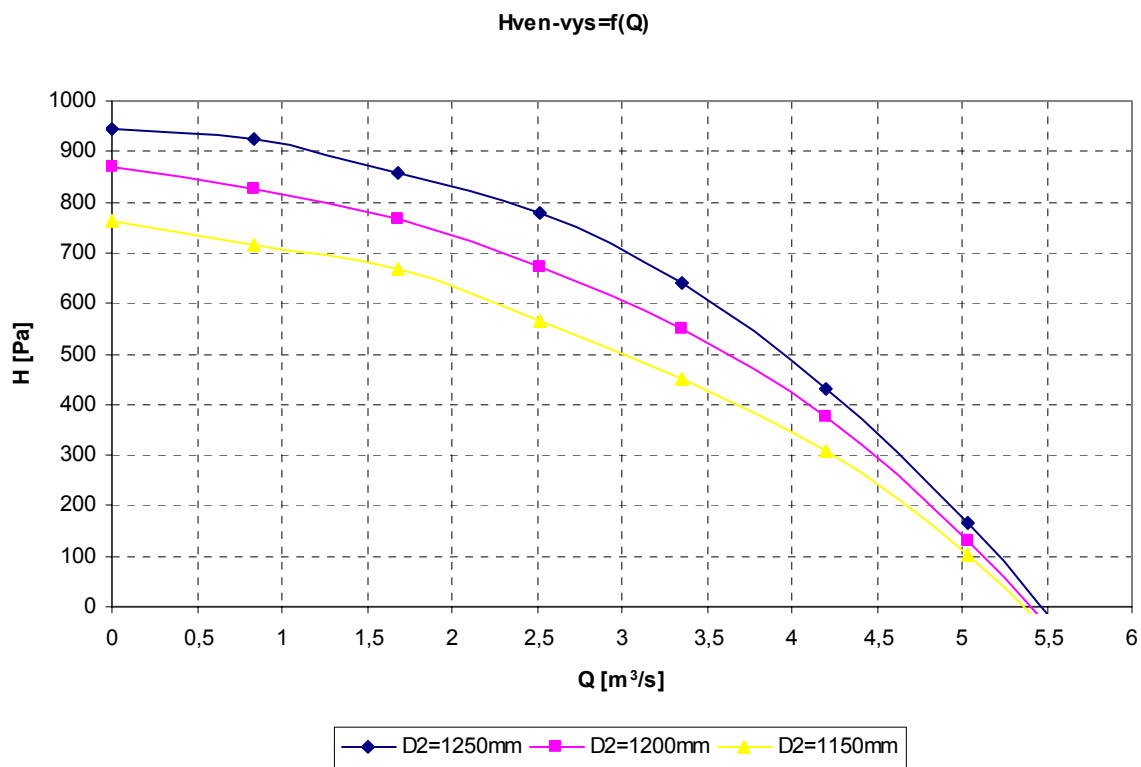
Graf 3 Porovnání ventilátorových charakteristik pro uspořádání s a bez V-uzávěru

7. Vliv průměru oběžného kola ventilátoru

Pro tyto výpočty byly zvoleny tři průměry oběžného kola, pro které byla spočítána ventilátorová charakteristika. Pro všechny tři varianty byl použit výpočtový model bez V-uzávěru na stěně šítu. Opět byly pro každý průměr stanoveny dvě ventilátorové charakteristiky lišící se hodnotou tlaku podle místa v modelu ke kterému byl vztažen (Obr.8). Získané ventilátorové charakteristiky jsou uvedeny v následujících grafech:



Graf 4 Ventilátorové charakteristiky $H_{vs-vys}=f(Q)$



Graf 4 Ventilátorové charakteristiky Hvs-vys=f(Q)

8. Analýza výsledků

Ze získané ventilátorové charakteristiky je zřejmé, že pracovní bod ventilačního systému synchronního generátoru se nachází na konci této charakteristiky. Na základě vypočtené charakteristiky ventilátoru a hydraulického odporu stroje je možné říci, že ventilátor respektive ventilační systém nepracuje v neoptimálnější oblasti. Jednou z příčin může být malý hydraulický odpor stroje. Po zvýšení hydraulického odporu stroje by však došlo ke snížení množství vzduchu procházejícího strojem, což by mělo za následek nežádoucí zvýšení oteplení stroje.

Z ventilátorových charakteristik je možné stanovit bezrozměrné charakteristiky [1] pro jednotlivé průměry oběžného kola. Bezrozměrné charakteristiky byly stanoveny jednak jako vztahující se na průměr oběžného kola D_2 , ale také vztahující se na šířku oběžného kola B . Hodnoty bezrozměrných charakteristik jsou shrnuty do následující tabulky:

Tabulka 2 Porovnání bezrozměrných charakteristik ventilátorů

	vs-vys			ven-vys		
n [min ⁻¹]	720	720	720	720	720	720
B [mm]	140	140	140	140	140	140
D ₂ [mm]	1250	1200	1150	1250	1200	1150
vztaženo na D₂						
ψ ₀	0,667	0,661	0,625	0,713	0,712	0,681
χ	106,050	90,767	71,031	79,380	63,601	47,905
φ _{max}	0,079	0,085	0,094	0,095	0,106	0,119
vztaženo na B						
ψ ₀	0,667	0,661	0,625	0,713	0,712	0,681
χ	21,285	19,767	16,843	15,932	13,851	11,360
φ _{max}	0,177	0,183	0,193	0,212	0,227	0,245

Celkové zhodnocení jednotlivých modelovaných variant je dále porovnáno v následující tabulce 3. U jednotlivých variant byly posuzovány vybrané parametry, kterými jsou:

- Příkon ventilátoru.
- Průtočné množství procházející strojem při daném hydraulickém odporu stroje.
- Hladina hluku.

Příkon ventilátoru v jednotlivých variantách byl stanoven s využitím bezrozměrných příkonových charakteristik získaných z literatury [1] str.276 pro ventilátor V6 bez spirální skříně. Hladina hluku byla stanovena na základě empirického vztahu (344) z téže literatury [1]. Hodnota průtočného množství byla stanovena na základě hydraulického odporu stroje K_s, který byl stanoven na základě výpočtů a měření. Jedná se o průtočné množství v pracovním bodě.

Tabulka 3 Porovnání jednotlivých verzí podle vybraných charakteristik

Varianta modelu	příkon ventilátoru [kW]	průtočné množství Q _p [m ³ /s]	hladina hluku [dB]
s V-uzávěrem (D ₂ =1250mm)	10,314	3,97	108,7
bez V-uzávěru (D ₂ =1250mm)	10,278	3,89	108,7
bez V-uzávěru (D ₂ =1200mm)	8,507	3,76	106,9
bez V-uzávěru (D ₂ =1150mm)	6,962	3,55	104,7

Z výsledků výpočtů je nepochybné, že na výstupu dochází ve střední části ke vzniku víru. Tento jev je jasnější se vzrůstajícím průtočným množstvím. Z výsledků je také zřejmý vliv V-uzávěru, na kterou vzduch vlivem rotace ventilátoru naráží a tím dochází k vírům a k otočení směru proudění směrem k výstupu. V oblasti V-uzávěru se také projevuje vliv trubky zajišťující mechanickou tuhost štítu.

9. Závěr

Závěrem je však nutné sdělit několik poznámek k dosaženým výsledkům. K odstranění zpětného proudění a vírů na výstupu by bylo dobré vhodně upravit prostor štítu k zamezení tohoto jevu. V případě, že by se podařilo přizpůsobit prostor zadního štítu tak, aby se co nejvíce přiblížil tvaru spirální skříně, mohlo by kromě odstranění tohoto jevu dojít také ke zvýšení výkonu ventilátoru a tím by se pracovní bod ventilačního systému mohl přesunout do optimálnější pozice. Jedna z možností řešení je zvětšení a upravení tvaru V-uzávěru.

Vliv V-uzávěru na stěně štítu není tak velký jak se přepokládalo. Odstraněním V-uzávěru se množství vzduchu jen nepatrně snížilo o cca 2,3 %, což ukazuje potřebu V-uzávěr podstatně zvětšit.

Změnou průměru oběžného kola byly zjištěny bezrozměrné charakteristiky závislé na hlavních parametrech ventilátoru – D_2 , B , n . Rovněž byly zjištěny ventilátorové charakteristiky a tím vliv průměru oběžného kola na dodávaném množství vzduchu při daném hydraulickém odporu stroje.

Příspěvek ukazuje možnost využití CFD modelování při řešení ventilačního systému konkrétního synchronního generátoru, zejména oblasti kolem oběžného kola ventilátoru.

10. Poděkování

Příspěvek byl vypracován za podpory MŠMT v rámci projektu č. MSM 2621 00024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“.

11. Seznam použité literatury

- [1] Hak, J. , Ošlejšek, O. : Výpočet chlazení elektrických strojů , 1.díl. VUES Brno 1973
- [2] Vlach, R. : Výpočtově - experimentální modelování ventilátoru synchronního generátoru, sborník semináře Vybrané problémy elektrických strojů a přístrojů, Lomnice u Tišnova, 19.-21. 5. 2003, str. 285-286