

**Aerodynamický výzkum a návrh moderních osových ventilátorů
pro energetiku a větrání**

Doc. Ing. Václav Cyrus, DrSc.

**Aerodynamic research and design of advanced axial-flow fans for
power industry and ventilation**

SUMMARY

A procedure for design of advanced axial-flow fans for power industry and ventilation systems is described in submitted paper. Modern 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 codes Fluent and Numeca, have been used in the optimization of designed fan stages geometry. A validation of applied codes results were carried out with the use of own experimental results.

Fourteen 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 were carried out. Special attention was devoted to high pressure fan stages with high flow rates and efficiency. These stages will create a basis for new axial flow fans for modern coal fired blocks in power stations with desulphurization arrangements. The design of new ventilation systems in traffic tunnels, doles and chemical plants requires reverse axial flow fans. Flow reversal is necessary in emergency situations e.g fire. Two reverse stages were designed for such conditions. Flow reversal is carried out by means of rotor blades turning. 3D flow analysis in reverse fan blade rows with the use of both computed and experimental results were carried out.

SOUHRN

V přednášce jsou uvedeny nejdůležitější výsledky aerodynamického výzkumu a návrhu nových osových ventilátorů pro energetiku a větrání získaných autorem za posledních dvacet let. Tyto práce byly prováděny pro největšího českého výrobce ventilátorů -ZVVZ a.s. v Milevsku. Při návrhu byly 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 vlastní původní podklady pro rovinné lopatkové mříže a mříže lopatkových řad stupňů kompresorového typu. Odvozeny závislosti pro výpočet sekundárních ztrát. Byla stanovena kritéria pro vznik rozsáhlého odtržení proudu v lopatkové řadě. V poslední době jsou při stanovení aerodynamických charakteristik ventilátoru užívány komerční programy pro simulaci třírozměrného vazkého stlačitelného proudění (Fluent a Numeca).

Navržené lopatkové stupně v modelovém měřítku byly experimentálně ověřeny na zkušebním zařízení o průměru 600 mm. Pro podrobnější analýzy byly provedeny podrobné sondáže proudění v rovinách lopatkového stupně pětiotvorovými pneumatickými sondami. Celkem bylo navrženo a experimentálně ověřeno 14 základních osových stupňů. Zvláštní pozornost je věnována extrémně zatíženým stupňům s vysokou účinností a hltností. Ty tvoří základ pro konstrukci budoucích ventilátorů pro uhelné elektrárny s odsířením spalin. U nových větracích soustav dopravních tunelů, hlubinných dolů a hal chemických provozů se požaduje reverzace proudu vzduchu při havarijních situacích. Byly navrženy dva stupně, kde reverzace chodu je realizována pomocí natočení rotorových lopatek. Analýza třírozměrného proudu byla uskutečněna jak na základě výsledků sondáže proudu pneumatickými sondami v rovinách stupně tak dat simulace proudění v lopatkových řadách .

Klíčová slova : osový ventilátor, aerodynamický návrh, lopatková mříž,
numerická simulace proudu, měření charakteristik, energetika,
větrání, reverzace

Key words : axial-flow fan, aerodynamic design, blade cascade, numeric flow
simulation, measurement of aerodynamic performance, power
industry ,ventilation, flow reversal

OBSAH

Str.

1. Úvod	6
2. Základní pojmy a definice	6
3. Třírozměrné proudění v lopatkovém stupni	9
4. Návrh osového ventilátorového stupně	10
4.1 Obecný postup návrhu stupně	13
4.2 Návrh geometrie stupně	12
4.3 Volba hlavních veličin stupně při návrhu	13
5. Experimentální ověření navržených stupňů	14
6. Simulace proudění ve ventilátoru	15
7. Nové ventilátorové stupně pro energetiku a větrání	17
7.1 Stupně pro energetiku	17
7.2 Stupně pro větrání	22
8. Aerodynamické vlastnosti celého osového ventilátoru	24
9. Výhled dalších výzkumných prací	25
10. Závěr	26
 Významné realizované projekty	27
Seznam literatury	28
Seznam označení a indexů	30
Životopis autora	31

1. ÚVOD

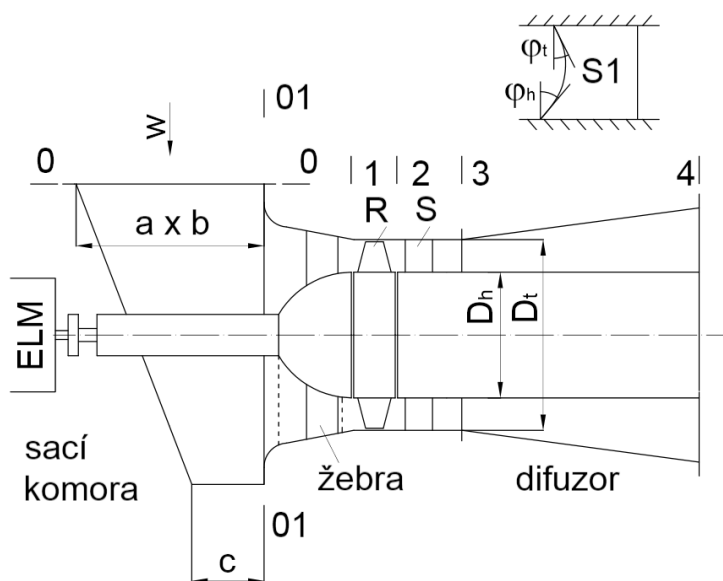
Začátkem 90. let bylo rozhodnuto o postupném odsíření uhelných bloků českých elektráren a velkých tepláren. Pro zabudování odsiřovacího zařízení do kouřového traktu bloků bylo třeba začlenit nové posilovací osově ventilátory. Náš největší výrobce ventilátorů ZVVZ a.s. v Milevsku neměl tyto stroje k dispozici. Rovněž se objevily na trhu požadavky na nové osově ventilátory pro větrání dopravních tunelů a hlubinných dolů. V odborné literatuře bylo možné nalézt pouze neúplné podklady pro návrh vysokotlakých osových ventilátorových stupňů získaných na universitě v Braunschweigu /1/, /2/. Nevýhodou těchto stupňů byla relativně nízká účinnost (82 – 86)%.

Proto byly v AHT Energetika s.r.o. zahájeny teoretické a experimentální práce zaměřené na aerodynamický výzkum a návrh moderních osových ventilátorů pod vedením autora předložené publikace. Při tom se vyšlo z podkladů pro osově kompresory jednak z literatury např. /3/, /6/ a jednak z dat, jež byla získána autorem v letech 1985 až 1994 v SVÚSS, v Praze – Běchovicích pro podnik ČKD Kompresory a.s. Poznatky jsou obsaženy např. v publikacích /4/, /5/, /8/, /10/ a /15/. V literatuře lze na ně nalézt odkazy v pracích např. /3/, /21/ až /25/. V letech 1992 až 2010 bylo postupně navrženo a experimentálně ověřeno 14 osových ventilátorových stupňů. Ty byly v podniku ZVVZ a.s. použity při stavbě nových ventilátorů. Tři desítky jedno a dvoustupňových strojů o průměru 2 až 4 m pracuje na uhelných elektrárnách doma a v zahraničí. Další přibližně dvě stovky ventilátorů jsou nainstalovány ve ventilačních systémech dopravních tunelů a letištních hal.

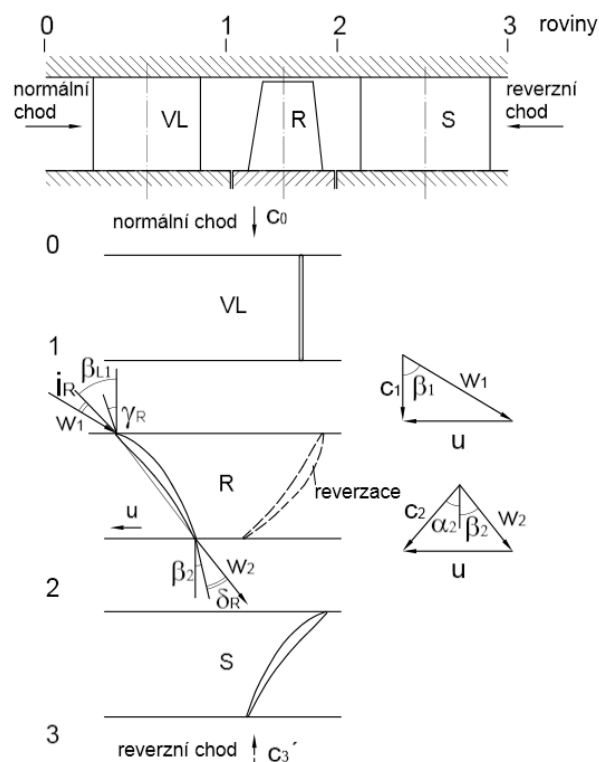
Cílem přednášky je shrnutí nejvýznamnějších poznatků získaných při aerodynamickém výzkumu a návrhu moderních osových ventilátorových stupňů pod vedením autora předložené publikace. Nejprve budou uvedeny nejdůležitější poznatky o třírozměrném proudění v lopatkových řadách stroje včetně vzniku větších oblastí odtrženého proudu. Dále bude popsána metodika návrhu moderního stupně osového ventilátoru včetně jeho experimentálního ověření na zkušební trati o průměru 600 mm. Velký důraz je kladen na nejnovější výpočtové postupy, jež používají numerickou simulaci vazkého proudění. V závěru jsou uvedeny poznatky o aerodynamice reverzních osových ventilátorů, jež se používají především pro větrání dopravních tunelů a hlubinných dolů.

2. ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

Typický axiální ventilátor pro energetiku se skládá ze vstupní sací komory, jednoho nebo dvou osových lopatkových stupňů a difuzoru (obr.1). Stupeň je vytvořen z rotorové (R) a statorové lopatkové řady (S). Schéma lopatkového



Obr.1 Osový ventilátor



Obr.2 Schéma osového stupně

stupně na středním poloměru je na obr.2. Jsou zde znázorněny rychlostní trojúhelníky, definice lopatkových úhlů a aerodynamických vlastností mříží (úhel náběhu i a deviace proudu δ). Vektory vstupní rychlosti stupně jsou zakresleny pro normální a reverzní chod. Průtok plynu je většinou regulován natáčením rotorových lopatek. Také se při regulaci používá přestavení vstupních statorových lopatek. U menších strojů se někdy změna hodnoty otáček elektromotoru realizuje pomocí frekvenčního měniče. Příklad pole pracovních charakteristik ventilátoru pro energetiku o průměru 4,2 m je na obr.3. Jednotlivé křivky odpovídají určitým hodnotám přestavení rotorových lopatek $\Delta\gamma_R$. Rovněž jsou zakresleny kontury konstantních hodnot účinnosti. Návrháři kotlů pro spalování uhlí obvykle předepisují několik provozních bodů: např. M, N, BMCR a D. Zkratka N označuje jmenovitý provozní bod. Nejvyšší hodnoty účinnosti celého ventilátoru mají být v bodě N – $\eta_v > 81-83\%$. Podobně je zadáno několik provozních bodů u ventilátorů pro větrání. V popisu aerodynamických vlastností ventilátoru se používají bezrozměrné veličiny: průtokový součinitel ϕ , tlakový součinitel ψ a účinnost η . Jejich definice jsou uvedeny v seznamu označení.

Ventilátory mají obvykle návrhové hodnoty průtokového součinitele v rozsahu $\phi_N = 0,3$ až $0,6$. Tlakový součinitel se pohybuje v rozsahu $\psi_N = 0,35$ až $1,0$

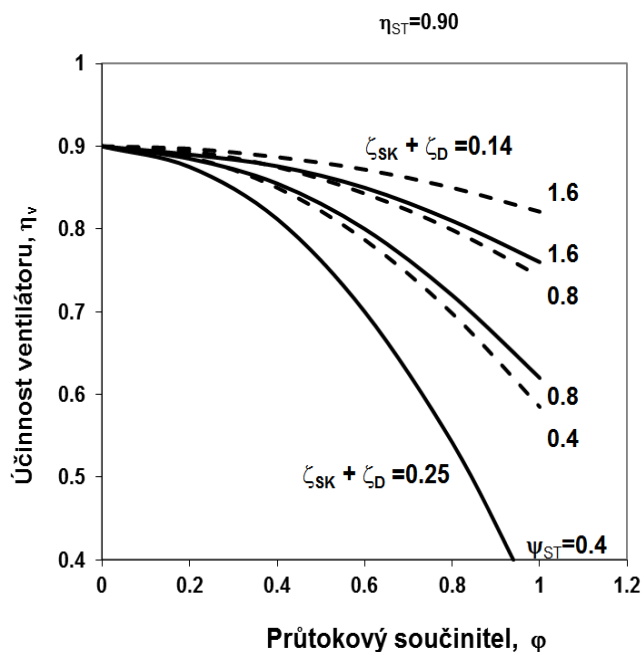
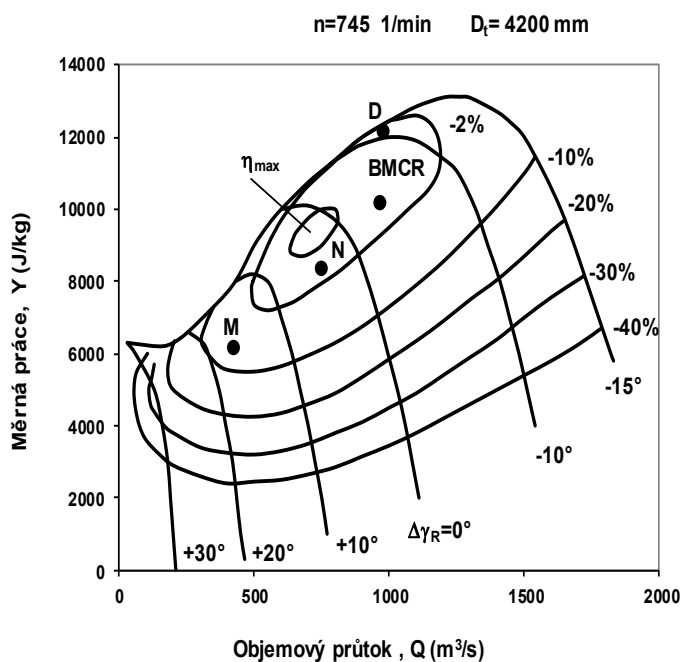
resp. 0,15 až 0,35 u strojů pro energetiku resp. pro klasické větrání tunelů a hal. U podélné ventilace dopravních tunelů se používají proudové ventilátory. Jejich lopatkování má přibližně hodnotu tlakového součinitele $\psi_N = 0,1$ až $0,2$.

Parametry ventilátoru jsou zadány většinou pro celý stroj – lopatkový stupeň, vstupní sací komoru a difuzor (obr.1). V práci / 13 / autor odvodil jednoduché vztahy pro vazbu účinnosti η_v a tlakového součinitele ψ_v celého stroje a lopatkového stupně η_{ST} , ψ_{ST} . Jsou ve tvaru :

$$\eta_v / \eta_{ST} = 1 - (\zeta_{SK} + \zeta_D) x, \quad (1)$$

$$\psi_v / \psi_{ST} = 1 - (\zeta_{SK} + \zeta_D) x, \quad (2)$$

$$x = \varphi^2 / \psi_{ST} \quad (3)$$



Obr.3 Pole charakteristik ventilátoru

Obr.4 Závislost účinnosti ventilátoru a stupně na průtokovém součiniteli

Vztahy byly sestaveny pro jednorozměrné proudění strojem. Proudění ve vstupní a výstupní rovině stupně je osové. Na obr.4 jsou vyneseny křivky poměrné účinnosti η_v / η_{ST} určené podle vztahu (1). Platí pro charakteristický případ energetického ventilátoru, kde součet ztrátových součinitelů vstupní sací komory a difuzoru je $(\zeta_{SK} + \zeta_D) = 0,25$ a $0,14$ a účinnost stupně $\eta_{ST} = 0,90$. Je zřejmé, že nejvyšší hodnoty účinnosti celého ventilátoru η_v lze dosáhnout při

menší hodnotě průtokového součinitele φ . V obr.4 je ukázáno, že energetické ztráty vstupní komory a difuzoru výrazně ovlivňují účinnost stroje.

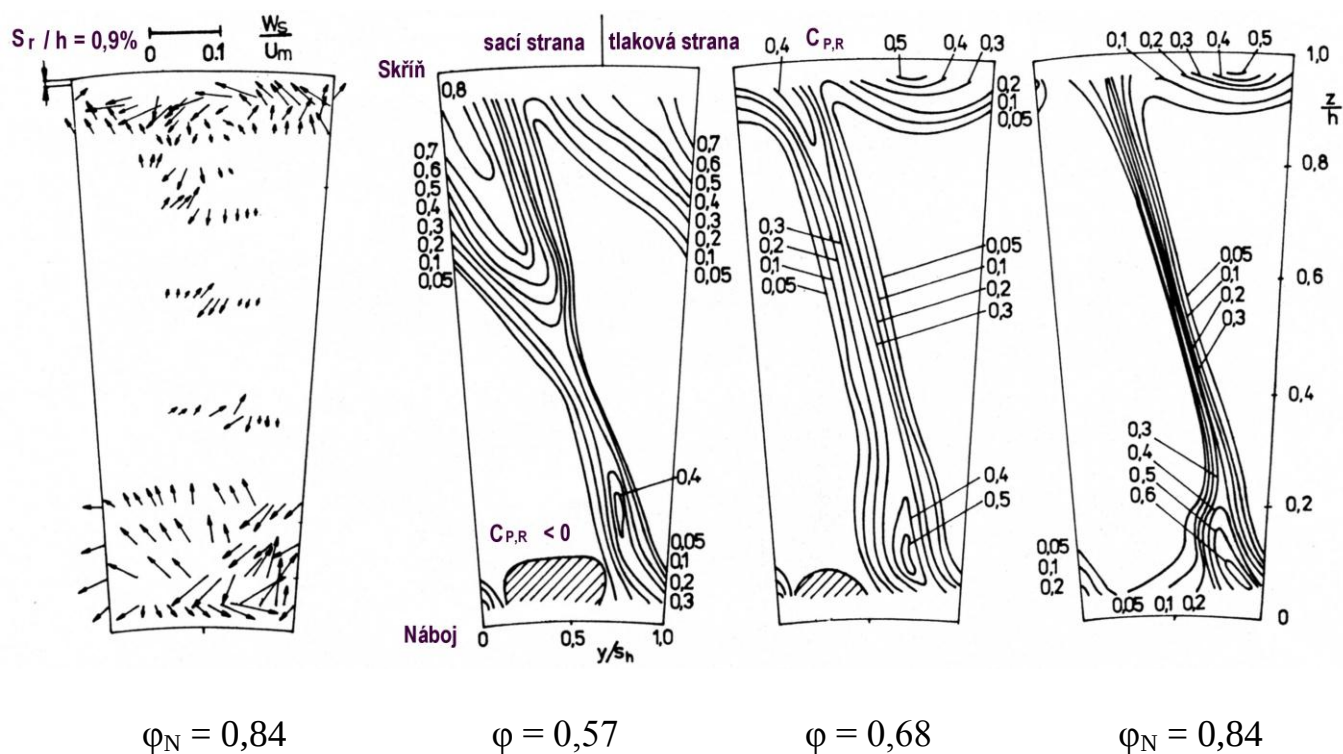
3. TŘÍROZMĚRNÉ PROUDĚNÍ V LOPATKOVÉM STUPNI

Třírozměrné proudění v lopatkových řadách bylo vyšetřováno v modelových osových kompresorových stupních při užití jak stojících tak rotujících prostorových tlakových sond. Bylo měřeno na dvou zkušebních tratích o průměru stupně 600 mm a 800mm v období 1980-1990. Ty byly umístěny na zkušebně v SVÚSS /5/.

Některé výsledky měření na prvně jmenovaném stupni s nábojovým poměrem $v = 0,67$ a štíhlostí lopatek $AR = 2,0$ jsou znázorněny na obr.5. Zde jsou zakreslena rozložení tlakového součinitele $C_{p,R}$ a vektorů rychlosti sekundárního proudění w_s/u_m v rovině za rotorovou řadou stupně pro návrhový bod s průtokovým součinitelem $\varphi_N = 0,84$. U skříně je patrná oblast vířivého proudění způsobená přetékáním tekutiny radiální mezerou a relativním pohybem stěny vzhledem ke konci rotorové lopatky. Vyvíjející se sekundární proudění kanálového víru způsobuje transport nízkoenergetické tekutiny u náboje směrem do koutu tvořeném podtlakovou stranou lopatky a omezující stěnou. Zde dochází ke kumulaci nízkoenergetické tekutiny a k odtržení proudu. Odstředivá síla způsobuje radiální pohyb nízkoenergetické tekutiny v koutu směrem ke skříně. V úplavu je zřejmé radiální proudění mající původ v gradientu cirkulace rychlosti lopatky podél výšky kanálu. Je patrné, že oblasti sekundárního proudění jsou u obou omezujících stěn. Uprostřed kanálu lze proudění považovat za blízké proudění rovinnými lopatkovými mřížemi. Při snižování hodnoty průtoku dochází k růstu oblasti odtržení proudu na podtlakové straně lopatky a ke zvětšení šířky úplavu ($\varphi = 0,68$). V blízkosti meze stability stupně ($\varphi = 0,57$) se objevila velká oblast třírozměrného odtržení v horní polovině kanálu, jak ukazují kontury součinitele $C_{p,R}$. Podobný mechanismus proudění je i ve satorové řadě, jak lze najít v publikacích autora např. /4/ a /5/. Z obr.5 je patrné, že sekundární proudění u obou omezujících stěn způsobují vyšší hodnoty energetických ztrát proudu, než jsou ve střední části mezilopatkového kanálu.

Na druhém zkušebním zařízení o průměru 800 mm byly měřeny tři varianty zadního stupně kompresoru /4/, /5/, /10/. Štíhlost lopatek byla v rozsahu hodnot $AR = 0,75$ až $1,25$. Nábojový poměr stupňů byl $0,87$. Z výsledků experimentů vyplynulo, že rozdíl maximálních hodnot účinnosti stupně s nejvyšší a nejnižší hodnotou štíhlosti účinnosti byl v rozmezí $\Delta\eta = 1,5$ až $2,2$ %. Mechanismus 3D proudění v jednotlivých lopatkových řadách byl velmi podobný jako v předchozím případě stupně o průměru 600 mm s vyšší štíhlostí lopatek (obr.5). V zahraničních publikacích jsou odkazy na práce autora z oblasti 3D proudění v osovém stupni, např. /3/, /22/, /23/ a /25/.

Z výsledků měření autora této publikace vyplývá, že větší oblast odtržení v lopatkové řadě vzniká, jestliže hodnota difuzního faktoru DF , překračuje kritickou hodnotu $DF = 0,60$ v oblasti kanálu větší než $z/h = 0,25$ u jedné omezující stěny, např. / 5/, /12/.



Obr.5 Rozložení sekundárních rychlostí w_s / u_m a tlakového součinitele $C_{p,R}$ rotorové řady

4. NÁVRH OSOVÉHO VENTILÁTOROVÉHO STUPNĚ

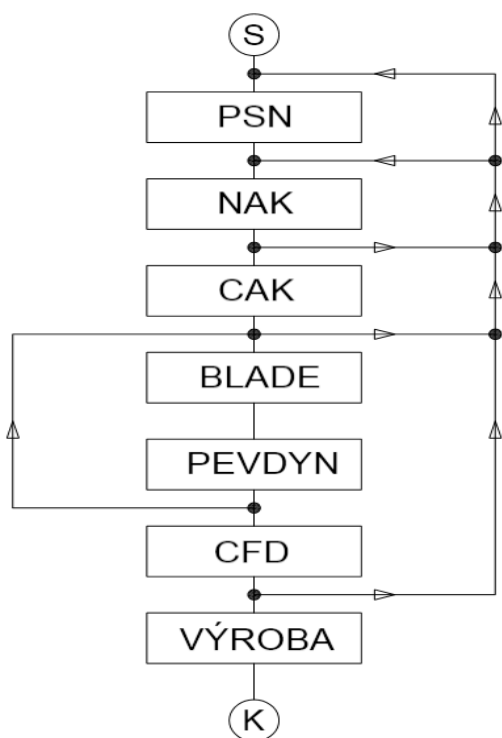
4.1 Obecný postup návrhu osového stupně

Moderní osové stupně kompresorového typu se v současné době navrhují v iteračním cyklu podle blokového schématu znázorněného na obr.6. Nejprve se stanoví základní geometrické rozměry stupně a hlavní aerodynamické veličiny (vnější průměr, nábojový poměr, počty lopatek, délka tělvy profilu lopatek, otáčky, průtokový součinitel atd.) na základě jednorozměrného výpočtu při užití vztahů, platných v mechanice tekutin a termodynamice. Při tom se vychází ze zadaných parametrů jako jsou např.: hmotnostní průtok plynu, přírůstek celkového tlaku, hustota plynu, vlastností materiálu lopatek. Tyto výpočty se provádějí v programu PSN.

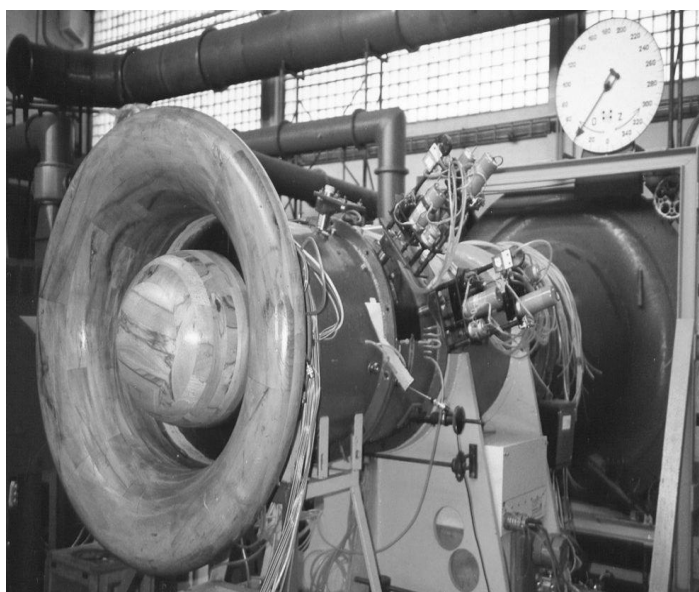
Geometrie rotorové a statorové lopatky se určí pomocí programu NAK. Při návrhu se řeší osově souměrné proudění v průtočném kanále jako stlačitelné a

nevazké. Vliv vazkosti plynu se uvažuje ve výpočtu tím, že se určuje výstupní úhel proudu a energetické ztráty proudu v mřížích lopatkových řad podél poloměru z poloempirických nebo empirických závislostí .

V dalším kroku návrhu se provádí v programu BLADE matematický popis lopatkových ploch. Dále se realizuje pevnostní a dynamická kontrola lopatek (blok PEVDYN). Aplikují se metody konečných prvků, které byly vyvinuty ve SVÚSS /7/.



Obr.6 Blokové schéma návrhu osového stupně



Obr.7 Experimentální zařízení 600 mm

Při znalosti tvaru lopatek je možné pak stanovit pracovní charakteristiku stupně pomocí programu řešícího simulaci proudění (CFD). Souřadnice lopatek poskytuje program BLADE. Zpracováním výsledků simulace proudu lze získat nejen hlavní výkonové veličiny stupně v návrhovém bodě ale i v celém jeho pracovním rozsahu. Je možné na základě analýzy výsledků odhalit větší oblasti odtržení v průtokových kanálech stroje a tím i příčiny nízké účinnosti navržené varianty stupně. Ve firmě AHT Energetika se v současnosti používá komerční program NUMECA. Před cca 5-7 lety se ještě používal program CAK. Zde se vychází ze stejného matematického modelu proudění jako v programu NAK. Využívalo se však podkladů pro široký pracovní rozsah mříží lopatkových řad s respektováním sekundárního proudění /5/.

V obr.6 jsou v blokovém schématu uvedeny různé cesty, pomocí nichž se realizuje 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 resp. do PSN.

Nově navržený lopatkový stupeň je nutné experimentálně ověřit. Stupeň se vyrobí obvykle v modelovém měřítku. Měří se charakteristiky stupně v širokém provozním stavu při přestavení buď rotorových či vstupních lopatek. Nejdůležitějším kritériem úspěšnosti návrhu je dosažení předepsané hodnoty přírůstku celkového tlaku a účinnosti.

4.2 Návrh geometrie lopatek 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.8). Výpočtové roviny se při návrhu umísťují vně lopatkových řad turbostroje. Kvaziortogonálou nazýváme přímku ležící ve výpočtové rovině a svírající úhel ψ s radiálou. Základní rovnice mají tvar:

a) rovnice radiální rovnováhy – rovnice (4)

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

b) rovnice kontinuity

$$m = 2\pi \int_s \rho r w_m \cos(\psi + \Phi) ds, \quad (5)$$

c) energetická rovnice

$$\Delta H = \omega(r_2 w_{u2} - r_1 w_{u1}), \quad (6)$$

d) rovnice stavu

$$p = \rho RT. \quad (7)$$

Při řešení soustavy rovnic se určuje změna entropie S v lopatkové řadě a úhel proudu α 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. Je použita metoda řešení, jež uvažuje sklon a křivost průmětu proudnice k_m do meridiální roviny. V anglické literatuře se tato metoda označuje jako „streamline curvature method“ např./2/. Veličiny proudu jsou řešeny podél kvaziortogonály v jejich průsečících s proudnicemi. Celý návrhový výpočet probíhá v řadě iteračních

cyklů metodou postupných aproximací. Návrhy lopatkových stupňů byly realizovány na 11 proudnicích. Krajní proudnice byly vzdáleny od náboje a skříňe o hodnoty pošinovacích tloušťek mezní vrstvy δ_h^* , δ_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/. Návrhové hodnoty úhlu náběhu i_N a deviace proudu δ_N mříží lopatkových řad se stanovují podle metody Liebleina /6/ sestavené pro rovinné mříže. Definice těchto veličin je v obr.2. V modelu proudění se při určení hodnoty ztrátového součinitele ζ_N po poloměru respektuje vliv sekundárního proudění. Platí rovnice

$$\zeta_N = \zeta_{2D} + \zeta_{3D} . \quad (8)$$

Ztrátový součinitel ζ_{2D} se počítá podle korelačních závislostí pro rovinné mříže. Liebleinova návrhová metoda pro určení vlastností mříží je použita z toho důvodu, že byla sestavena na podkladě rozsáhlého souboru experimentálních dat pro rovinné mříže s profilem NACA 65.série a britské série C4. Tyto profily se používají při konstrukci lopatek ventilátorů. Vliv sekundárního proudění při návrhovém výpočtu byl respektován dvojím způsobem. U metody A byly sekundární ztráty rozloženy rovnoměrně podél výšky kanálu (obr.8), zatímco u metody B se rozložení ztrátového součinitele po poloměru blížilo reálnému. Lopatky navržené dle těchto metod se liší svým tvarem u stěn kanálu. Sekundární ztrátový součinitel ζ_{3D} se určuje zvlášť pro náboj a skříň v závislosti na tom, zda existuje radiální mezera mezi omezující stěnou a koncem lopatky. Touto problematikou se podrobně zabývaly práce autora /5/, /8/ a /9/. Hodnota sekundárního ztrátového součinitele ζ_{3D} je svázána s celkovým sekundárním ztrátovým součinitelem $\tilde{\zeta}_{3D}$ závislostí

$$\tilde{\zeta}_{3D} h = \int_0^{0.5h} \zeta_{3D} dz + \int_{0.5h}^h \zeta_{3D} dz = 0.5h(\tilde{\zeta}_{3D,h} + \tilde{\zeta}_{3D,t}) . \quad (9)$$

Soustava dvou impulsových rovnic třírozměrné mezní vrstvy byla doplněna dvěma původními rovnicemi navrženými autorem / 5/ , jež vyjadřují závislost impulsových tloušťek mezní vrstvy a nerovnoměrného rozložení složek lopatkové síly v mezní vrstvě v osovém a obvodovém směru.

4.3 Volba hlavních veličin stupně při návrhu

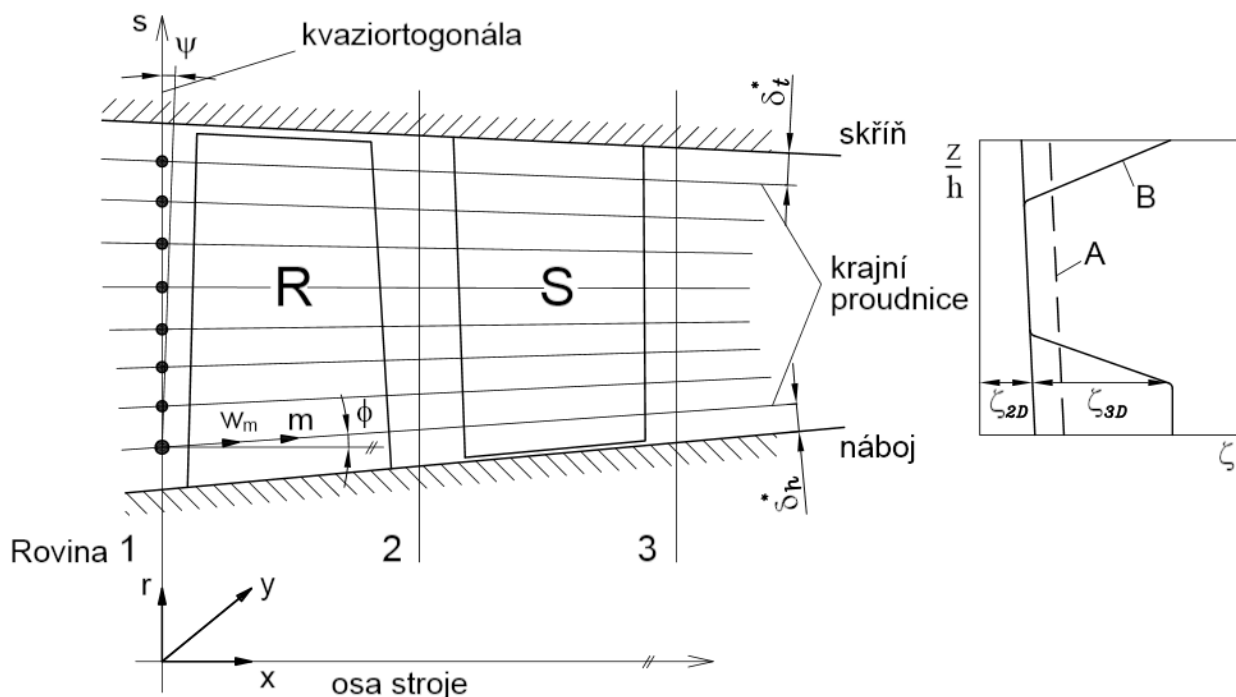
O úspěšnosti návrhu osového stupně se rozhoduje již při volbě hlavních parametrů stupně v programu PSN a NAK. V dalším textu postupně uvedeme komentář k některým volbám:

- a) Lopatkové profily. V AHT Energetika se používají převážně profily NACA 65.série se zesílenou odtokovou hranou. Střední čára profilu je kruhová.
- b) Štíhlost lopatek. Definice: $AR = h/c$ (h - výška lopatky, c – tětíva profilu lopatky). Na základě výzkumu /4/, /5/ a /10/, o němž je zmíněno v kapitole č.4, se ukázalo, že je možné volit i nízké hodnoty štíhlosti : $AR = 0,7$ až $1,0$, aniž by došlo k výraznějšímu poklesu účinnosti stupně.
- c) Nábojový poměr. Volí se obvykle v rozsahu $v = 0,45$ až $0,75$.
- d) Počet lopatek. U rotorové řady je počet lopatek omezen hodnotou nábojového poměru z důvodu umístění mechanismu, jež natáčí rotorové lopatky v náboji stroje. Pro nábojový poměr $v = 0,5$ resp. $0,7$ lze použít maximálně $z = 18$ resp. 24 lopatek. U statorové řady je počet lopatek neomezen. Většinou je snaha, aby hustota mříže u náboje nepřesáhla hodnotu $\sigma = c/s = 3,0$.
- e) Poměr počtu rotorových a statorových lopatek je třeba volit s ohledem na minimalizaci sirénového hluku.
- f) Rozložení práce předané plynu po poloměru. Většinou se volí konstantní rozložení. Pouze v případě aerodynamického odlehčení mříží zvláště u náboje rotorové řady se provádí přerozdělení práce. Maximálně 6 – 8%.
- g) Aerodynamické zatížení mříží lopatkové řady. Jako kritérium se používá difuzní faktor DF /6/. U rotorové resp. statorové řady by neměla být hodnota difuzního faktoru mříže větší než : $DF_{R,max} = 0,60$ resp. $DF_{S,max} = 0,54 - 0,56$, jak plyne např. z prací /5/, /9/ a /12/. Toto rozmezí bylo navrženo až po odzkoušení návrhu ventilátorových stupňů 1.generace - viz následující odstavec.
- h) Rozložení sekundárních ztrát po poloměru. Ukázalo se, že aplikace rozdílných metod A a B (obr.8) nemá významný vliv na účinnost stupně /9/.

5. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NAVRŽENÝCH STUPŇŮ

Autor se svým týmem prováděl experimentální ověření nových stupňů na zkušební trati o vnějším průměru 600 mm. Ta je znázorněna na obr.7. 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 statoru. Tato veličina je zapotřebí pro spolehlivé určení účinnosti. Lopatky byly vyráběny z duralové slitiny v technologickém centru ZVVZ a.s. V rovinách stupně č.1, 2 a 3 (obr.1) se ve většině případů provádí sondáž proudu pětioťvorovými 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.

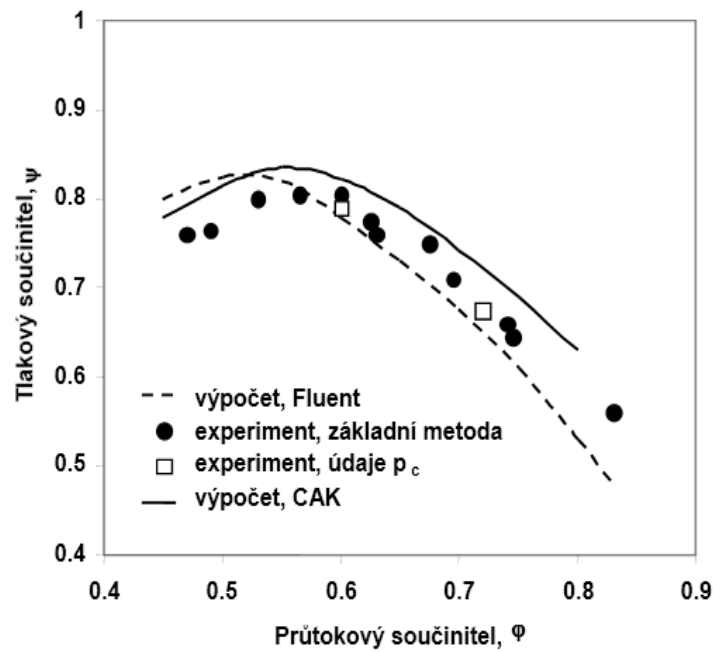
Z výsledků sondáže proudu se nejprve středícím postupem, popsaným např. v /9/, /11/ stanoví střední hodnoty veličin v obvodovém směru. S jejich využitím se pak vyhodnotí průběhy ztrátového součinitele ζ , deviace proudu δ , a úhlu náběhu i a difuzního faktoru DF mříží obou lopatkových řad po poloměru. Z porovnání změřených a návrhových průběhů lze pak posoudit příčiny splnění či nesplnění návrhových předpokladů.



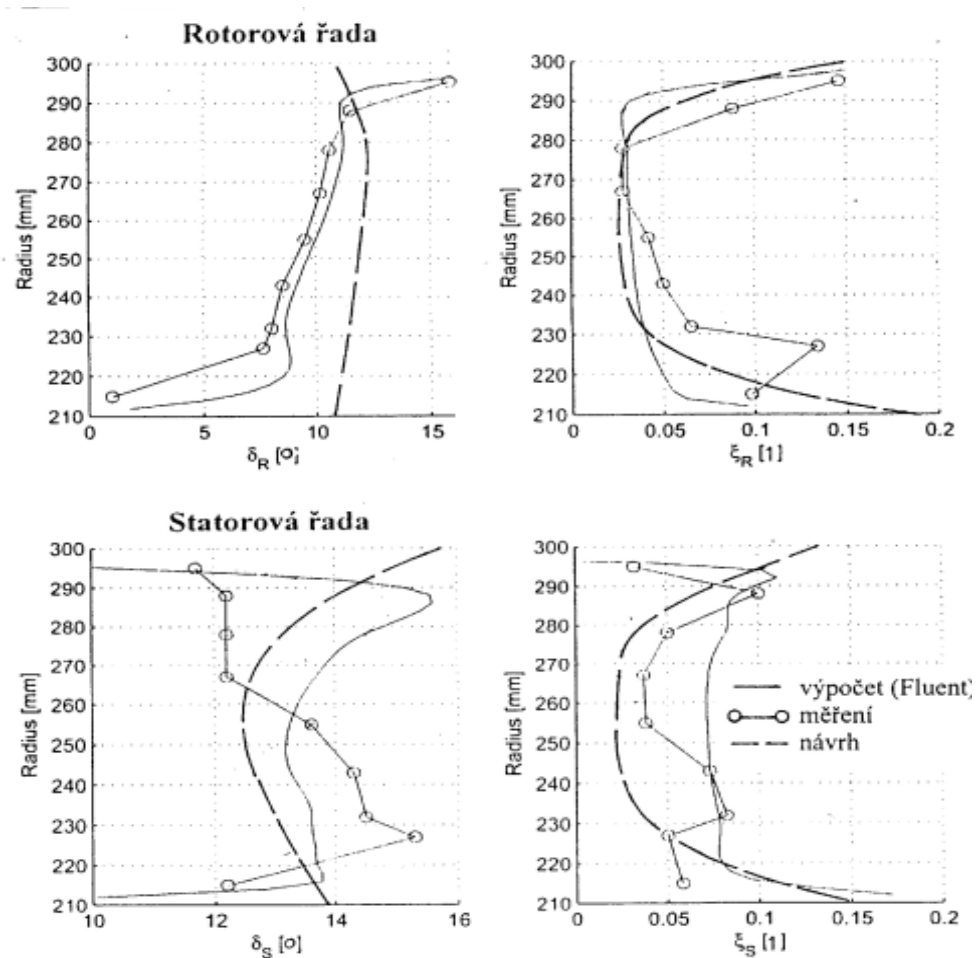
Obr.8 Výpočet osově souměrného proudu

6. SIMULACE PROUDĚNÍ VE VENTILÁTOROVÉM STUPNI

V době, kdy probíhaly návrhové práce na stupních V1, V2 a V3, 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 během návrhu lopatkových strojů. Autor habilitační práce spolupracuje v této oblasti se ZČU v Plzni např. /16/, /19/. V posledních dvou letech je ve firmě AHT Energetika používán specializovaný komerční program pro výpočty lopatkových strojů: NUMECA. Matematický model proudění obou programů je založen na systému Navier-Stokesových rovnic pro turbulentní stacionární 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.



Obr.9 Porovnání změřených a vypočtených charakteristik stupně V1



Obr.10 Porovnání vlastností mříží rotorové a statorové řady stupně V1 v návrhovém bodě $\varphi = 0,84$

K urychlení konvergence je použita multigradní metoda. Standardní prostorová síť vytvořená z mnohostěnů 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 programů. Ověření programu bylo provedeno při podrobném porovnání výsledků simulace proudu s experimentálními. Porovnání experimentálních, návrhových a vypočtených aerodynamických vlastností mříží rotorové a statorové řady bylo provedeno u stupně V1. Byly zkoušeny různé modely turbulence (např. RMS, RNG, Spalart-Allmaras, SST apod.) a různé počty a struktury buněk /16/, /18/, /19/ a /20/ . V poslední době jsou užívány dva posledně jmenované modely. Na základě rozboru a ve shodě s většinou autorů publikací zabývajících se simulací proudu v lopatkových stupních bylo použito (1–2) miliony výpočtových buněk. Konvergence výpočtu je posuzována podle velikosti zbytkového residua (menší než 10^{-6}) a průběhu účinnosti počítaného stupně na počtu iterací (maximální rozsah pásma hodnot $\pm 0,1\%$ ke konci řešení).

7. NAVRŽENÉ VENTILÁTOROVÉ STUPNĚ PRO ENERGETIKU A VĚTRÁNÍ

Všechny navržené osově lopatkové stupně byly určeny pro českou firmu ZVVZ a.s. v Milevsku. Mají osově proudění ve vstupní a výstupní rovině. Machovo číslo vstupního proudu obou lopatkových řad je menší než 0,3. Návrhové hodnoty průtokového součinitele φ_N byly ve dvou oblastech: $\varphi_N = 0,35 - 0,4$ a $\varphi_N = 0,60 - 0,65$, aby bylo možno splnit různá zadání ventilátorů. Přehled nově navržených stupňů pro uhelnou energetiku resp. větrání je v Tabulce č.1 resp. č.2. Je možné si všimnout, že štíhlost rotorových a statorových lopatek je relativně nízká: $AR = 0,80$ až $1,36$. Stupně V6 resp. V9, V10, V16, V17 a V18 byly navrženy a experimentálně ověřeny za prostředky grantových projektů GAČR resp. MPO. V zahraniční literatuře jsou nejvíce citovány práce týkajícího se popisu mechanismu 3D proudění v osovém stupni kompresoru a ventilátoru, např. /4/, /9/, /11/, /15/ . Jedná se o odkazy např. v publikacích /23/, /24/, /25/.

V dalším textu bude uveden podrobnější popis dosažených výsledků experimentu a simulace proudu u vybraných stupňů včetně závěrů a doporučení.

7.1 Stupně pro energetiku

Ventilátorové stupně 1.generace. Pro energetiku byly postupně v letech 1993 až 1996 navrženy 3 nové vysokotlaké ventilátorové stupně tzv. 1. generace s

Tabulka č.1 Ventilátorové stupně pro energetiku

	v	φ_N	Ψ_N	Rotorová řada			Statorová řada		
				z	DF_{max}	AR	z	DF_{max}	AR
V1	0,70	0,60	0,72	24	0,54	0,78	25	0,50	1,0
V2		0,65	0,94	24	0,54	0,78	25	0,50	1,0
V3		0,40	0,73	24	0,66	0,78	25	0,66	1,0
V6		0,60	0,95	24	0,58	0,80	38	0,54	0,98
V7	0,60	0,60	0,60	18	0,50	1,3	23	0,45	1,33
V9		0,60	0,83	22	0,55	1,07	31	0,54	1,26
V10		0,35	0,46	22	0,58	1,26	31	0,54	1,30
V18	0,50	0,40	0,42	18	0,55	1,67	23	0,45	1,36

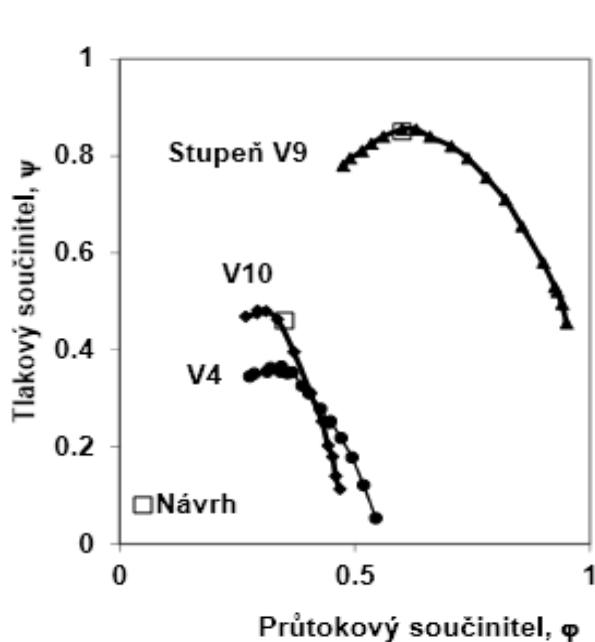
Tabulka č.2 Ventilátorové stupně pro větrání

	v	φ_N	Ψ_N	Rotorová řada			Statorová řada		
				z	DF_{max}	AR	z	DF_{max}	AR
V4	0,55	0,40	0,30	12	0,50	1,46	15	0,42	1,5
V5		0,57	0,30	9	0,48	0,19	13	0,28	1,35
V16	0,62	0,35	0,32	12	0,50	1,35	15	0,40	1,0
V17		0,35	0,42	16	0,57	1,35	17	0,50	0,89
RAV1	0,54	0,49	0,13	6	+	1,66	7	+	1,0
RAV2	0,40	0,43	0,18	9	+	1,56	7	+	1,0

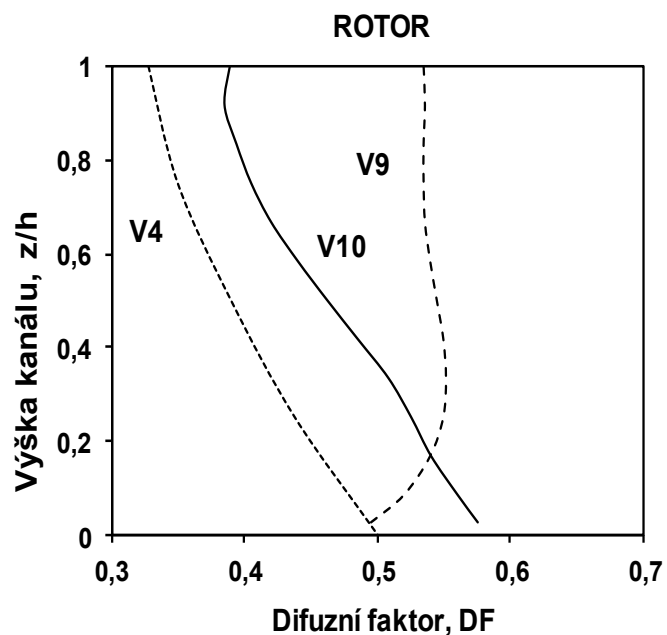
+ u přímého eliptického profilu nelze vyčíslit

označením V1, V2 a V3 /9/. Stupně měly hodnotu nábojového poměru $v = 0,7$. Mají maximální hodnoty difuzního faktoru DF_{max} lopatkových mříží nižší než $DF = 0,54$. To je v souladu s doporučením v odstavci 4.3. Výjimku tvoří stupeň V3, kde v důsledku překročení doporučovaných hodnot na $DF_{max} = 0,66$ poklesla maximální účinnost stupně na hodnotu $\eta_{max} = 86\%$ v porovnání s ostatními stupni. Ty mají hodnotu η_{max} v rozmezí $\eta_{max} = 89,5$ až $90,8 \%$. Ukázalo se, že aerodynamické zatížení mříží rotorové řady může být vyšší než u statorové řady /9/, /12/. Uplatňuje se zde zřejmě příznivý vliv odstředivé síly. Ta odstředí nízkoenergetickou tekutinu z oblasti koutu na náboji stroje (viz obr.5). Platí: $DF_{max,R} < 0,60$, $DF_{max,S} < 0,54 - 0,56$.

Na obr.9 jsou porovnány změřené a vypočtené závislosti tlakového součinitele ψ na průtokovém součiniteli φ u stupně V1. Výpočet bodů součinitele ψ byl realizován s pomocí výsledků simulace proudu dle programu Fluent (spolupráce



Obr. 11 Charakteristiky stupňů



Obr.12 Difuzní faktor po výšce kanálu
- návrh

se ZČU Plzeň). Byl užit model turbulence RNG k- ϵ . Lze pozorovat velmi dobrý souhlas v okolí návrhového bodu stupně $\phi = 0,60$. Menší rozdíly lze pozorovat při malých průtocích. 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 obr.9. U lopatkování V1 byla experimentálně zjištěna hodnota účinnosti o 1% vyšší než vycházela při návrhovém výpočtu. Chyba stanovení účinnosti byla určena z teorie chyb. Má hodnotu $\kappa_\eta = 0.9 \%$. U stupně V1 byla provedena rozsáhlá experimentální studie možností regulace průtoku plynu pomocí změny nastavení rotorových a satorových lopatek [11]. Byly provedeny i sondáže proudu v rovinách stupně s cílem stanovit aerodynamické vlastnosti mříží rotorové a satorové řady při mimonávrhových stavech.

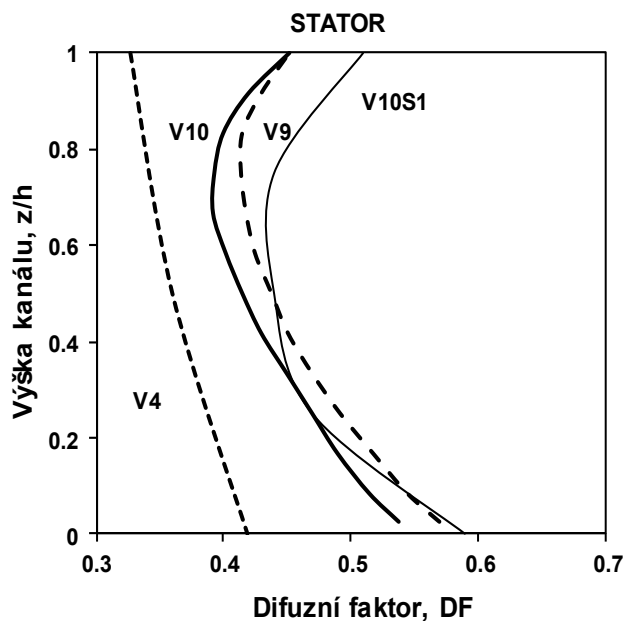
Porovnání vypočtených (plná čára) a experimentálních průběhů aerodynamických vlastností lopatkových mříží rotorové a satorové řady stupně v návrhovém bodě je na obr.10. Jedná se o deviace proudu δ a ztrátový součinitel ζ . Změřené průběhy ukazují vliv sekundárního proudění u omezujících stěn. Jsou uvedeny i čárkované křivky určené návrhovým programem NAK. Z obrázku plyne, že návrhové hodnoty deviace proudu rotorové řady jsou vyšší než naměřené podél celé výšky průtočného kanálu. Na základě tohoto závěru bylo nutné zpřesnit závislosti pro určení deviace proudu.

Při návrhu stupňů 2. generace toto doporučení bylo realizováno. Z porovnání je patrné, že v případě rotorové řady návrhový průběh ztrátového součinitele celkem dobře souhlasí se změřeným včetně blízkosti omezujících stěn. U satorové 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, jak plyne z práce autora /4/. Při porovnávání experimentálních a vypočtených průběhů je třeba uvažovat chyby měření.

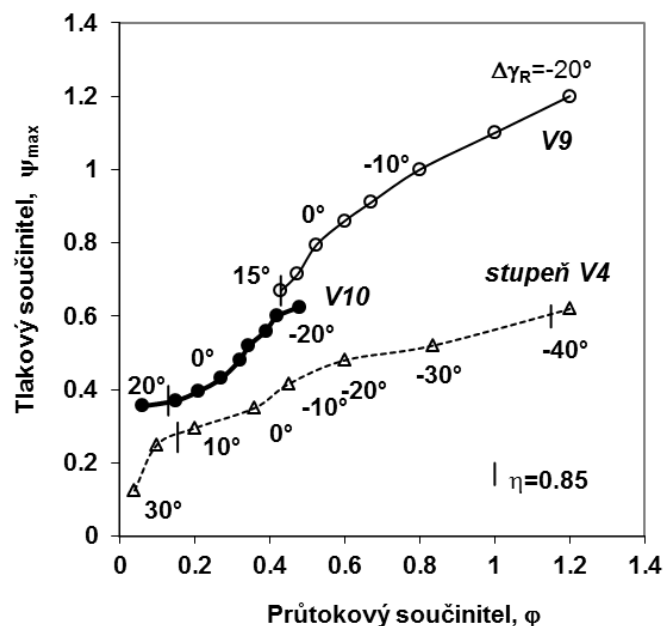
Ventilátorové stupně 2. generace. Při rekonstrukci uhelných bloků elektráren se objevil požadavek na zvýšení hltnosti a přírůstku tlaku ventilátorových stupňů. Proto byly navrženy stupně s nižší hodnotou nábojového poměru $v = 0,6$. Hranici možného zvýšení tlakového součinitele stupně za podmínky zachování maximální hodnoty účinnosti $\eta_{\max} = 89-90\%$ ukazují nové stupně 2. generace s označením V9 a V10. Dále byl navržen extrémně aerodynamicky zatížený stupeň stupeň V6 /16/ s nábojovým poměrem 0,70.

Na obr.11 jsou porovnány experimentální závislosti tlakového ψ a průtokového součinitele ϕ ventilátorových stupňů V9, V10 a V4 pro základní nastavení rotorových lopatek. Jsou také vyznačeny návrhové body. Bylo zjištěno, že nové stupně V9 resp. V10 dosahují požadovaných hodnot maximální účinnosti $\eta_{\max} = 90,2$ resp. $90,5\%$. Rozložení difuzního faktoru rotorových a satorových řad stupňů V9, V10 a V4 po poloměru jsou porovnána na obr. 12 a 13. Stupeň V4 představuje klasický stupeň ventilátorů pro uhelnou energetiku vyráběných cca před 10 lety některými renomovanými zahraničními firmami. Z obrázků je zřejmé, že nové stupně mají vysoké aerodynamické zatížení mříží obou řad. Je však podkritické ve smyslu doporučení v odstavci 4.3.

Na obr.14 jsou znázorněny experimentální křivky maximálních hodnot tlakového součinitele $\psi_{\max}$ pro jednotlivá přestavení rotorových lopatek $\Delta\gamma_R$ na průtokovém součiniteli ϕ pro vysokotlaké stupně V9 a V10. Ty tvoří dosažitelnou hranici součinitele ψ při zachování vysoké hodnoty účinnosti stupně 90%. Dále je znázorněna křivka platná pro středně zatížený stupeň V4. Ten má velmi široký provozní rozsah průtoku v důsledku menšího aerodynamického zatížení mříží v porovnání se stupni V9 a V10 – viz Tabulka č.1 a 2.



Obr.13 Difuzní faktor statorové řady po výšce kanálu - návrh

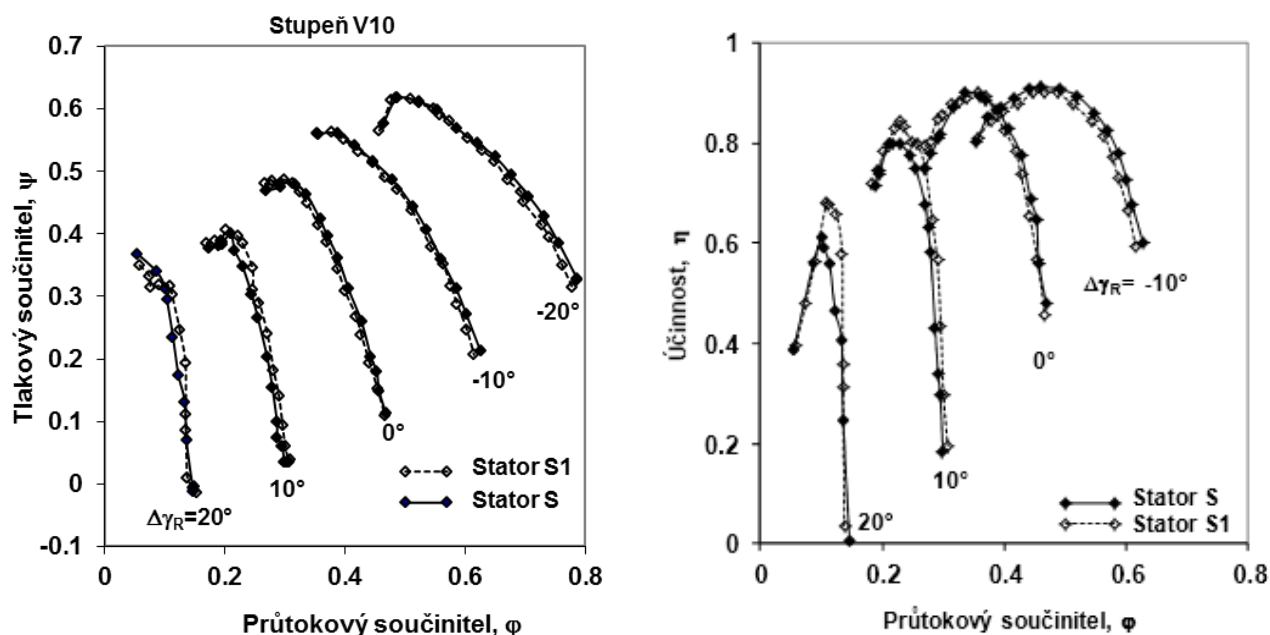


Obr.14 Závislost $\psi_{\max}$ na průtokovém součiniteli u stupně V4, V9 a V10

Obr.15 ukazuje experimentální závislosti tlakového součinitele ψ a účinnosti η na průtokovém součiniteli ϕ pro různá přestavení rotorových lopatek stupně V10. Jsou uvedeny křivky pro statorovou řadu s klasickými S a prostorově navrženými lopatkami S1 [22]. Z grafů je patrné, že s poklesem přestavení roste průtok plynu stupněm.

Relativně malé rozdíly mezi křivkami tlakového součinitele ψ pro stupeň V10 lze pozorovat pro celý rozsah přestavení lopatek $\Delta\gamma_R$. Avšak v případě účinnosti lze zjistit přírůstky účinnosti při kladných přestaveních rotorových lopatek $\Delta\gamma_R = 10^\circ$ and 20° : $\Delta\eta = 5\%$ a 8% . Při základním nastavení $\Delta\gamma_R = 0^\circ$ je přírůstek $\Delta\eta = 4,2\%$. To se dá vysvětlit zmenšením oblasti odtrženého proudu na podtlakové straně statorové lopatky S1 při kladných úhlech náběhu v důsledku prostorového tvaru lopatky, kde délka tětiny se zvětšuje směrem k omezujícím stěnám kanálu (obr.1). Úhly tečny k náběžné hraně lopatky na náboji resp. na skříní jsou $\phi_h = 34^\circ$ resp. $\phi_t = 23^\circ$. Hlavní parametry statorové řady S1 jsou v Tabulce č.1 a v obr.13. Podrobná analýza jevu je obsažena v pracích autora [16], [17].

V poslední době byl realizován návrh vysoce hltného stupně V18 s nábojovým poměrem $v = 0,5$. V současnosti se připravují jeho zkoušky. Tento nový stupeň bude vhodný pro nově budované uhelné bloky elektráren.



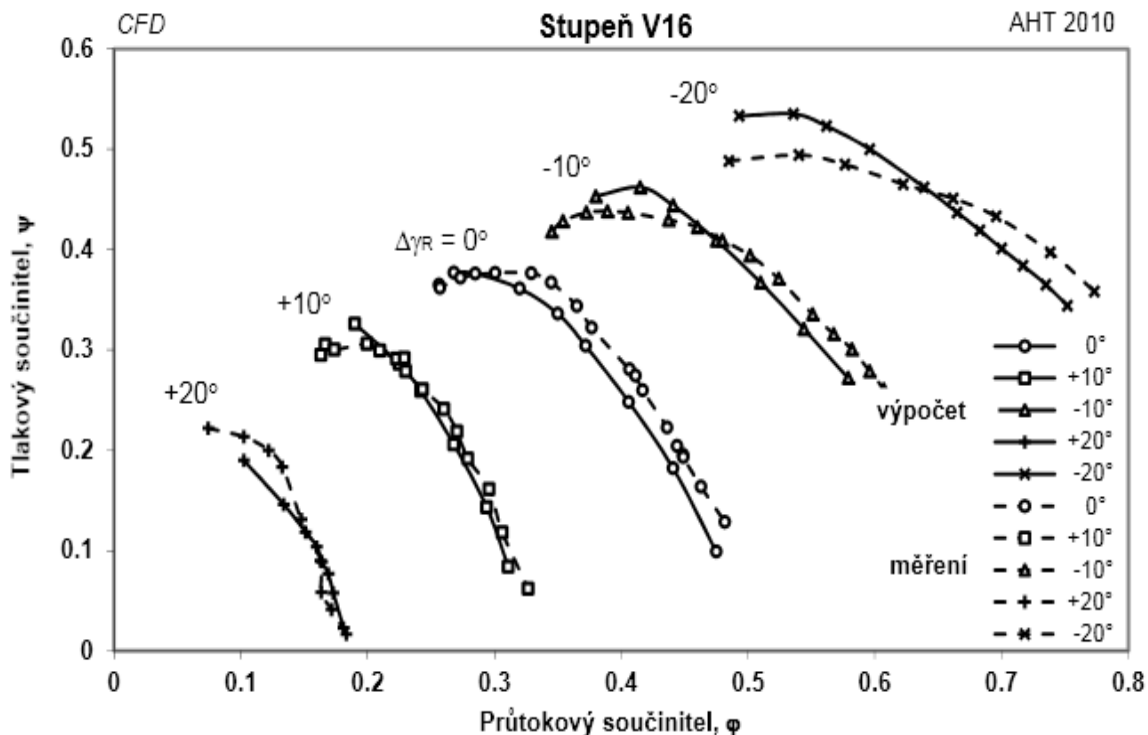
Obr.15 Experimentální aerodynamické charakteristiky stupně AV10

7.2 Stupně pro větrání

V Tabulce č.2 jsou obsaženy údaje o ventilátorových stupních pro větrání. První dva s označením V4 a V5 s nábojovým poměrem 0,55 jsou určeny pro klasické ventilační ventilátory. Oba stupně mají relativně vysokou hodnotu maximální účinnosti $\eta_{\max} = 92,0$ až $92,5\%$. Jejich pracovní rozsah je velmi široký $\Delta\gamma_R = -40^\circ$ až $+20^\circ$. Souvisí to se středním aerodynamickým zatížením mříží obou lopatkových řad. Hodnota difuzního faktoru je nižší než $DF = 0,50$.

V souvislosti s požadavky na reverzaci směru proudu vzduchu při haváriích a požárech v dopravních tunelech, hlubinných dolech a halách továren a letišť autor publikace provedl řadu teoretických a experimentálních prací při návrhu nových reverzních stupňů. Nejčastěji se provádí reverzace pomocí natáčení rotorových lopatek (obr.2) a změnou smyslu otáčení ventilátoru se současným přestavením satorových lopatek /14/, /18/. Aerodynamicky výhodnější je první metoda. Byly navrženy stupně V16 a V17. U nich se reverzace předpokládá pomocí natáčení rotorových lopatek. Stupně mají nábojový poměr 0,62.

Reverzní stupně RAV1 a RAV04 jsou určeny pro proudové ventilátory. Ty byly navrženy s použitím vlastního jednorozměrného modelu /13/ na základě podkladů o eliptickém lopatkovém profilu.

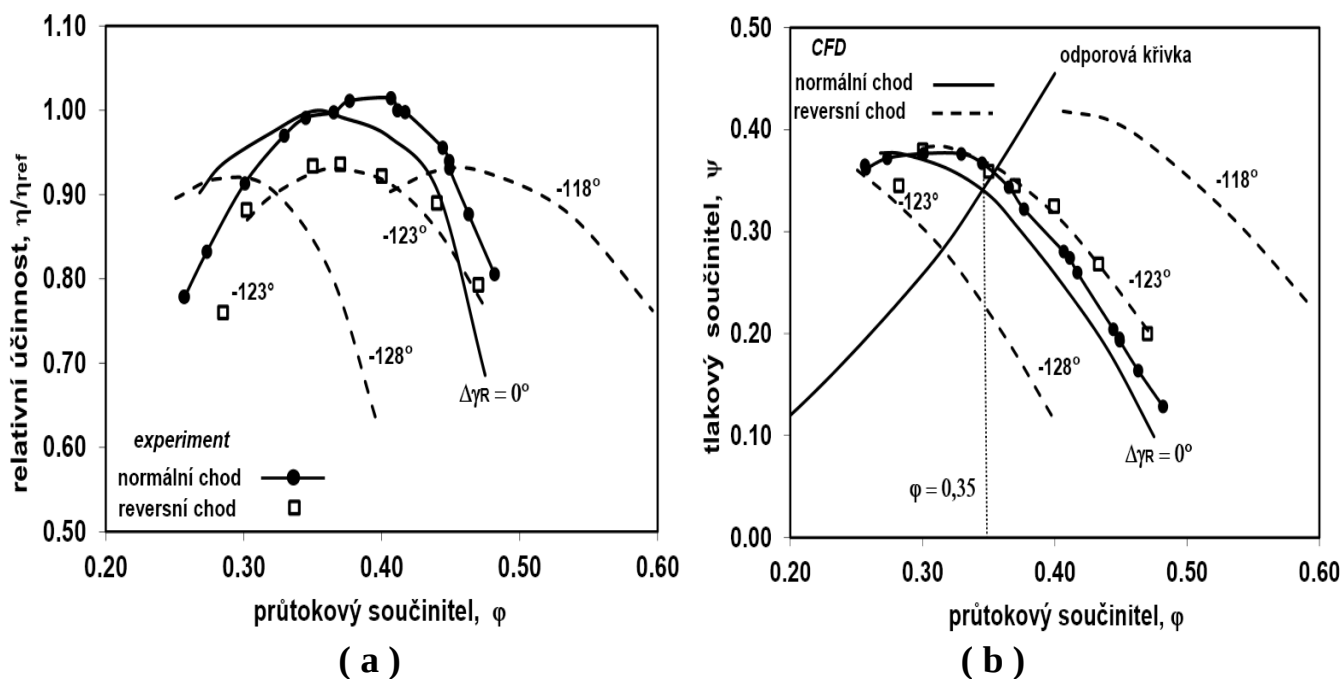


Obr.16 Porovnání experimentálních a vypočtených charakteristik stupně V16

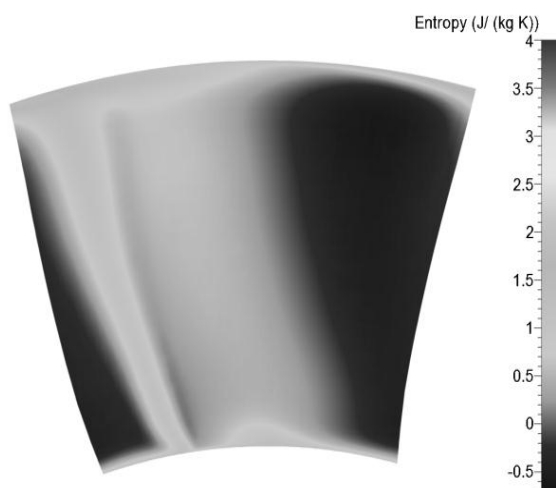
Na obr.16 je porovnání změřených a vypočtených závislostí tlakového součinitele ψ na průtokovém součiniteli ϕ stupně V16 pro rozsah přestavení rotorových lopatek $\Delta\gamma_R = \pm 20^\circ$. Výpočet byl realizován na základě výsledků simulace proudu pomocí programu Numeca. s užitím modelu turbulence Spalarta a Allmarase. V blízkosti meze stability práce stupně byl aplikován model SST. Počet výpočtových buněk byl přibližně 10^6 . Lze konstatovat přijatelný souhlas výpočtu a měření. Větší rozdíly se vyskytují při krajních nastaveních rotorových lopatek. Podobně tomu bylo i v případě účinnosti. Souvisí to s výskytem větších oblastí odtržení proudu v lopátkových řadách při velkých kladných a záporných úhlech náběhu /11/.

Obr.17 ukazuje porovnání experimentálních a spočtených charakteristik pro normální resp. reverzní chod stupně V16 při návrhovém nastavení resp. jejich přestavení. Souhlas je přijatelný. Reverzace chodu je provedena natočením rotorových lopatek – viz obr.2. Je zřejmé z obr.17b, že v návrhovém bodě $\phi = 0,35$ při přestavení $\Delta\gamma_R = -123^\circ$ lze dosáhnout stejného průtoku jako při základním chodu $\Delta\gamma_R = 0^\circ$. Při reverzaci je v návrhovém bodě hodnota účinnosti stupně o cca $\Delta\eta/\eta_{ref} = 8\%$ nižší než při základním. Důvody spočívají ve vyšších úhlech náběhu než při základním chodu a v obráceném obtékání profilů rotorové lopatky /18/. V důsledku toho se vytvářejí větší oblasti odtržení v lopátkových kanálech, a tím i vyšší energetické ztráty. To dosvědčuje např. rozložení entropie ve výstupní rovině rotorové řady v obou režimech na obr. 18.

Při změně směru proudění lze pozorovat vyšší ztráty v úplavu ve střední části lopatky a v blízkosti omezujících stěn (obr. 18b) v porovnání s případem základního chodu stroje (obr.18a).

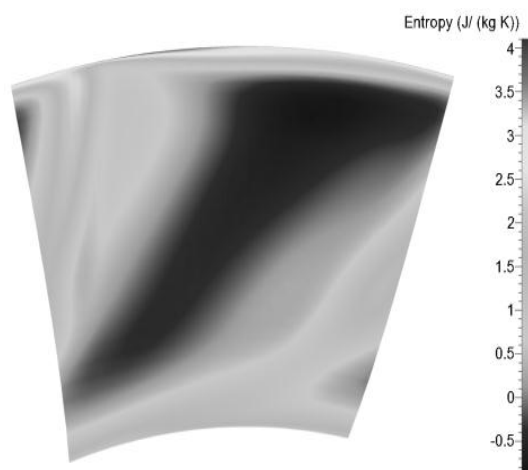


Obr.17 Změřené a vypočtené (CFD) charakteristiky stupně V16 při normálním a reverzním chodu



CFD, V16

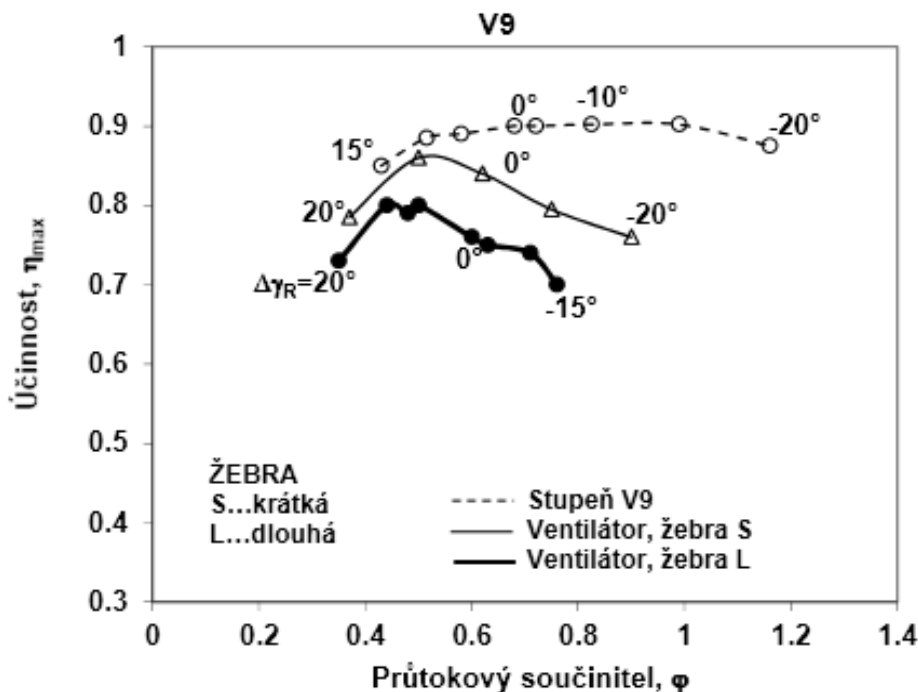
Obr.18a Entropie v rovině za rotorem
základní chod - $\phi = 0,35$



Obr.18b Entropie v rovině za
rotorem – reverzní chod

8. AERODYNAMICKÉ VLASTNOSTI CELÉHO VENTILÁTORU

V souvislosti s návrhem celého ventilátoru je třeba znát vliv různých konstrukčních provedení vstupní sací komory. V současné době se používají již optimalizované tvary vstupní komory a difuzoru z hlediska energetických ztrát. Často bývají potíže s tuhostí ložiska hřídele, jež je upevněno uvnitř náboje vstupní sací komory. Proto se aplikují žebra s různou délkou a tloušťkou. Je snaha použít jich co nejvíce. Byl rozebrán příklad jednostupňového osového ventilátoru se stupněm V9. Poměr stran vstupního obdélníkového průřezu je $b/a = 1,32$ (obr.1). Poměr výstupní a vstupní plochy difuzoru je $A_4/A_3 = 1,87$. Na obr.19 jsou vyneseny závislosti experimentální účinnosti stupně V9 a celého ventilátoru s dlouhými (L) a krátkými žebry (S) u náboje vstupní sací komory. Rozdíly maximálních hodnot účinnosti stupně $\eta_{ST,max}$ a ventilátoru $\eta_{v,max}$ pro různá přestavení $\Delta\gamma_R$ se zvětšují s hodnotou průtokového součinitele ϕ . To je ve shodě s odvozenou závislostí (1). Pro krátká žebra (S) dosahuje maximální účinnost hodnoty $\eta_{v,max} = 84\%$. Použití delších žebel v důsledku požadované větší tuhosti uložení ložiska snižuje hodnotu účinnosti $\eta_{v,max}$ o cca 3-4%, jak plyne z obr.19. Souvisí to se zvětšenými třecími ztrátami a většími oblastmi odtržení na žebrech.



Obr.19 Experimentální závislosti účinnosti ventilátoru a stupně V9 na průtokovém součiniteli s vlivem tvaru žebel vstupní sací komory

9. VÝHLED DALŠÍCH VÝZKUMNÝCH PRACÍ

Pro zvýšení konkurenceschopnosti na světovém trhu je třeba u osových ventilátorů vyráběných v České republice postupně zvyšovat jejich výkonové parametry a spolehlivost provozu. Důležitým požadavkem je také zachování původní ceny. V nejbližší době podle našeho názoru je vhodné se zaměřit na :

i) zvýšení hltlosti klasických osových ventilátorů prostřednictvím snížení nábojového poměru. Autor již navrhl lopatkování stupně V18 s hodnotou nábojového poměru 0,5. Je připraveno experimentální ověření.

U proudových ventilátorů se uvažuje se snížením nábojového poměru na hodnotu 0,3 až 0,35.

ii) zvýšení účinnosti ventilátorů. To je možné např. úpravou konstrukčního provedení vstupní sací komory s nosnými žebry náboje, jak plyne z rozborů výsledků simulace proudění. U proudových reverzních ventilátorů je nutné se zabývat tvarem profilu rotorové lopatky.

iii) snížení ceny výroby některých dílů ventilátoru. Jedná se např. o náhradu profilovaných statorových lopatek lopatkami z plechu při dodržení určitých podmínek nebo zjednodušení tvaru vstupní sací komory.

iv) zvýšení spolehlivosti provozu ventilátorů. Nejporuchovějším dílem osových ventilátorů je hydraulické natáčecí zařízení rotorových lopatek. Cílem dalšího výzkumu by měla být úprava aerodynamického návrhu rotorových lopatek pro snížení sil potřebných pro natáčení lopatek během rotace.

10. ZÁVĚR

V publikaci jsou uvedeny hlavní výsledky aerodynamického výzkumu a návrhu osových ventilátorů pro energetiku a větrání získané autorem a jeho kolektivem v průběhu posledních dvaceti let. Tyto práce byly prováděny pro největšího českého výrobce ventilátorů - ZVVZ a.s. v Milevsku. Při návrhu byly užity nejnovější postupy vnitřní aerodynamiky, jež jsou zabudovány ve výpočtových programech. Geometrie lopatkových řad je určena s využitím řešení osově souměrného proudění v průtočného kanálu stroje. Jsou aplikovány podklady pro rovinné lopatkové mříže a mříže lopatkových řad stupňů kompresorového typu. V poslední době jsou užívány komerční programy pro simulaci třírozměrného vazkého stlačitelného proudění (Fluent a Numecca). Navržené lopatkové stupně v modelovém měřítku byly experimentálně ověřeny na zkušební zařízení o průměru 600 mm. Pro podrobnější analýzy mechanismu třírozměrného proudění včetně odtržení byly provedeny podrobné sondáže proudění v rovinách lopatkového stupně pomocí pětiotvorových pneumatických sond. Celkem bylo navrženo a experimentálně ověřeno 14

základních osových stupňů. Hlavní dosažené výsledky autora lze shrnout do následujících bodů:

1. Byla sestavena a ověřena metodika návrhu nových ventilátorových stupňů s vysokými parametry včetně experimentálního ověření. Je aplikován sestavený soubor programů. K němu patří v současnosti i komerční program pro simulaci proudění. Při úspěšném návrhu je třeba respektovat řadu odvozených kritérií.
2. Aby navržený osový stupeň měl maximální hodnotu účinnosti vyšší než (89-90)%, je třeba volit přiměřené aerodynamické zatížení mříží lopatkových řad. Hodnoty difuzního faktoru mříží rotorové resp. statorové lopatkové řady by měly být nižší než rozmezí $DF_R = 0,58-0,60$ resp. $DF_S = 0,54-0,56$. Pro dosažení tohoto cíle mohou být užity i relativně nízké hodnoty štíhlosti lopatek $h/c = 0,8 - 1,0$.
3. Výsledky numerické simulace proudění, získané pomocí komerčního programu Numeca nebo Fluent, lze využít při určení aerodynamických vlastností nově navrženého stupně a při optimalizaci geometrie lopatek zejména z hlediska účinnosti.
4. Souhlas výsledků simulace a měření je přijatelný v okolí návrhového bodu. U účinnosti stupně resp. celého ventilátoru je rozdíl v pásmu $\pm 1,5\%$. Rozdíly se zvětšují se vzdáleností od tohoto bodu.
5. Nově navržené stupně pro energetiku s označením V9 a V10 s nábojovým poměrem 0,6 dosahují maximálně možných hodnot tlakového součinitele $\psi_{\max}$ v rozsahu hodnot průtokového součinitele $\phi = 0,30$ až 1,2. Hodnota součinitele $\psi_{\max}$ pro hodnotu součinitele $\phi = 0,30$ resp. $\phi = 0,80$ je $\psi_{\max} = 0,44$ resp. 1,0. Tyto stupně spolu se stupněm V6 budou v budoucnu užívány pro stavbu nových vysokotlakých ventilátorů pro energetiku. To dosvědčují již některé současné poptávky.
6. Jestliže se aplikuje statorová řada se speciálně navrženými lopatkami (prodloužená délka tělivity lopatky u obou omezujících stěn), pak dojde ke zvýšení účinnosti v blízkosti hranice stability až o 5 – 8% při přestaveních rotorových lopatek 0° až $+20^\circ$ vzhledem k případu užití klasických statorových lopatek.
7. Lopatkové stupně pro větrání (V4 a V5) mají relativně vysokou účinnost $\eta_{\max} = 92 - 92,5\%$. To souvisí s tím, že mříže lopatkových řad mají střední aerodynamické zatížení. Maximální hodnota difuzního faktoru je $DF = 0,5$.
8. Při stavbě větracích soustav se často požaduje reverzace průtoku při havarijních situacích. V současnosti je největší poptávka po ventilátorech, kde reverzace je realizována prostřednictvím natáčení rotorových lopatek. Jak bylo vyšetřeno autorem tato metoda regulace je energeticky méně náročná než metoda, kde se využívá změny smyslu rotace ventilátoru a natáčení statorových lopatek. Byly navrženy dva stupně V16 a V17. Oba nové stroje umožňují nastavení stejného průtoku plynu jak v základním tak reverzním chodu.

9. V závěru publikace byly formulovány cíle výzkumných prací v blízké budoucnosti.

VÝZNAMNÉ REALIZOVANÉ PROJEKTY

1. Kouřové osově ventilátory pro české teplárny a elektrárny s odsiřovacími zařízeními v Unipetrolu Litvínov, v Trmicích, Hodoníně a ve Vřesové. Základem jsou stupně AV1 a AV2. Postaveno celkem 20 strojů.
2. Vzduchové a kouřové osově ventilátory pro modernizované české elektrárny v Tušimicích a v Prunéřově. Základem stupně AV1 a AV7. Celkem 8 strojů.
3. Vzduchové a kouřové osově ventilátory pro elektrárnu Marica v Bulharsku. Základem stupeň AV7. Celkem 8 strojů.
4. Osově ventilátory pro příčné větrání tunelů. Základem stupeň AV5.
5. Osově ventilátory pro podélné větrání tunelů. Základem reverzní proudové stupně RAV1 a RAV04. Silniční tunely v Česku a na Slovensku. Letištní hala v Hartfieldu v USA. Vyrobeno přibližně stovka ventilátorů. Objednáno dalších 80 strojů pro tunel Blanka v Praze.
6. Osově ventilátory pro aerodynamické tunely automobilek. Základem stupeň AV5. Firmy: Audi, Výzkumné středisko v Torontu, Porsche, Scania.

Jedno a dvoustupňové osově ventilátory o průměru 2 až 5 m byly vyrobeny firmou ZVVZ a.s. v Milevsku. Mezi další projekty patří zvýšení účinnosti vzduchových ventilátorů ve 4 blocích elektrárny v Tušimicích aplikací nového oběžného kola, nové lopatkování kouřových ventilátorů v elektrárně Mělník I.

Autor se zabývá i aerodynamikou radiálních ventilátorů. Mezi úspěšné realizace patří intenzifikace plynových hořáků s použitím nového radiálního ventilátoru s vyšším přírůstkem tlaku, určení příčin havárie dvou recirkulačních radiálních ventilátorů v elektrárně v Poříčí, zvýšení účinnosti středotlakých ventilátorů s využitím výsledků simulace proudu a návrh a experimentální ověření radiálních ventilátorů bubnového typu s dopředu zahnutými lopatkami.

Sestavený soubor programů pro návrh lopatkování osových stupňů byl využit také při návrhu dvoustupňového transsonického osového kompresoru malého leteckého motoru M601X firmy Walter Aircraft Engines a.s.

SEZNAM LITERATURY

1. Brodersen S.: Experimentelle Untersuchungen an hochbelasteten Axialventilatoren mit kleinem Nebenverhältnis . Dissertation, 1986, TU Braunschweig
2. Baumgarten S., Krassmann H. und Rosener J.:“Stand der Forschung an

- aerodynamisch hochbelastesteten Axialventilatoren an Pfleiderer Institut“. Mittelungen des Pfleiderer Institutes, Heft 1, 1995
3. Howard M.A., Ivey P.C., Barton J.P. and Young K.F.: „End-wall effects at two tip clearances in a multistage axial flow compressor with controlled diffusion blading“. Transaction of ASME, Journal of Turbomachinery, October 1994, Vol.116, p.634
 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., Bruna V., Folta V., Lindová M. a Šprinc, M., Krásný I.: Systém programů CADAC pro návrh stupně osového kompresoru. Interní zpráva SVUŠS, 1992
 8. Cyrus V.: Prediction of secondary losses in axial compressors. ASME Paper No.92-GT-288, Koln 1992
 9. Cyrus V.: Design of axial flow fans with high aerodynamic loading. Forschung im Ingenieurwesen, Bd.62 (1996), Nr.3, S.58 – 64.
 10. Cyrus V.: “Aerodynamic performance of rear axial compressor with annular diffuser and outlet chamber. ASME Paper No. 96-GT-238, Birmingham, 1996
 11. Cyrus V.: “Aerodynamic performance of an axial compressor stage with variable rotor blades and inlet guide vanes“. ASME Paper No.98-GT-158, Stockholm 1998
 12. Cyrus V. : An experimental study of stall in four axial compressor stages. ASME Paper No.2000-GT-504, Munich, Juni 2000
 13. Cyrus V. , Wurst P. and Koci P.: “ Reverse axial flow fans in ventilation systems. International Conference on Fans, IMechE publications 2004-4, pp. 335-344, London, November 2004
 14. Cyrus V.: “Axial fan at reversal flow“. ASME Paper No. GT 2004-53446, Vienna 2004
 15. Cyrus V. : „The Turbine Regime of a Rear Axial Compressor Stage.“ ASME Paper No. 90-GT-74, Brussels 1990
 16. Cyrus V., Polanský J. and Wurst P.: ”High Pressure axial flow fan for power industry“. Proceedings of 7th European Conference on turbomachinery, Proceedings pp.369-380, Athens, March 2007,
 17. Cyrus V. and Wurst P.: ”High Pressure axial flow fan for power industry“. Proceedings of 9th European Conference on Turbomachinery, Proceedings pp. 81-93, Istanbul, March 2011
 18. Cyrus V., Pelnář, J. and Cyrus, J.: “Reversing of Axial Flow Fans for Ventilation“. ASME Paper No. GT 2011-46062, Vancouver, Juni 2011
 19. Cyrus V. and Polansky J.: “Numeric simulation of the flow pulsations origin in cascades of the rear blade rows in a gas turbine axial compressor using low

- caloric fuel". ASME Journal of Turbomachinery, Vol.132, July 2010
20. Cyrus V. , Wurst P. and Polansky J.: "Efficiency improvement of axial flow fan by the application of redesigned rotor blade row". Ventilatoren, Entwicklung-Planung-Betrieb. Tagung Braunschweig , VDI-Berichte S.357-370 , Marz 2006
 21. Cyrus V. and Koci P.: "High Pressure axial flow fans for modern coal power stations".50.Kraftwerktechnisches Kolloquium, Proceedings, Vortrag No. V6.7, Dresden, October 2008
 22. Weingold H.D., Neubert R.J., Behlke R.F. et al : "Bowed stators: An Example of CFD applied to improve multistage compressor efficiency. TASME, Journal of Turbomachinery, April 1997, Vol.119, pp.161-168
 23. Place J.M., Howard M.A., and Cumpsty N.A.: "Simulating the multistage environment for single stage compressor experiments. TASME Journal of Turbomachinery, October 1996, Vol.118, pp.706-716
 24. Kim J.H., Song T.W. et al: Model development and simulation of transient Behavior of heavy duty gas turbines". IME , Part A Journal of Power and Energy, Vol.211, Issue 6, 1997
 25. Gill A., von Beckstrom T.W. and Harms T.E.: "The flow field within an axial flow compressor at extremely high flow coefficients ASME Paper No. GT2010-11894, Glasgow, 2010

Nejdůležitější použítá označení

A průtoková plocha	δ deviace proudu $\delta = \bar{\alpha}_2 - \beta_{L2}$
c třetiva	η účinnost $\eta = Q \Delta p'_c / (M_k \omega)$
$C_{p,R}$ tlakový součinitel rotorové řady	ω úhlová rychlost
$C_{p,R} = (\bar{p}_{c1,R} - p_{c2,R}) / (0.5 \rho u_t^2) / q_u$	ζ ztrát. součinitel $\zeta = (\bar{p}_{c1} - \bar{p}_{c2}) / q_1$
DF difuzní faktor	σ hustota mříže $\sigma = c/s$
$DF = 1 - \bar{w}_2 / \bar{w}_1 + ((w_{u1} - w_{u2}) / 2\sigma \bar{w}_1)$	ϕ průtokový součinitel $\phi = Q / Au_t$
h výška lopatky	v nábojový poměr
i úhel náběhu $i = \bar{\alpha}_1 - \beta_{L1}$	ρ hustota
M_k kroutící moment	
p tlak	<u>Indexy</u>
Q objemový průtok	c celkový
q dynamický tlak	h náboj
R plynová konstanta	m meridiální, střední
s rozteč lopatek, souřadnice	R rotor
T teplota	S stator
u_t obvodová rychlost na skříni	u obvodový
w rychlost	ST stupeň (R+S)
z vzdálenost od náboje , počet lopatek	v ventilátor
α úhel proudu	VL vstupní lopatky

β_L úhel lopatky	1,2 vstup, výstup
γ úhel nastavení profilu	$(\bar{\quad})$ střední hodnota po obvodu
ψ tlakový součinitel $\psi = 2 \Delta p_c' / (\rho u_t^2)$	$(\quad)'$ střední hodnota v celé měřicí rovině

ŽIVOTOPIS

V.Cyrus 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 a doktorských 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). Tři články jsou uveřejněny v Transaction of the ASME, Journal of Turbomachinery. V americké a německé literatuře lze nalézt přes 35 odkazů (citací). Je autorem monografie s názvem : „Secondary Flow in Axial Compressors and Its Effect on Aerodynamic Characteristics.“ Externě přednáší na ČVUT v Praze. Habilitační práci obhájil v roce 2006 v oboru Aplikovaná mechanika. 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.1986) 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.