

**Aerodynamický návrh vysokotlakého osového ventilátoru  
s využitím nejnovějších výpočtových metod a jeho experimentální  
ověření**

**Ing. Václav Cyrus, DrSc.**

**Aerodynamic design of high pressure axial-flow fan with the  
application of advanced computational methods and its  
experimental verification**

## SUMMARY

A procedure for design of high pressure axial-flow fans for power and environmental arrangements is described in submitted paper. Advanced theoretical methods of internal aerodynamics are applied. These are contained in design codes. The fan blade rows geometry is determined with the use of axisymmetric flow computation in annulus area. Blade elements performance and secondary flow data are included in this solution. A criterion of maximal acceptable aerodynamic loading of fan blade rows elements was established on the basis of published and own experimental data. The flow simulation results, obtained by commercial code Fluent, have been used in the optimization of designed fan stages geometry. However, a validation of applied code results is necessary.

Five axial flow fan stages with high pressure increment were designed. All stages were experimentally verified on the test rig with diameter of 600 mm. Detailed flow fields investigations in the fan stages were performed with the use of 5-hole conical probes. Comparisons of experimental and computed data could be carried out. Maximal efficiency of all new stages was higher than 89 %. It can be concluded that the used design procedure is reliable. Some new stages were used in the construction of axial-flow fans for Czech coal fired power stations.

## SOUHRN

V přednášce je uveden postup návrhu moderních osových lopatkových stupňů pro ventilátory energetických a ekologických zařízení včetně experimentálního ověření. Při návrhu jsou užity nejnovější postupy vnitřní aerodynamiky, jež jsou zabudovány ve výpočtových programech. Geometrie lopatkových řad je určena s využitím řešení osově souměrného proudění v průtočném kanálu stroje. Jsou aplikovány podklady pro lopatkové mříže a sekundární proudění v lopatkových řadách stupňů kompresorového typu. S využitím vlastních experimentálních podkladů byla sestavena kritéria přípustného aerodynamického zatížení mříží pro dosažení vysokých hodnot účinnosti ventilátoru. Při optimalizaci geometrických rozměrů ventilátorového stupně byly v posledních letech využity výsledky numerické simulace proudění získané pomocí komerčního programu FLUENT. Nastavení parametrů výpočtu bylo ověřeno na podrobně proměřeném osovém stupni podobného typu. Navržené lopatkové stupně byly úspěšně experimentálně ověřeny v modelovém měřítku na zkušebním zařízení o průměru 600 mm. Kvůli podrobnějším analýzám byly provedeny sondáže třírozměrného proudění v rovinách lopatkového stupně pětiořadovými pneumatickými sondami.

Bylo navrženo pět nových osových ventilátorových stupňů s relativně vysokým přírůstkem tlaku pro energetická zařízení. Maximální hodnota účinnosti dosáhla minimálně 89%, jak plyne z experimentálního ověření. Byly tak získány podklady pro spolehlivý návrh nových moderních ventilátorových stupňů. Některé z nich byly použity v konstrukci ventilátorů pro uhelné elektrárny s odsiřovacími zařízeními v České republice.

Klíčová slova : osový ventilátor, aerodynamický návrh, lopatková mříž,  
numerická simulace proudu, měření charakteristik, elektrárna

Key words : axial-flow fan, aerodynamic design, blade cascade, numeric flow  
simulation, power station

## OBSAH

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Úvod .....                                                                       | 6  |
| 2. Návrh osového ventilátorového stupně .....                                       | 6  |
| 2.1 Obecný postup návrhu osově stupně.....                                          | 6  |
| 2.2 Návrh geometrie lopatek osového stupně.....                                     | 9  |
| 3. Osově ventilátorové stupně AV1, 2 a 3 pro energetiku.....                        | 13 |
| 3.1 Parametry osových stupňů.....                                                   | 13 |
| 3.2 Výsledky experimentálního ověření navržených stupňů<br>a jejich rozbor.....     | 14 |
| 4. Simulace proudových polí ventilátorového stupně programem<br>Fluent.....         | 18 |
| 5. Osový ventilátorový stupeň AV6 s vysokou hodnotou tlakového<br>součinitele ..... | 20 |
| 5.1 Parametry osového stupně.....                                                   | 20 |
| 5.2 Experimentální ověření návrhu stupně.....                                       | 21 |
| 5.3 Výhled dalších prací.....                                                       | 21 |
| 6. Závěr.....                                                                       | 21 |

## 1. ÚVOD

Před 10-14 lety byla zahájena realizace projektu odsíření českých uhelných elektráren a tepláren. Pro tato ekologická zařízení bylo potřeba nových osových ventilátorů s velkým přírůstkem tlaku, pracujících ve velkém rozsahu objemových průtoků spalin. Protože příkon těchto jedno a dvoustupňových strojů se pohybuje v rozsahu (1 až 3) MW, investoři požadují co nejvyšší účinnost. Lopatkové stupně by měly mít maximální hodnotu účinnosti větší než (88-89)%. Ve spalinách jsou obsaženy agresivní sloučeniny síry, a proto musí být lopatky zhotoveny ze speciálních kovových materiálů. V současné době se připravují rekonstrukce resp. stavby nových bloků uhelných elektráren. Pro ně se rovněž počítá s moderními vysokotlakými osovými ventilátory. Při jejich návrhu nelze již užít běžné návrhové metody, které jsou uvedeny v literatuře o ventilátorech např. /1/.

Autor habilitace na základě požadavků největšího českého výrobce ventilátorů ZVVZ Milevsko a.s. navrhl a experimentálně ověřil se svým týmem čtyři osově lopatkové stupně pro ventilátory odsiřovacích zařízení /3/ v letech 1993 - 1996. Při návrhu lopatkování byly také využity nejnovější podklady z výzkumu osových kompresorů, který autor habilitační práce prováděl do roku 1992 ve SVÚSS v Praze-Běchovicích pro závod ČKD Kompresory. Některé hlavní dosažené výsledky z tohoto období jsou obsaženy v doktorské disertaci a dalších publikacích jako např. /4/, /5/, /7/ a /11/. Nové osově lopatkové stupně byly aplikovány v konstrukci nových ventilátorů firmy ZVVZ Milevsko a.s. Stroje typu APJB a APJC byly instalovány na českých elektrárnách a teplárnách. Jedná se o cca 20 strojů s vnějším průměrem oběžného kola (2000 až 3900) mm. V nedávné době byl navržen nový osový stupeň s vyšší hodnotou tlakového součinitele v porovnání se stupni navrženými před 10 – 12 lety. Návrhové práce byly realizovány v rámci projektu GAČR s využitím numerické simulace proudění /8/ až /10/.

V habilitační přednášce budou postupně probírány užité návrhové postupy a výsledky experimentálního ověření nových ventilátorových lopatkových stupňů včetně rozborů. Rovněž budou uvedeny výsledky aplikace numerické simulace proudění.

## 2. NÁVRH OSOVÉHO VENTILÁTOROVÉHO STUPNĚ

**2.1 Obecný postup návrhu osového stupně včetně experimentálního ověření**  
Moderní osově lopatkové kompresorového typu se v současné době navrhují v iteračním cyklu podle blokového schématu znázorněného na obr.1. Ve

SVÚSS byl vyvinut pod vedením autora habilitační práce soubor programů s názvem CADAC /12/, který obsahuje programy, popsané v dalším textu.

Nejprve se stanoví základní geometrické rozměry stupně ( vnější průměr, nábojový poměr, otáčky , počty lopatek ) na základě jednorozměrného výpočtu při užití vztahů, platných v mechanice tekutin a termodynamice. Při tom se vychází jednak ze zadaných parametrů jako jsou např.: hmotnostní průtok, přírůstek celkového tlaku, hustota plynu a jednak z konstrukčních možností stroje : např. minimální hodnota nábojového poměru, maximální počet oběžných lopatek, vlastnosti materiálu lopatek. Tyto výpočty se provádějí v programu PNS.

Geometrie rotorové a statorové řady se určí pomocí programu NAK. Při návrhu se řeší osově souměrné proudění v průtočném kanále jako stlačitelné a nevazké. Vliv vazkosti plynu se zavádí do výpočtu tím, že výstupní úhel proudu a energetické ztráty proudu v mřížích lopatkových řad jsou stanoveny ze zobecněných empirických podkladů pro rovinné mříže a sekundární proudění.

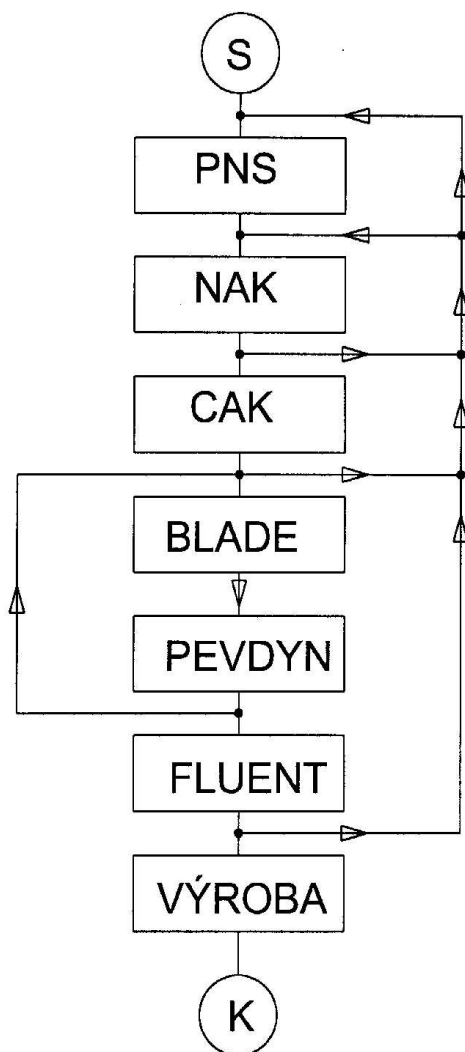
Při znalosti tvaru lopatek je možné pak stanovit pracovní charakteristiku ventilátorového stupně pomocí programu CAK. Při tom se vychází ze stejného matematického modelu proudění jako v programu NAK. Využívá se však podkladů pro široký pracovní rozsah mříží lopatkových řad.

V dalším kroku návrhu se provádí v programu BLADE matematický popis lopatkových ploch. Dále se realizuje pevnostní a dynamická kontrola lopatek ( blok programů vyvinutý ve SVÚSS s názvem PEVDYN). Aplikují se metody konečných prvků. Pokud navržený stupeň vyhovuje aerodynamickým, pevnostním a dynamickým kritériím, pak je možné provést numerickou simulaci vazkého proudění např. komerčními programy. V našem případě byl užit program FLUENT. Práce s komerčními programy je z hlediska uživatelského výhodná, protože jsou k dispozici podprogramy pro grafické znázornění výsledků a pro zadání úloh apod. Zároveň lze v odborné literatuře nalézt řadu výsledků a zkušeností z aplikace těchto programů. Zpracováním výsledků simulace proudu lze získat nejen hlavní výkonové veličiny ventilátorového stupně v návrhovém bodě ale i v celém pracovním rozsahu. Je možné na základě analýzy výsledků odhalit i příčiny případného neúspěchu návrhu. Ve firmě AHT Energetika na základě řady porovnání výsledků výpočtu a experimentu se při určení charakteristik v poslední době používá místo programu CAK program FLUENT.

V obr.1 jsou v blokovém schématu uvedeny různé cesty, pomocí nichž se provádí vlastní návrh stupně při využití iterací. Jestliže navržená geometrie lopatek nevyhovuje zadaným kritériím, pak se provádí úprava a výpočet se vrací

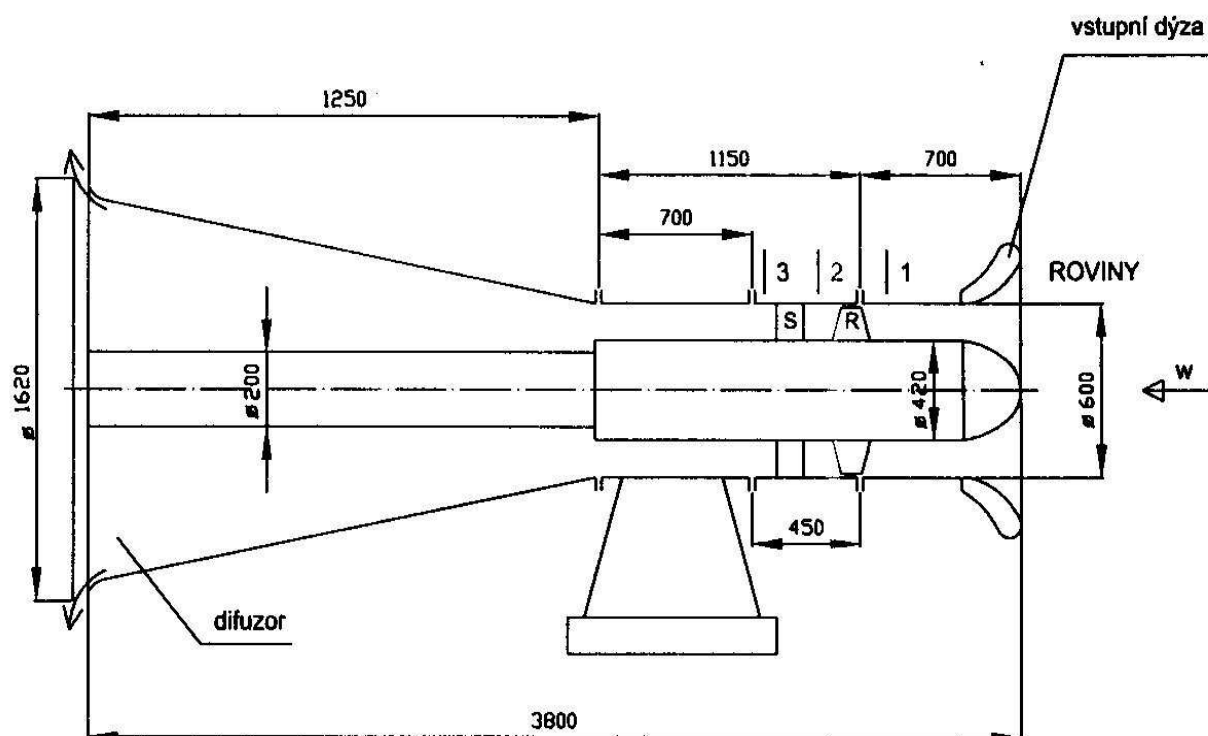
dopředu na vstup do programu NAK nebo do PNS. Podobně je vyznačen iterační cyklus mezi programy BLADE a PEVDYN.

Nově navržený lopatkový stupeň je nutné experimentálně ověřit. Stupeň se vyrobí obvykle v modelovém měřítku. Měří se jeho charakteristiky v širokém provozním stavu při přestavení buď rotorových či vstupních lopatek. Nejdůležitějším kritériem úspěšnosti návrhu je dosažení předepsané hodnoty přírůstku celkového tlaku a co možná nejvyšší hodnoty účinnosti. Autor habilitace prováděl experimentální ověření se svým týmem na zkušební trati o vnějším průměru 600 mm. Ta je znázorněna na obr.2. Skládá se ze zkoušeného lopatkového stupně, ze vstupní dýzy a difuzoru s pohyblivou zadní stěnou, jež umožňuje změnu aerodynamického odporu tratě. Zařízení je poháněno dynamometrem, kde krouticí moment je určován pomocí vážení na kyvném rameni satoru. Tato veličina je zapotřebí pro spolehlivé určení účinnosti.



Obr.1 Blokové schéma návrhového postupu osového stupně





Obr.2 Zkušební zařízení o průměru 600 mm

V rovinách stupně č.1, 2 a 3 se obvykle provádí sondáž proudu pětiočtovými kuželovými sondami o průměru čidla 2,5 mm na 6-11 poloměrech. Na každém poloměru se obvykle realizuje měření ve 12 – 19 bodech v obvodovém směru v rozsahu jedné rozteče statorových lopatek. Z výsledků sondáže proudu se nejprve středícím postupem, popsaným např. v [3], [4] stanoví střední hodnoty veličin v obvodovém směru. S jejich využitím se pak vyhodnotí průběhy ztrátového součinitele  $\zeta$ , deviace proudu  $\delta$ , a úhlu náběhu  $i$  a difuzního faktoru  $D$  mříží obou lopatkových řad po poloměru. Ze srovnání změřených a návrhových průběhů lze pak posoudit příčiny splnění či nesplnění návrhových předpokladů. V dalším textu se budeme podrobněji zabývat postupem návrhu geometrie rotorové a statorové řady lopatkového stupně.

## 2.2 Návrh geometrie lopatek osového stupně

Návrh geometrie rotorové a statorové lopatkové řady se stanovuje pomocí programu NAK. Ten řeší osově souměrné nevazké stlačitelné proudění v ortogonálním souřadném systému (obr.3). Výpočtové roviny se při návrhu umísťují vně lopatkových řad turbostroje. Kvaziortogonálou nazýváme přímku ležící ve výpočtové rovině a svírající úhel  $\psi$  s radiálou. Základní rovnice mají tvar:

a) rovnice radiální rovnováhy – rovnice (1)

$$\frac{\partial w_m}{\partial s} = \cos^2 \alpha \left\langle \frac{1}{w_m} \left[ \frac{\partial I}{\partial s} - T \frac{\partial S}{\partial s} \right] + \sin \varepsilon \frac{\partial w_m}{\partial m} - k_m w_m \cos \varepsilon - w_u \left[ \frac{\partial \tan \alpha}{\partial s} - \left( \tan \alpha + \frac{2\omega r}{w_m} \right) \frac{\cos \psi}{r} \right] \right\rangle$$

b) rovnice kontinuity

$$m = 2\pi \int_s \rho w_m \cos(\psi + \Phi) ds, \quad (2)$$

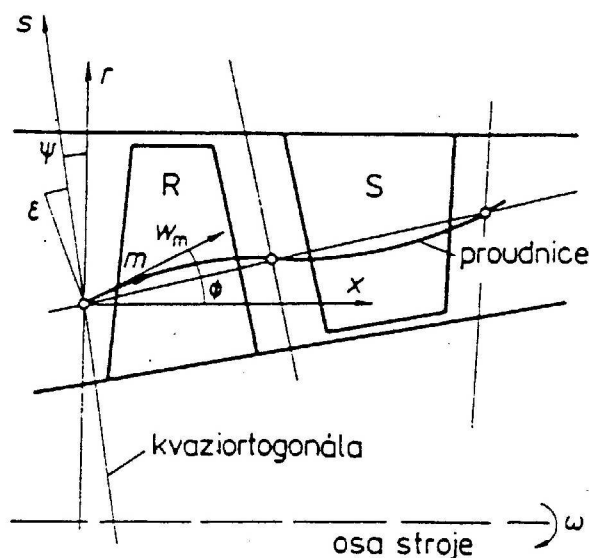
c) energetická rovnice

$$\Delta H = \omega(r_2 w_{u2} - r_1 w_{u1}), \quad (3)$$

d) rovnice stavu

$$p = \rho RT \quad (4)$$

Při řešení soustavy rovnic se určuje změna entropie  $S$  v lopatkové řadě a úhel proudu  $\alpha$  ve výstupní rovině lopatkové řady z korelačních závislostí sestavených z experimentálních podkladů platných pro rovinné mříže a mříže lopatkových řad stupňů.  $I$  resp  $H$  je rotalpie resp entalpie plynu.  $k_m$  je křivost meridiálního průmětu proudnice. Plynová konstanta je označena písmenem  $R$ . Význam ostatních veličin v rovnicích je patrný z obr.3 a ze seznamu označení.



Obr.3 Ortogonální souřadný systém pro výpočet osově souměrného proudění

Je použita metoda řešení, jež uvažuje sklon a křivost průmětu proudnice do meridiální roviny. V anglické literatuře se tato metoda označuje jako „streamline curvature method“. Veličiny proudu jsou řešeny podél kvaziortogonály v jejich průsečících s proudnicemi /5/.

V návrhovém postupu se ze zadaných parametrů nejprve stanoví vstupní a výstupní úhly proudu rotorové a statorové lopatkové řady navrhovaného stupně na jednotlivých kvaziortogonálách (obr.3), jež leží vně lopatkových řad. Určí se rychlostní trojúhelníky, které vyjadřují vazbu vektorů rychlosti relativního a absolutního proudu v osovém lopatkovém stupni. Při tom se vychází z rovnice energetické (3) a z výsledků řešení proudového pole. Proudnicí osově souměrného proudění leží na proudových plochách, jež se pro účely výpočtu nahrazují kuželovými plochami. Pro takto stanovené zakřivení proudu v lopatkové řadě, jež je dáno rozdílem hodnot vstupního a výstupního úhlu proudu, je třeba navrhnout lopatkovou mříž na příslušné proudové ploše. Mříž se navrhne s využitím podkladů pro rovinné mříže např. podle metody Liebleina /6/. Celý návrhový výpočet probíhá v řadě iteračních cyklů metodou postupných aproximací.

Návrhy lopatkových stupňů byly realizovány s pomocí programu NAK na 11 proudnicích. Krajní proudnice byly vzdáleny od náboje a skříně o hodnoty pošinovacích tlouštěk mezní vrstvy  $\delta_h^*$ ,  $\delta_t^*$ . Ty byly stanoveny z empirických hodnot koeficientu zúžení průtočného kanálu mezní vrstvou  $K_b$  ( angl. „blockage factor“) anebo řešením soustavy rovnic třírozměrné mezní vrstvy /5/.

Aerodynamické vlastnosti mříží rotorové a statorové lopatkové řady – úhel náběhu  $i_N$ , deviace proudu  $\delta_N$  a ztrátový součinitel  $\zeta_N$  při návrhovém výpočtu jsou určeny podle rovnic

$$i_N = i_{ref} + \Delta i \quad , \quad (5)$$

$$\delta_N = \delta_{ref} + \Delta \delta_i + \Delta \delta \quad , \quad (6)$$

$$\zeta_N = \zeta_{2D} + \zeta_{3D} = \zeta_{ref} + \Delta \zeta_i + \zeta_{3D} \quad . \quad (7)$$

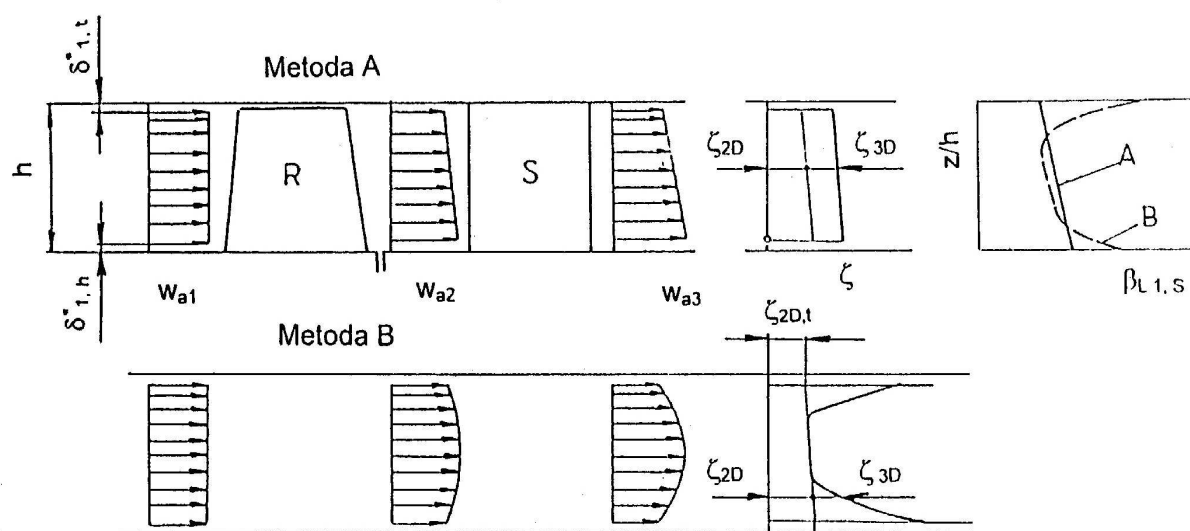
Referenční hodnoty úhlu náběhu  $i_{ref}$  a deviace proudu  $\delta_{ref}$  byly vypočteny podle metody Liebleina /6/. Ztrátový součinitel  $\zeta_{ref}$  byl spočten podle korelačních závislostí . Přírůstky deviace proudu  $\Delta \delta_i$  a ztrátového součinitele  $\Delta \zeta_i$  byly stanoveny podle empirických závislostí obsažených v práci /5/. Je třeba zdůraznit, že tyto přírůstky nabývají relativně velmi nízkých hodnot, protože návrhový bod mříže je umístěn buď přímo anebo v těsné blízkosti referenčního stavu obtékání mříže. Liebleinova metoda /6/ aerodynamických vlastností rovinných mříží kompresorového typu byla použita, protože byly sestavena

z rozsáhlého souboru experimentálních dat pro mříže s profilem NACA 65.série a britské série C4. Tyto profily se používají při konstrukci lopatek ventilátorů.

Na podkladě dat získaných při vývoji nových osových kompresorových a ventilátorových stupňů ve SVÚSS a AHT Energetika a dat získaných Brodersenem /2/ v Pfleidererově ústavu autor habilitace sestavil poloempirické závislosti /3/, /5/ pro korekci deviace proudu  $\Delta\delta$  zvláště pro rotorovou a satorovou lopatkovou řadu. Korekce  $\Delta\delta$  v sobě zahrnuje účinek jevů spojených s odtržením proudu u odtokové hrany profilu v podmínkách lopatkové řady stupně. U všech lopatkových stupňů byla zvolena vzdálenost návrhového úhlu náběhu od referenčního úhlu náběhu :  $\Delta i = (-1^\circ) - (-2^\circ)$  . Důvodem je mírně vzdálit provozní bod mříže od hranice vzniku rozsáhlého odtržení při kladném úhlu náběhu .

Vliv sekundárního proudění při návrhovém výpočtu byl respektován dvojím způsobem. U metody A byly sekundární ztráty rozloženy rovnoměrně podél výšky kanálu (obr.4), zatímco u metody B se rozložení ztrátového součinitele po poloměru blížilo reálnému. To znamená, že nejvyšší hodnoty ztrát jsou v blízkosti omezujících stěn v důsledku sekundárního proudění. Touto problematikou se podrobně zabývala doktorská disertační práce autora habilitační práce /5/. Hodnota sekundárního ztrátového součinitele  $\zeta_{3D}$  je svázána s celkovým sekundárním ztrátovým součinitelem  $\tilde{\zeta}_{3D}$  závislostí

$$\tilde{\zeta}_{3D} h = \int_0^{0.5h} \zeta_{3D} dz + \int_{0.5h}^h \zeta_{3D} dz = 0.5h(\tilde{\zeta}_{3D,h} + \tilde{\zeta}_{3D,t}) . \quad (8)$$



Obr.4 Respektování účinku sekundárního proudění při návrhovém výpočtu

Sekundární ztrátový součinitel  $\zeta_{3D}$  se určuje zvlášť pro náboj (index h) a skříň (index t) v závislosti na tom, zda existuje radiální mezera mezi omezující stěnou a koncem lopatky /7/. Při konstrukci rozložení sekundárního ztrátového součinitele po výšce lopatky se vychází z empirických podkladů.

Hodnota sekundárních ztrát ( $\zeta_{3D}$ ) se určuje z korelačních závislostí stanovených na podkladě poměrně rozsáhlého souboru experimentálních údajů. Korelace byly navrženy Cyrusem/5/, /7/ pro konstrukční případ lopatky bez a s radiální vůlí mezi její špičkou a omezující stěnou.

### 3. OSOVÉ VENTILÁTOROVÉ STUPNĚ AV1, 2 A 3 PRO ENERGETIKU

#### 3.1 Parametry osových stupňů

V tabulce č.1 jsou uvedeny hlavní parametry tří ventilátorových lopatkových stupňů, které autor habilitace navrhl dle požadavků výrobního závodu v letech 1992 - 1995. Stupně označené AV1, AV2 a AV3 jsou velmi aerodynamicky zatížené a jsou určeny především pro ventilátory bloků uhelných elektráren s odsiřovacími zařízeními. Mají nábojový poměr  $v = 0,70$ .

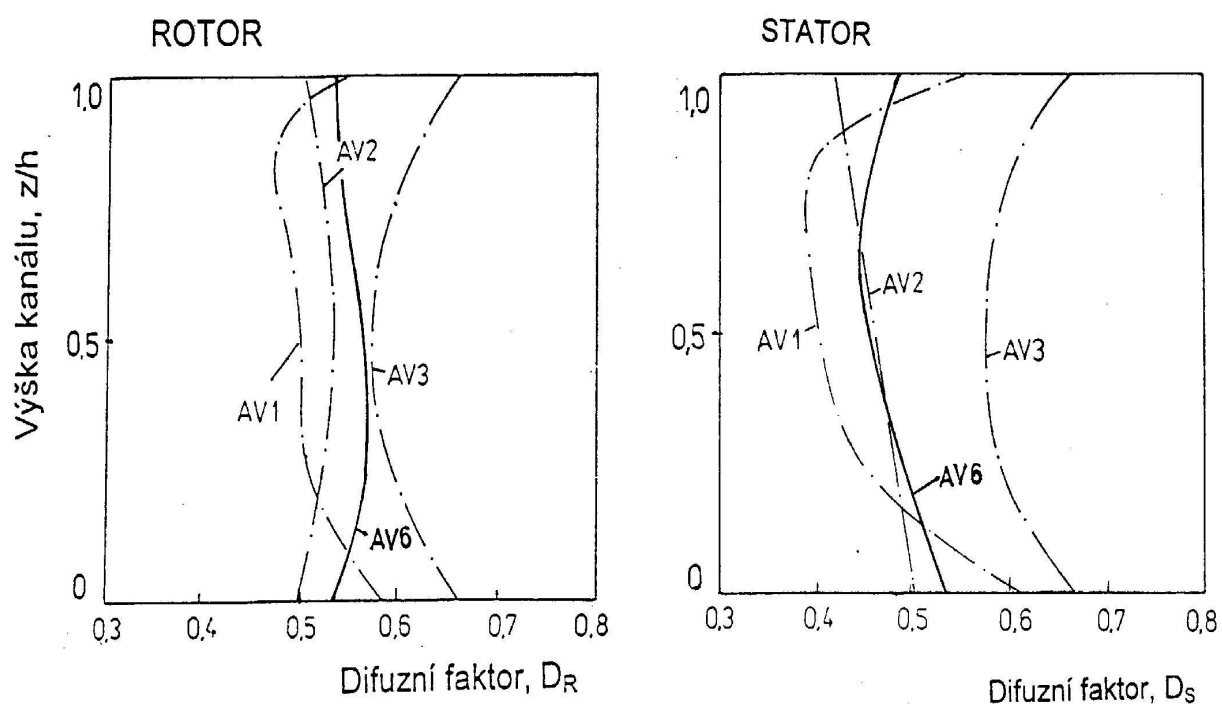
Tabulka č.1: Návrhové parametry nových osových stupňů

| Označení | $\varphi$ | $\Psi$ | $v$  | Metoda | Navrženo  |
|----------|-----------|--------|------|--------|-----------|
| AV1      | 0,6       | 0,75   | 0,70 | B      | 1993-1995 |
| AV2      | 0,65      | 0,85   |      | A      |           |
| AV3      | 0,40      | 0,65   |      | B      |           |
| AV6      | 0,6       | 0,95   |      | A      | 2004      |

Všechny lopatkové stupně byly navrženy za předpokladu konstantního rozložení předané práce po poloměru. Uvažuje se osové proudění ve vstupní a výstupní rovině stupně. U nejvíce zatížených stupňů AV1 a AV3 byl užit postup s proměnným rozložením sekundárního ztrátového součinitele - metoda B (obr.4). U stupně AV2 byl aplikován klasický postup dle metody A. Lopatky byly vytvořeny z profilů NACA 65.série. Z konstrukčních důvodů bylo možné aplikovat pouze 24 oběžných lopatek. Statorových lopatek bylo použito 25. Štíhlost rotorových resp statorových lopatek je  $h/c = 0,95$  resp  $1,0$ . Z prací autora habilitace vyplývá, že i při nízkých hodnotách štíhlosti lze dosáhnout vysoké hodnoty účinnosti lopatkového stupně /4/, /5/.

Na obr.5 jsou uvedeny křivky difuzního faktoru  $D$  u rotorové a statorové řady tří uvažovaných variant stupňů AV1,2 a 3. Difuzní faktor je kritériem aerodynamického zatížení kompresorové lopatkové mříže. Je zřejmé, že

základní varianta AV1 má v návrhových podmínkách nižší aerodynamické zatížení mříží než kritické (difuzní faktor:  $D < 0,6$ ). Při nadkritickém by vzniklo rozsáhlé odtržení proudu v lopatkové mříži. Nejvyšší zatížení je u okrajů lopatek. Podobně podkritické zatížení mříží je u lopatkování AV2. Avšak u obou lopatkových řad stupně AV3 je hodnota difuzního faktoru vyšší než  $D = 0,58$  podél celé výšky průtočného kanálu stroje. U okrajů kanálu dosahuje hodnoty 0,66. Zde je tedy nebezpečí vzniku rozsáhlejšího odtržení proudu. Cílem výzkumu kromě návrhu nových stupňů bylo také určení meze



Obr. 5 Rozložení difuzního faktoru po výšce rotorové a statorové řady stupňů v návrhových podmínkách

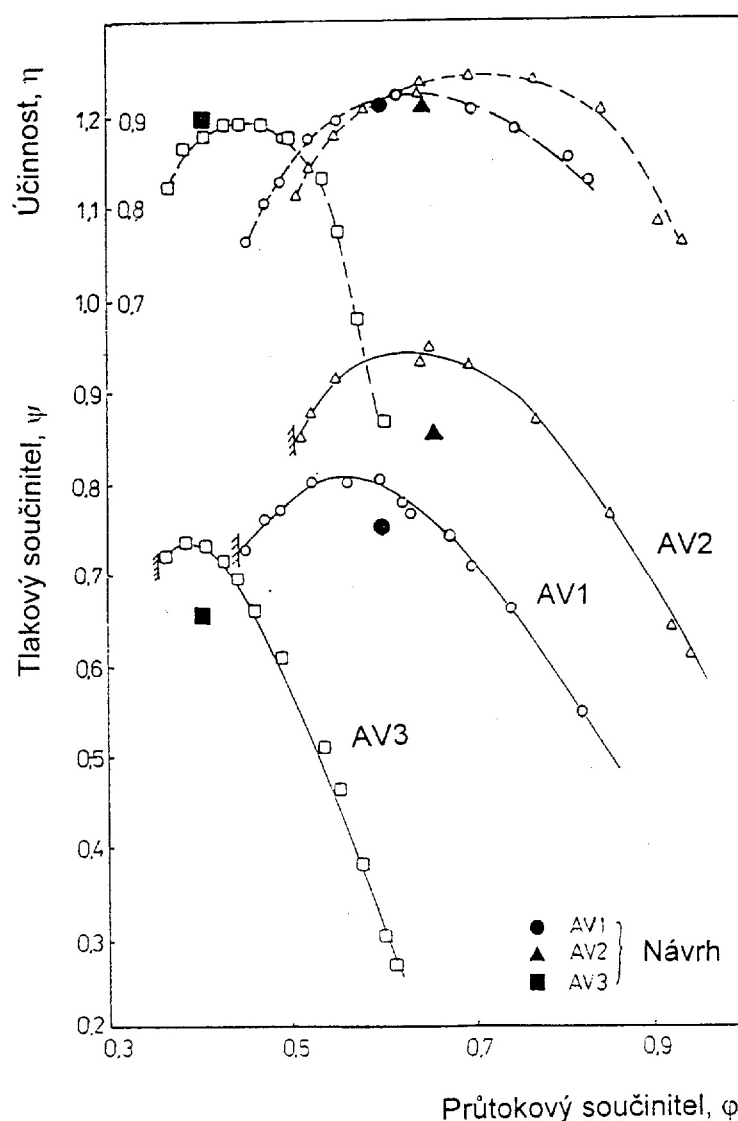
### 3.2 Výsledky experimentálního ověření navržených stupňů a jejich rozbor

Obr.6 ukazuje změřené závislosti tlakového součinitele a účinnosti na průtokovém součiniteli ventilátorových stupňů. Experimentální křivky byly stanoveny především podle klasického postupu s užitím údajů statického tlaku na skříní dle norem-ČSN a ISO (základní metoda). V některých případech byly pracovní body stanoveny pomocí středění hodnot celkového tlaku získaných sondáží proudu pneumatickými sondami ve vstupní a výstupní rovině stupně. Obě metody daly prakticky stejné výsledky v rámci chyb měření, jak je např. patrné v případě stupně AV1- obr.9.



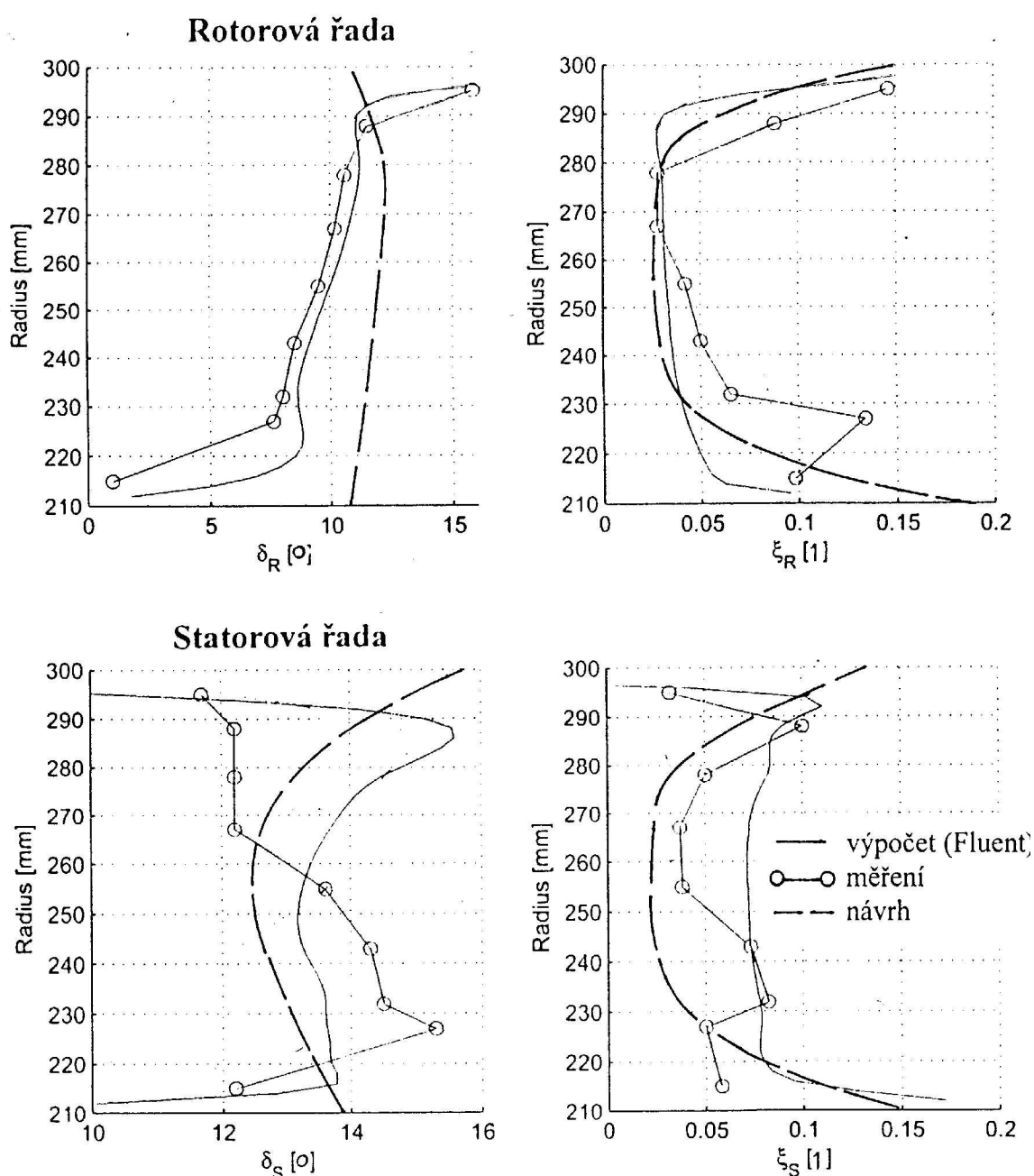
U lopatkování AV1 resp AV2 byla experimentálně zjištěna hodnota účinnosti o 1% resp 2.5% vyšší než vycházela při návrhovém výpočtu. Chyba stanovení účinnosti byla určena z teorie chyb. Má hodnotu  $\kappa_{\eta} = 0.9 \%$ . Maximální vyhodnocené hodnoty účinnosti se pohybovaly v rozmezí 0.90 až 0.93 pro tři uvažované varianty osového stupně. Na obr.6 jsou také vyznačeny návrhové body jednotlivých variant stupňů. Je zřejmé, že ve všech třech případech při návrhových hodnotách průtokového součinitele jsou experimentální hodnoty tlakového součinitele vyšší než návrhové. Vysvětlení lze najít při porovnání průběhů návrhových a experimentálních hodnot deviace proudu po výšce rotorové řady, kde se předává práce plynu.

To je uvedeno např. pro stupeň AV1 na obr.7. Návrhové průběhy jsou znázorněny čárkovanou čarou. Z obrázku plyne, že návrhové hodnoty deviace



Obr. 6 Charakteristiky ventilátorových stupňů AV1, AV2 a AV3

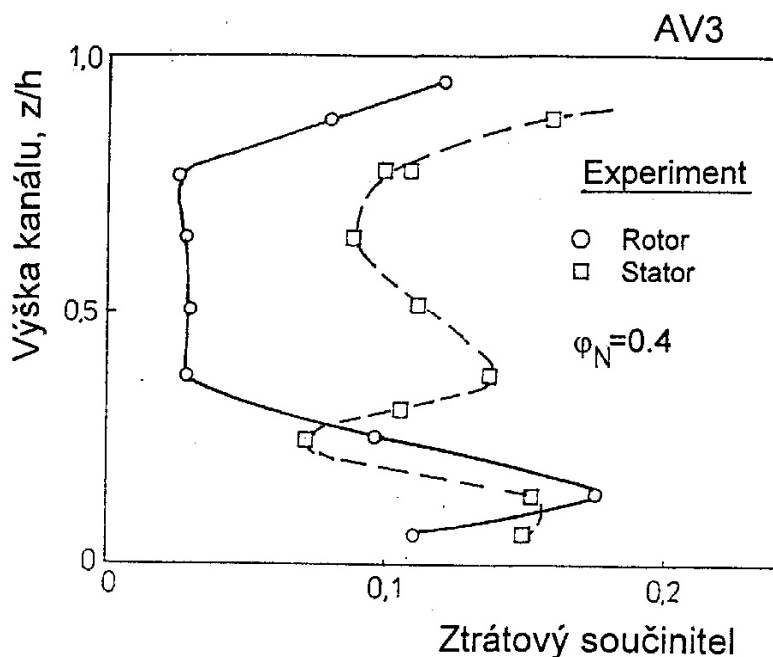
proudu rotorové řady jsou vyšší než naměřené podél celé výšky průtočného kanálu. Prakticky stejné výsledky byly dosaženy i u ostatních dvou lopatkových stupňů AV2 a AV3. Na základě tohoto závěru bylo nutné zpřesnit závislost pro korekci deviace proudu  $\Delta\delta$  - rovnice (6). Z porovnání je patrné, že v případě rotorové řady návrhový průběh ztrátového součinitele celkem dobře souhlasí se změřeným včetně blízkosti omezujících stěn. U statorové řady jsou rozdíly vyšší, zejména u okrajů průtokového kanálu. Ve střední části kanálu se projevuje vliv pulsací tlaku na údaj pneumatické kuželové sondy. Ten zkresluje vyhodnocené údaje celkového tlaku proudu pneumatické sondy umístěné za rotorovou řadou /4/.



Obr.7 Rozložení ztrátového součinitele a deviace po výšce rotorové a statorové řady stupně AV1 v návrhovém bodě



V případě stupně AV3 je vyhodnocená hodnota účinnosti o 1.5 % nižší, než je návrhová hodnota (obr.6). Mez stability práce stupně je blízko návrhového bodu. To souvisí s vyšším aerodynamickým zatížením lopatkových řad v porovnání se zatížením řad lopatkových stupňů AV1 a AV2 (obr.5). Skutečné energetické ztráty mříží v důsledku rozsáhlejšího odtržení proudu v lopatkování jsou vyšší než uvažované při návrhu. To plyne z obr.8, kde jsou znázorněny průběhy ztrátového součinitele rotorové a statorové řady podél poloměru. U náboje rotorové řady v koutu tvořeném podtlakovou stranou profilu a omezující stěnou vznikla rozsáhlá oblast odtržení, což dokumentují vysoké hodnoty ztrátového součinitele. U statorové řady vzniklo však odtržení proudu podél celé výšky lopatky. To lze např. odstranit zvýšením počtu statorových lopatek. Ačkoliv mříže obou lopatkových řad jsou prakticky stejně zatíženy (obr.5), tak rozsahy oblastí odtržení proudu jsou odlišné, jak plyne z obr.8. Souvisí to s rozdílným mechanismem 3D proudění v rotorové a statorové řadě, např. /4/, /11/. Proto mříže rotorové lopatkové řady lze více aerodynamicky zatížit než v případě statorové řady. Projevuje se zde totiž příznivý účinek odstředivé síly.



Obr.8 Rozložení ztrátového součinitele po výšce rotorové a statorové řady stupně AV3 v návrhovém bodě

Z rozboru naměřených dat vyplývá, že vliv návrhové metody A a B (obr.4) na maximální hodnotu účinnosti navržených stupňů není výrazný. Toto zjištění je v souladu s posledními výsledky dosaženými např. v leteckých firmách General Electric a Rolls Royce.

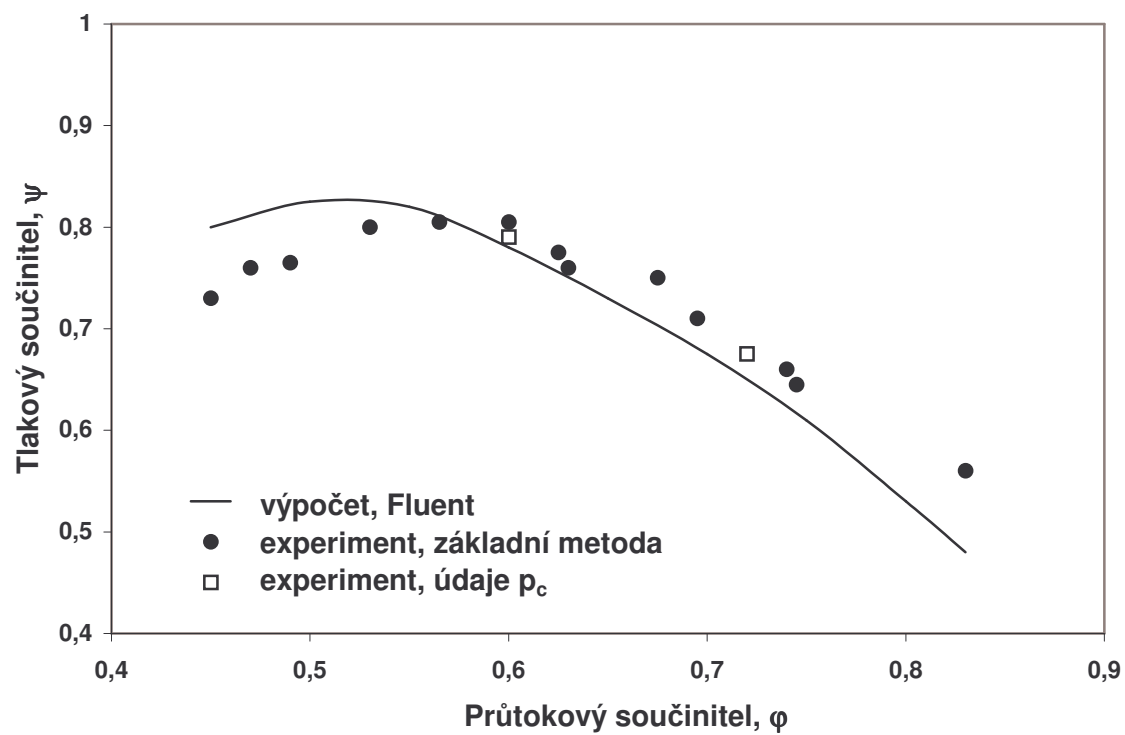
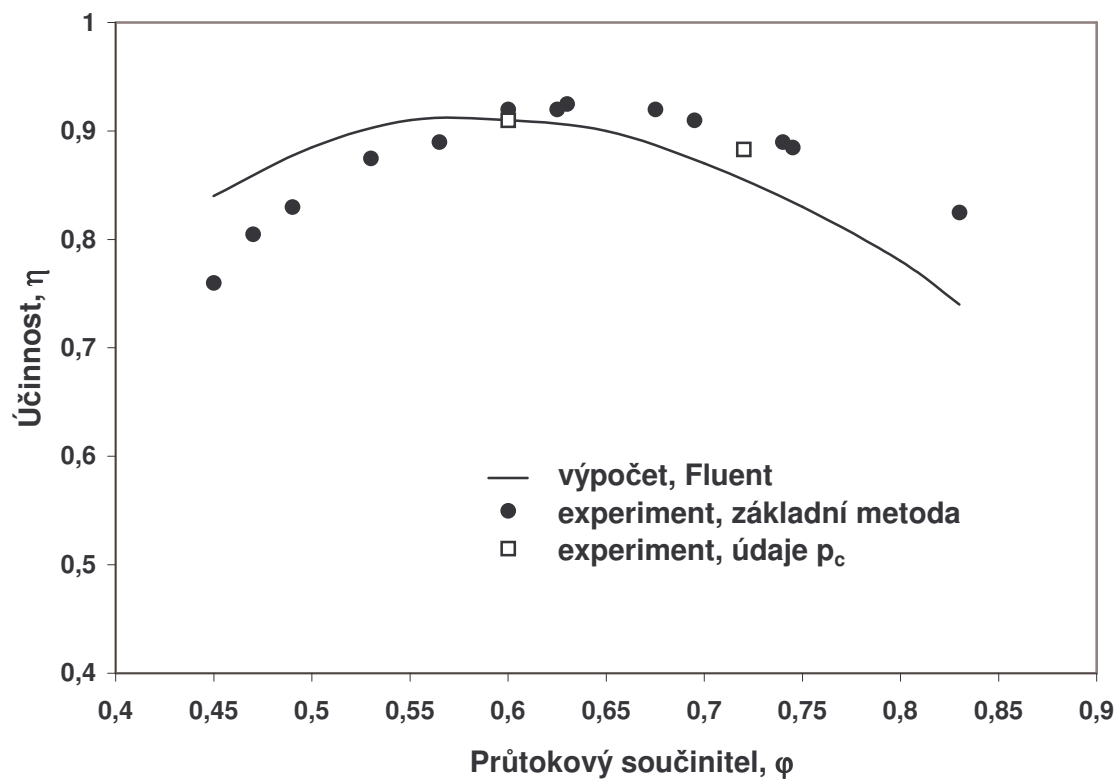
#### 4. SIMULACE PROUDOVÝCH POLÍ VENTILÁTOROVÉHO STUPNĚ PROGRAMEM FLUENT

V době, kdy probíhaly návrhové práce na stupních AV1, 2 a 3, nebyly ještě k dispozici programy pro simulaci třírozměrného proudění v osových lopatkových stupních. Teprve před několika lety, především v souvislosti s rozšířením komerčních programů např. Fluent na českých univerzitách, se podařilo získat první zkušenosti s jejich aplikací při řešení úloh při návrhu nových lopatkových strojů. Autor habilitační práce spolupracuje v této oblasti se ZČU v Plzni s dr. Polanským /9/, /10/.

Matematický model proudění programu Fluent je založen na systému Navier-Stokesových rovnic pro turbulentní stlačitelné vazké proudění. Rovnice stavu pro ideální plyn a diferenciální transportní rovnice jsou součástí soustavy rovnic popisujících proudění. Numerický model je řešen metodou Runge-Kutta ve formě konečných objemů. Je aplikováno pětistupňové schéma s přesností 2. řádu a přednastavenými koeficienty. K urychlení konvergence je použita multigradní metoda „V“. Standardní prostorová síť vytvořená ze šestistěnů pokrývá celou výpočtovou oblast. V oblasti mezní vrstvy je síť hustší. „Non-equilibrium“ stěnové funkce jsou aplikovány pro modelování proudění u obtékaných povrchů lopatkových profilů a omezujících stěn kanálu.

Nastavení parametrů výpočtu bylo provedeno na základě doporučení manuálů programu a zkušeností získaných při simulaci proudu lopatkových stupních, jež lze nalézt v odborné literatuře. Ověření programu bylo provedeno při podrobném porovnání výsledků simulace proudu a experimentu u stupně AV1. Zde byla podrobně proměřena proudová pole v několika provozních stavech. Byly zkoušeny různé modely turbulence (např. RMS, RNG, Spalart-Allmaras apod.) a různé počty a struktury buněk /9/, /10/. Na základě rozboru a ve shodě s většinou autorů publikací zabývajících se simulací proudu v lopatkových stupních, byl zvolen model turbulence RMS a 1 milion výpočtových buněk.

Na obr.9 je provedeno porovnání vypočtených a změřených charakteristik lopatkového stupně AV1. Změřená a spočtená proudová pole byla středěna shodnými postupy. Z obrázku je patrný přijatelný souhlas experimentu a výpočtu. Podrobnější srovnání vypočtených a změřených vlastností mříží rotorové a statorové lopatkové řady (ztrátový součinitel a deviace proudu) po výšce průtokového kanálu je patrné z obr.7 v návrhovém stavu. Souhlas výsledků simulace proudu a experimentu je přijatelný s výjimkou případu ztrátového součinitele statorové řady. V mimonávrhových stavech je srovnání publikováno v práci /9/. Podle očekávání se rozdíly zvětšují se vzdáleností od návrhového bodu.



Obr.9 Charakteristiky lopatkového stupně AV1

## 5.OSOVÝ VENTILÁTOROVÝ STUPEŇ AV6 S VYSOKOU HODNOTOU TLAKOVÉHO SOUČiniteLE

### 5.1 Parametry osového stupně

Nové a rekonstruované uhelné bloky elektráren, jež budou vybaveny odsiřovacími zařízeními, budou podle provedených analýz potřebovat nové ventilátory, kde osový stupeň budou mít vyšší hodnotu tlakového součinitele než stávající. Jedná se o hodnotu cca  $\psi_N = 0,9 - 1,0$ . Proto byl v nedávné době navržen a experimentálně ověřen nový osový lopatkový stupeň s návrhovými hodnotami bezrozměrných součinitelů:  $\varphi_N = 0,6$ ,  $\psi_N = 0,95$ . Nábojový poměr má hodnotu  $v = 0,7$ . Z konstrukčních důvodů byl užit maximální počet rotorových lopatek:  $z_R = 24$ . Lopatky jsou vytvořeny z profilu NACA 65.série. Statorová řada konečné návrhové varianty má 38 lopatek.. Lopatkový stupeň má označení AV6 /8/.

Zvyšování hodnoty tlakového součinitele stupně vede k růstu zakřivení proudu v mřížích rotorové a statorové řady. Tím roste i jejich aerodynamické zatížení. Jak již bylo zmíněno v předchozím textu pro nový stupeň s dobrou účinností ( $\eta_{\max} > 88\%$ ) je třeba, aby hodnota difuzního faktoru  $D$  u lopatkových mříží jednotlivých řad ve střední části kanálu nepřekročila hodnotu:  $D_R = 0,55 - 0,58$  resp  $D_S = 0,5 - 0,54$  v případě rotorové resp statorové řady. Tyto hodnoty plynou z rozborů uvedených v předchozím textu této přednášky. Protože není možno zvýšit počet rotorových lopatek u stupně AV6 přes hodnotu  $z=24$ , lze dodržet předepsané aerodynamické zatížení mříží pouze prodloužením tělivy. Tím ale poklesne štíhlost rotorové řady. Oproti stávajícímu stupni AV1 se zmenší štíhlost z hodnoty  $(h/c)_{R,AV1} = 1,0$  na  $(h/c)_{R,AV6} = 0,85$ . Pokles štíhlosti v tomto rozmezí by neměl způsobit významný pokles účinnosti, jak plyne z výsledků měření zadních stupňů osového kompresoru /4/, /5/.

Byla propočtena řada variant osových stupňů, jež vyhovuje výše specifikovanému zadání. Aby bylo dodrženo přípustné aerodynamické zatížení rotorových mříží u náboje, bylo nutné přerozdělit předanou práci plynu podél výšky kanálu. Relativní rozdíl přírůstku entalpie na skříni a náboji rotorové řady činí cca 12% u výsledné varianty návrhu. Na obr.5 je znázorněno rozložení difuzního faktoru podél poloměru rotorové a statorové řady u stupně AV6. Je zřejmé, že se podařilo dodržet limity pro přípustné zatížení mříží.

V návrhovém bodě ( $\varphi_N = 0,6$ ) byl proveden výpočet proudových polí v nově navrženém stupni pomocí programu Fluent. Neobjevily se žádné větší oblasti odtržení v rotorové a statorové řadě. Na základě výsledků výpočtu byl optimalizován počet statorových lopatek.

## 5.2 Experimentální ověření návrhu stupně

Na obr.10 jsou porovnány vypočtené a změřené závislosti tlakového součinitele  $\psi$  a účinnosti  $\eta$  na průtokovém součiniteli  $\phi$  vyšetřovaného stupně AV6. V návrhových podmínkách byla vyhodnocena hodnota účinnosti  $\eta = 0,885$  v případě, že byl přírůstek celkového tlaku stupně určen s využitím změřených hodnot statického tlaku na skříni (základní metoda). Vypočtená hodnota je  $\eta_{th} = 0,88$ . Tedy souhlas výpočtu a měření je překvapivě dobrý. Experimentální hodnota tlakového součinitele v návrhovém bodě je  $\psi = 0,95$ . Hodnota určená z výsledků výpočtu je  $\psi_{th} = 0,96$ . Rozdíly mezi vypočtenými a změřenými charakteristikami nejsou velké ani při mimonávrhových stavech stroje, jak plyne z obr.10.

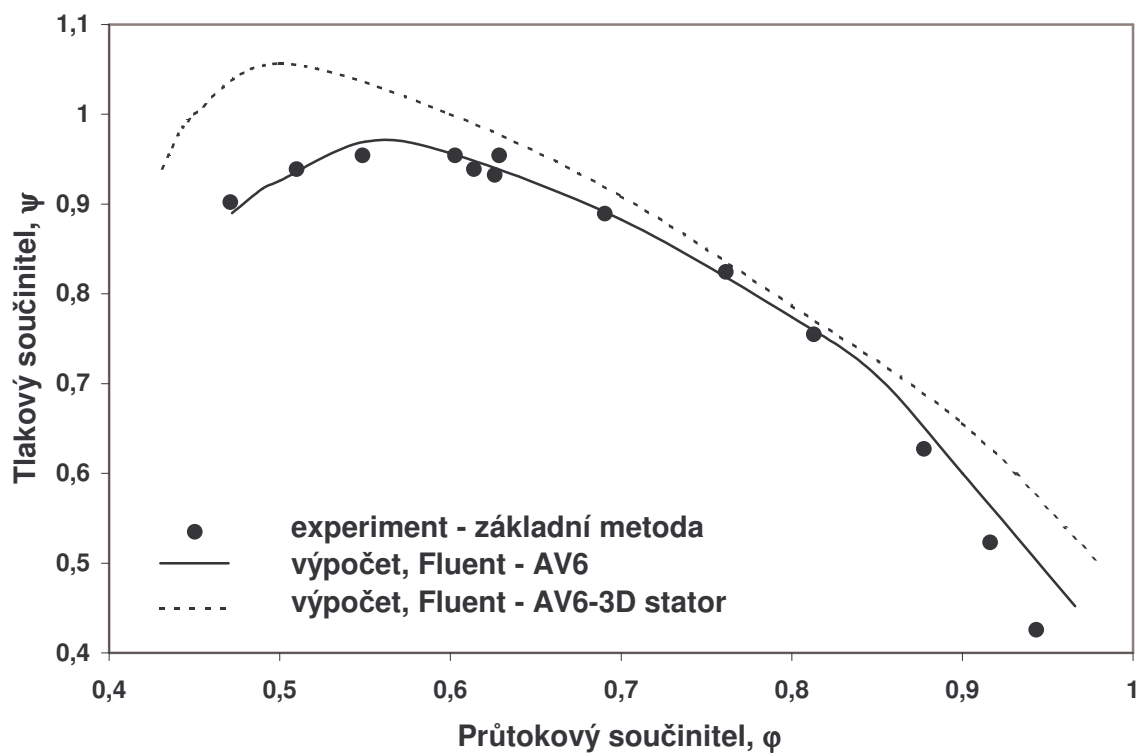
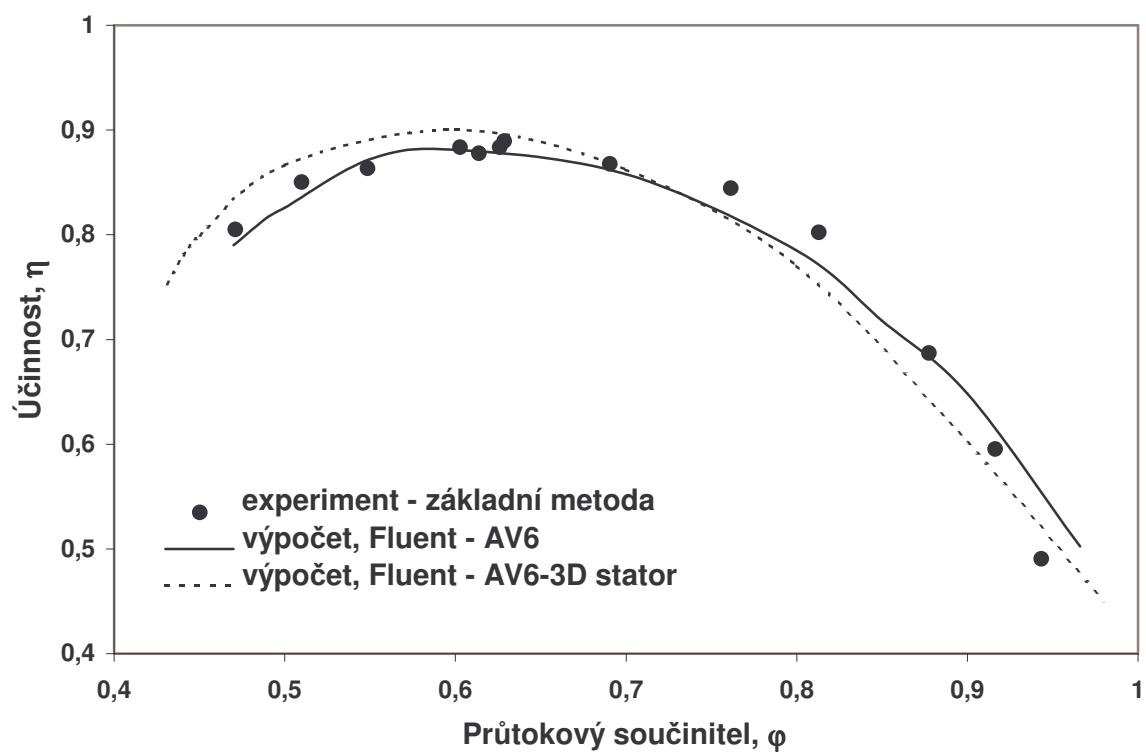
Kvůli podrobnějšímu rozboru bylo provedeno měření proudových polí v jednotlivých rovinách stupně pětivotrovými sondami v návrhových podmínkách. Souhlas vypočtených a experimentálních průběhů úhlu náběhu, deviace proudu a ztrátového součinitele mříží rotorové a satorové řady po poloměru je přijatelný.

## 5.3 Výhled dalších prací

Nedávno byly navrženy satorové lopatky pro stupeň AV6 (označení AV6-S3D), jejichž tvar by měl omezit odtržení proudu u náboje a skříň zejména při kladných úhlech náběhu. Úprava spočívá ve zvětšení délky tětiny u obou omezujících stěn. Aplikace nových lopatek podle literatury by měla způsobit zvětšení pracovní oblasti ventilátorového stupně před mezí stability. To je patrné z porovnání charakteristik, získaných simulací proudu, ve stupni s původními a novými satorovými lopatkami na obr.10. Vypočtená křivka byla určena simulací pro počet nových lopatek AV6-S3D : 34 .V současné době jsou lopatky ve výrobě a do konce roku proběhnou zkoušky. Uvažuje se i o návrhu satorových lopatek z plechu kvůli nižším nákladům na výrobu.

## 6. ZÁVĚR

V publikaci je uveden komplexní postup návrhu vysokotlakých osových lopatkových stupňů pro ventilátory energetických a ekologických zařízení včetně experimentálního ověření. Při návrhu jsou užity nejnovější postupy vnitřní aerodynamiky, jež jsou zabudovány ve výpočtových programech. Geometrie lopatkových řad je určena s využitím řešení osově souměrného proudění v průtočném kanálu stroje. Jsou aplikovány podklady pro rovinné lopatkové mříže a mříže lopatkových řad stupňů kompresorového typu. Při



Obr.10 Charakteristiky stupně AV6

optimalizaci geometrických rozměrů stupně jsou využity výsledky numerické simulace proudění získané pomocí komerčního programu Fluent. Navržené lopatkové stupně byly experimentálně ověřeny na zkušebním zařízení o průměru 600 mm. Pro podrobnější analýzy byly provedeny podrobné sondáže proudění v rovinách lopatkového stupně pětivotorovými pneumatickými sondami. Celkem bylo navrženo a experimentálně ověřeno pět osových stupňů pro energetiku. Hlavní dosažené výsledky lze shrnout do následujících bodů:

1. Aby navržený stupeň měl maximální hodnotu účinnosti vyšší než (88-90)%, je třeba volit přiměřené aerodynamické zatížení mříží lopatkových řad. Hodnoty difuzního faktoru mříží rotorové resp satorové lopatkové řady by měly být nižší než rozmezí  $D_R = 0,56-0,58$  resp  $D_S = 0,52-0,54$ . Pro dosažení tohoto cíle mohou být užity i relativně nízké hodnoty štíhlosti lopatek  $h/c = 0,8 - 1,0$ .
2. V případě, že aerodynamické zatížení mříží u náboje rotorové řady překročí doporučené rozmezí, pak je nutno přerozdělit práci předanou plynu podél poloměru.
3. Výsledky numerické simulace proudění, získané pomocí komerčního programu Fluent, lze využít při určení aerodynamických vlastností nově navrženého stupně a při optimalizaci geometrie lopatek zejména z hlediska účinnosti. Jedná se zejména o tvar profilu a počet lopatek. Nastavení parametrů výpočtu (např. model turbulence, počet a geometrie buněk atd.) musí být však ověřeno na případě pečlivě proměřeného podobného stupně. Při splnění této podmínky lze získat i pracovní charakteristiku navrhovaného stupně. Souhlas výsledků simulace a měření je přijatelný v okolí návrhového bodu. Rozdíly se zvětšují se vzdáleností od tohoto bodu.
4. Z experimentálního ověření navržených stupňů vyplynula maximální absolutní hodnota rozdílu mezi předpokládanými a experimentálně zjištěnými hodnotami účinnosti: 1% v návrhovém bodě. To dokazuje dobrou spolehlivost návrhového postupu. V závěru uveden program dalších výzkumných prací.

## SEZNAM LITERATURY

1. Eck B.: Ventilatoren. Springer Verlag, 1978
2. Brodersen S.: Experimentelle Untersuchungen an hochbelasteten Axialventilatoren mit kleinem Nebenverhältnis. Dissertation, 1986, TU Braunschweig
3. Cyrus V.: Design of axial flow fans with high aerodynamic loading. Forschung im Ingenieurwesen, Bd.62 (1996), Nr.3, S.58 – 64.
4. Cyrus V.: The effect of inlet velocity profile in the three-dimensional flow in rear axial compressor stage. ASME Journal of turbomachinery, Vol.110, 1988, pp.434-440.



5. Cyrus V.: Modelování třírozměrného proudění při výpočtu aerodynamických charakteristik osového kompresoru. DrSc práce, Praha 1990
6. Lieblein S. : Experimental flow in two-dimensional cascades. NASA SP 36
7. Cyrus V.: Prediction of secondary losses in axial compressors. ASME Paper No.92-GT-288, Koln 1992
8. Cyrus V.: Návrh osového stupně AV6. Interní zpráva AHT, 2004
9. Polanský J., Cyrus V. and Lavička D. :Aerodynamic performance prediction of highly loaded low-speed stage of axial compressor, Symcom 05, Lodz, 2005
10. Cyrus V., Polanský J., Wurst P.:Návrh a experimentální ověření osového stupně kompresorového typu s vysokou hodnotou tlakového součinitele. Power systems engineering, Plzeň 2005, Proceedings s.52-58.
11. Cyrus V. : An experimental study of stall in four axial compressor stages. ASME Paper No.2000-GT-504, Munich 2000
12. Cyrus V., Bruna V., Folta V., Lindová M., Šprinc, M. a Krásný I.: Systém programů CADAC pro návrh stupně osového kompresoru. Interní zpráva SVÚSS, 1992
13. - Fluent 6, Users guide

### Nejdůležitější použitá označení

|           |                                                                                       |             |                                                           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------|
| A         | průtoková plocha                                                                      | $\delta$    | deviace proudu $\delta = \bar{\alpha}_2 - \beta_{L2}$     |
| c         | tětiva                                                                                | $\eta$      | účinnost $\eta = Q \Delta p'_c / (M_k \omega)$            |
| D         | difuzní faktor                                                                        | $\zeta$     | ztrát. součinitel $\zeta = (p_{c1} - p_{c2}) / q_1$       |
|           | $D = 1 - \bar{w}_2 / \bar{w}_1 + ((\bar{w}_{u1} - \bar{w}_{u2}) / 2\sigma \bar{w}_1)$ | $\sigma$    | hustota mříže                                             |
| h         | výška lopatky                                                                         | $\varphi$   | průtokový součinitel $\varphi = Q / A_{u_t}$              |
| i         | úhel náběhu $i = \bar{\alpha}_1 - \beta_{L1}$                                         | $\vartheta$ | zakřivení střednice $\vartheta = \beta_{L1} - \beta_{L2}$ |
| $M_k$     | krouťící moment                                                                       | $\rho$      | hustota                                                   |
| p         | tlak                                                                                  | $\omega$    | úhlová rychlost                                           |
| Q         | objemový průtok                                                                       |             |                                                           |
| q         | dynamický tlak                                                                        |             |                                                           |
| R         | plynová konstanta                                                                     |             |                                                           |
| T         | teplota                                                                               |             |                                                           |
| $u_t$     | obvodová rychlost na skříní                                                           |             |                                                           |
| w         | rychlost                                                                              |             |                                                           |
| z         | vzdálenost od náboje                                                                  |             |                                                           |
| $\alpha$  | úhel proudu                                                                           |             |                                                           |
| $\beta_L$ | úhel lopatky                                                                          |             |                                                           |
| $\gamma$  | úhel nastavení profilu                                                                |             |                                                           |
| $\psi$    | tlakový součinitel $\psi = 2 \Delta p'_c / (\rho u_t^2)$                              |             |                                                           |

### Indexy

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| c          | celkový                              |
| h          | náboj                                |
| m          | meridiální                           |
| R          | rotor                                |
| S          | stator                               |
| u          | obvodový                             |
| 1,2        | vstup, výstup                        |
| $(\quad)$  | střední hodnota po obvodu            |
| $(\quad)'$ | střední hodnota v celé měřicí rovině |

## ŽIVOTOPIS

V.Cyrus se narodil 11.9.1947 v Nymburce. V roce 1971 ukončil studium na Fakultě strojní ČVUT v Praze s vyznamenáním. Poté nastoupil do Státního výzkumného ústavu pro stavbu strojů (SVÚSS), do odboru Mechanika tekutin. Zabýval se experimentálním a teoretickým výzkumem turbokompresorů. V roce 1980 obhájil kandidátskou disertační práci na téma : „Sekundární proudění a jeho vliv na vlastnosti osového kompresoru“. Výsledky mnoholeté výzkumné práce v oboru vnitřní aerodynamiky osových kompresorů shrnul v doktorské disertační práci s názvem : „Třírozměrné proudění v osovém kompresoru a jeho modelování při stanovení aerodynamických charakteristik“, kterou obhájil v roce 1990.

V roce 1991 strávil 2 měsíce na studijním pobytu v laboratoři turbostrojů na Ecole Centrale v Lyonu. V témže roce absolvoval třítydenní přednáškový pobyt ve vědecko-výzkumné základně v Hsintu na Tajvanu. Vedl několik kandidátských disertačních prací. Je autorem a spoluautorem cca 130 výzkumných zpráv a 50 článků publikovaných v různých časopisech a sbornících. Nejdůležitější výsledky své vědecké práce shrnul v 14 publikacích ASME (ASME Paper). Dva články uveřejněny v Transaction of the ASME, Journal of Turbomachinery. V americké a německé literatuře lze nalézt přes 30 odkazů (citací). Je autorem monografie s názvem : „Secondary Flow in Axial Compressors and Its Effect on Aerodynamic Characteristics.“ Externě přednáší na ČVUT v Praze. Je členem komise pro obhajoby doktorských disertačních prací v oboru Energetické stroje a Mechanika tekutin a termomechanika. V období 1999-2005 byl členem komise GAČR (oborová-technické vědy a podoborová –strojírenství). V letech 1991 až 1998 byl dopisujícím členem Evropské společnosti pro proudění, turbulenci a spalování (ERCOFTAC).

Ve SVÚSS pracoval naposledy jako vedoucí oddělení „Turbokompresory a ventilátory“(od r.1987) a zástupce vedoucího odboru „Mechanika tekutin“(od r.1990). Po rozpadu výzkumného úseku SVÚSS přešel v roce 1995 do firmy AHT Energetika s.r.o., kde je činný jako společník a jednatel.

V.Cyrus se zabývá v současnosti problematikou vnitřní aerodynamiky osových a radiálních ventilátorů a kompresorů. Kromě hlavního oboru je ještě aktivní i v oblasti chlazení spalovacích motorů a provozu uhelných elektráren.

