

Modelovanie nestacionárnych aerodynamických procesov pri návrhu veterného zariadenia

Dušan Kudelas¹

Unsteady aerodynamic processes modeling in wind equipment design

Dynamic stall, caused by flow separation, will take place on any profile or other surfaces that are exposed to time-dependent motion in the flow, such as change in angle of attack, wing flapping respectively or another vertical movement. The study compares results of simulations of flow around airfoil FX 63-137.

Key words: unsteady simulation, dynamic stall, numerical simulation, unsteady aerodynamics

Úvod

Mnohé z aerodynamických javov a pozorovaných účinkov na veterné turbíny sú teraz známe, ale detaily prúdenia vzduchu v bezprostrednom okolí sú stále zle pochopené a je náročné presne ich predpovedať. Predkladaná štúdia sa zaoberá modelovaním poľa indukovanej rýchlosti vytvoreným úplavom za turbínou, a dynamickým preťažením, odtrhnutia prúdu.

Základné obmedzenie existuje v možnosti všetkých aerodynamických modelov, a nedorozumení alebo nejasností, ktoré môžu nastať pri ich uplatňovaní. Výzvou pre analytikov je používanie doplnkových experimentálnych meraní a modelovanie s cieľom, lepšie pochopiť aerodynamické problémy a nájsť resp. rozvíjať presnejšie modely s širším rozsahom použitia [8].

Nestacionárne aerodynamické efekty

Veterné turbíny sú vystavené zložitým podmienkam a účinkom prostredia ako: atmosférické turbulencie, účinky limitnej vrstvy, smerové a priestorové zmeny, strih vetra, teplotné rozloženie a možné účinky nestacionárneho prúdenia. Rôzne aerodynamické zdroje, môžu vytvoriť sily pôsobiace na turbínu. Hlavné delenie zdrojov je na periodické a neperiodické. Periodické sú: rýchlosť vetra, tienenie vežou, natočenie lopatiek. Neperiodické: turbulencia vetra, dynamika víru, interakcia vír - lopatka. Veterné turbíny v podstate pôsobia v nepriaznivom, nestacionárnom aerodynamickom prostredí, ktoré je ťažké definovať a realizuje sa tak pomocou meraní a tiež pomocou matematických modelov. Jedným nestabilným, nelineárnym aerodynamickým problémom je dynamické odtrhnutie prúdu, pri ktorom vznikajú nestabilné aerodynamické sily, ktoré nie sú zhodné s tými, ktoré vznikajú pri ustálenom prúdení. Ani súčasné aerodynamické modely dostatočne nepopisujú dynamické preťaženie[7].

Veterné turbíny sú prevádzkované väčšinu svojho času v nestabilnom prúdení. Sily na každý element lopatky sa menia v čase. Mnohé nestacionárne efekty sú dôležité pre mnohé rotačné stroje, avšak pre veterné turbíny sú obzvlášť akútne, pretože veľké poruchy amplitúdy toku a redukované frekvencie prispievajú k pôsobeniu nestacionárnych aerodynamických síl. Napríklad kvôli relatívne nízkej rotačnej rýchlosti veterných turbín a nízkych obvodových rýchlosti, zmeny v rýchlosti vetra alebo atmosférické výkyvy môžu viesť k podstatným zmenám v uhle nábehu[8].

Pri uvažovaní vplyvu prúdenia na element lopatky sa označenie nestacionárna aerodynamika často zamieňa za dynamické preťaženie, spôsobené odtrhnutím prúdu. Zatiaľ čo dynamické preťaženie je určite významným problémom pôsobenia nestacionárneho prúdenia na mnoho veterných turbín, nestabilné sily môžu vznikáť aj pri absencii dynamických preťažení a odtrhnutia prúdu. Je dobre známe, z experimentálnych a teoretických výsledkov, že významné nestacionárne efekty sa môžu na lopatkách vyskytnúť, počas nestacionárneho prúdenia aj pri neodtrhnutí prúdu od profilu krídla. Zároveň sú prítomné cirkulujúce aj necirkulujúce zložky nestacionárnych síl[7].

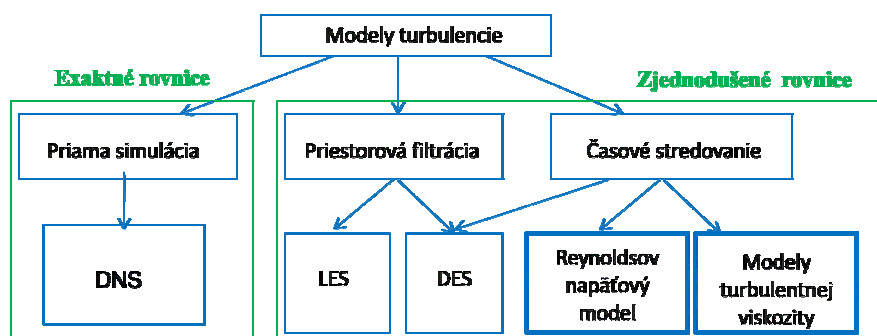
Zvláštny aspekt aerodynamického problému je kvantifikácia nestacionarity prúdenia. Redukovaná frekvencia k , vyjadruje stupeň nestacionarity. $k = \omega b / V = \omega c / 2V$, kde ω je frekvencia, c je charakteristická

¹ doc. Ing. Dušan Kudelas, PhD., Ústav podnikania a manažmentu, FBERG TU v Košiciach, Park Komenského 19, 04200 Košice, tel.: +421 556022398, mail: dušan.kudelas@tuke.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 20.12.2010)

dĺžka tetivy, a V je priemerná rýchlosť prúdenia. Rozlišujeme prúdenie stacionárne ($k=0$), kvazistacionárne ($k<0,05$), nestacionárne ($0,05<k<0,2$) a vysoko nestacionárne ($k>0,2$). Ďalší a možno menej zrejmy problém, problém stlačiteľnosti a potenciálny dopad na nestacionárne sily. Všeobecne sa zanedbáva stlačiteľnosť, z dôvodu nízkych rýchlostí prúdenia, ale až keď $M_k \ll 1$ vtedy je možné považovať prúdenia za nestlačiteľné. Významnými predstaviteľmi, ktorí sa zaoberali problematikou nestacionárneho a nestlačiteľného prúdenia boli: Theodorsen, Wagner, Küssner, Kármán & Sears [8].

Metódy matematického modelovania turbulentného prúdenia

Modelovanie turbulencie je stále vo fáze výskumu a vývoja, ktorý sa neustále mení s pokrokom v matematickom, fyzikálnom a technologickom sektore. Pokrok je podmienený prehĺbením znalostí prúdenia a numerických metód. Dôležitú úlohu tiež zohráva rozvoj vo sfére výpočtovej techniky. Pri riešení turbulentného prúdenia sa vzhľadom k svojej komplexnosti a nie ešte plne vysvetlenej fyzikálnej podstate turbulencie používajú zjednodušené modely. Zatiaľ neexistuje všeobecne platný model, naopak, modely turbulencie sú závislé na empirických dôkazoch, tj aj na konkrétnych podmienkach, geometrii riešenej oblasti, atď. Pri numerickej simulácii turbulentného prúdenia existujú tri teoreticky odlišné prístupy, ktoré vyplývajú zo zjednodušenia a sú modifikáciou východiskových rovníc opisujúcich prúdenie [6].



Obr. 1. Schematické rozdelenie modelov turbulencie.
Fig. 1. Schematic distribution of the turbulence models.

Metóda priamej numerickej simulácie (DNS-Direct Numerical Simulation) sa používa len za určitých reštriktívnych predpokladov, ktoré sú dané veľkými nárokmi na kapacitu počítača z dôvodu veľmi jemnej siete. Počet uzlových bodov siete potrebných pre metódu DNS možno odhadnúť rádom z Kolmogorovovho mikromerítka turbulencie (rozmer najmenších turbulentných vírov) $N_p \approx Re^{19/4}$. Počet uzlových bodov siete teda prudko stúpa s Reynoldsovým číslom, čo vedie k technickej nereálnosti výpočtov pri existujúcej výpočtovej technike [6].

Metóda veľkých vírov (LES-Large Eddy Simulation) je založená na modelovaní veľkých vírov, ktoré možno zachytiť sieťou. Tieto turbulentné štruktúry veľkých mierok odoberajú kinetickú energiu hlavnému prúdu a sú veľmi závislé na polohe v prúdovom poli a na čase. Sú teda modelované priamo v trojrozmernom a časovo závislom tvare. Turbulentné víry malých mierok, vyvolané kaskádovým prenosom energie od veľkých vírov, sú všeobecne izotropické, málo sa podieľajú na transportných javoch, ale ich prostredníctvom dochádza k disipácii kinetickej turbulentnej energie v dôsledku viskozity. Tieto malé víry sú parametrizované tzv. subgridnými modelmi a odstránené pomocou filtrácie turbulentného poľa. Voľbou šírky pásma filtra, väčšinou zodpovedajúceho rozmeru buniek siete, je možné dosiahnuť takýto počet buniek siete, ktorý možno so súčasnou výpočtovou technikou riešiť. Pre väčšinu inžinierskych úloh turbulentného prúdenia zostávajú najpoužívanejším nástrojom štatistické modely turbulencie, ktoré sú založené na metóde časového (Reynoldsovho) stredovania (RANSA-Reynolds averaged Navier-Stokes equations) veličín turbulentného prúdenia a na nasledujúcej procedúre časového stredovania bilančných rovníc [6].

Modely turbulencie

Pri vývoji veterného zariadenia boli použité štatistické modely turbulencie so štandardnou stenovou funkciou: dvojrovnícové modely ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST) a model Reynoldsových napätí.

Dvojrovnícové modely

Štandardné dvojrovnícové modely sú semi-empirické modely založené na riešení transportných rovníc pre turbulentnú kinetickú energiu k a jej mieru disipácie ε . Použité modely turbulencie vychádzajú z veľmi

často využívanej Boussinesqovej hypotézy, ktorá zakladá konštitučný vzťah medzi Reynoldsovými napätiami $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ a takzvanou vírovou (alebo turbulentnou) viskozitou μ_t [2].

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} (\text{div } \vec{u}) \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (1)$$

kde k je turbulentná kinetická energia $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ (2)

$$S_{ij} \text{ je tenzor deformačných rýchlostí } S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

Najväčším obmedzením Boussinesqovej hypotézy je že uvažuje iba izotropickú turbulenciu (jej vyjadrenie iba pomocou jedného parametra μ_t). Na druhú stranu, podobnosť pravej strany rovnice vírovej viskozity so vzťahom pre viskózne napätia v Navier-Stokesovej rovnici

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \partial f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\text{div } \vec{u}) \delta_{ji} \quad (4)$$

umožňuje Reynoldsove napätia zakomponovať do pôvodnej nespriemerovanej Navier-Stokesovej rovnice – stačí len modifikovať hydrostatický tlak členom s turbulentnou kinetickou energiou $\frac{2}{3} \rho k$ a nahradiť pôvodnú molekulárnu viskozitu μ jej efektívnou hodnotou μ_{ef} [2].

Model k-ε

Model vírovej viskozity k-ε sa stal značne používaný pre priemyselné aplikácie prúdenia tekutín a prenosu tepla. Obľúbený je najmä kvôli svojej robustnosti, širokým možnostiam uplatnenia a dostatočnou presnosťou [26].

Transportné rovnice pre turbulentnú kinetickú energiu k a jej mieru disipácie ε

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

Kde G_k reprezentuje vznik turbulentnej kinetickej energie z dôvodu gradientu rýchlosti, G_b reprezentuje vznik turbulentnej kinetickej energie z dôvodu vztlatku, Y_M reprezentuje efekty stlačiteľnosti a Γ vyjadrujú difuzivitu. C sú empirické koeficienty a σ sú Prandtlve čísla. S sú užívateľom definované výrazy. Vírová viskozita je definovaná nasledovne: $\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}$.

Model k-ω SST

Jednou z výhod modelov k-ω je presnosť modelovania turbulencie v blízkosti steny, pri nepriaznivom tlakovom gradiente. Ich nevýhodou je prehnaná závislosť podmienok v medznej vrstve na parametroch turbulencie vo vonkajšom prúde. Opačne je tomu pri modeloch k-ε [2]. Považuje sa za jeden z najvhodnejších pri modelovaní obtekania krídla. SST model využíva výhody modelov k-ε a k-ω. Na okraji medznej vrstvy sa postupne mení na model k-ε. Zmena je riadená zmiešavacou funkciou v závislosti na vzdialenosti prvku od najbližšej steny. Vírová viskozita je definovaná nasledovne $\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}$

Transportné rovnice pre turbulentnú kinetickú energiu k a jej mieru disipácie ω :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (8)$$

Kde G_k reprezentuje vznik turbulentnej kinetickej energie z dôvodu gradientu rýchlosti, G_b reprezentuje vznik ω , Y reprezentujú efekty disipácie a Γ vyjadrujú difuzivitu. σ sú Prandtlve čísla. S sú užívateľom definované výrazy.

Reynoldsov napäťový model (RSM)

Reynoldsov napäťový model zahŕňa výpočet jednotlivých Reynoldsových napätí prostredníctvom transportných diferenciálnych rovníc v tvare [6]

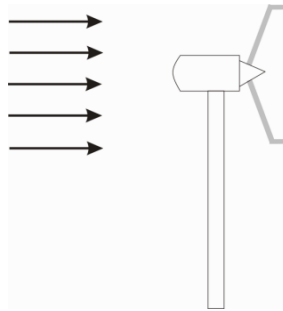
$$\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial t} + \overline{u_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{(u'_i u'_j u'_k)} + \frac{p'}{\rho} (\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j) - \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right]}_{\text{difúzy transport}}$$

$$\underbrace{- \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right]}_{\text{produkcia}} + \underbrace{\frac{p'}{\rho} \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right]}_{\text{redistribúcia}} - \underbrace{2\mu \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right]}_{\text{disipácia}} \quad (9)$$

Za účelom uzatvorenia sústavy rovníc sa aproximuje niektoré členy z rovnice. Vypočítané Reynoldsove napätia sú potom dosadzované do rovnice pre prenos hybnosti.

Modelovanie nestacionárnych aerodynamických procesov pri návrhu veterného zariadenia

V prípade vývoja veterného zariadenia sa uvažovalo s usporiadaním „downwind“, preto bolo nevyhnutné analyzovať prúdenie okolo samotného zariadenia. Priemer rotora bol 9 m, dĺžka gondoly 3,4 m, šírka gondoly v najširšom mieste 1,3 m. Odklon listov od vertikálnej osi 5°. Na profil listu rotora bol použitý Wortmannov profil 63-137. Tento profil bol navrhnutý F.X. Wortmannom pre ľahké lietadlá. Má dobré aerodynamické charakteristiky napr. dosahuje vysoké hodnoty vztlaku a dobrú účinnosť pri rôznych hodnotách uhla nábehu. Je jedným z profilov, ktorý sa využíva pre malé veterné turbíny. Tvar a skrútenie listu vyplynuli z BEMT (Blade element momentum theory)



Obr. 2. Usporiadanie veterného zariadenia downwind.
Fig. 2. Organize of wind equipment type downwind.

Simulácia prúdenia v okolí listu rotora sa mala uskutočniť v priestore valcového tvaru s polomerom 16 m a dĺžkou 38 m. Z dôvodu zníženia náročnosti výpočtu, boli použité periodické hraničné podmienky a samotná simulácia bola realizovaná len vo valcovom výseku s uhlom 120°, polomer a dĺžka ostali zachované. Priestor domény bol rozdelený na tzv. rotačnú časť t.j priestor v bezprostrednom okolí rotora s rozmermi 8x2m a stacionárnu časť. Ako vstupné parametre simulácie boli zvolené: rýchlosť vetra 7 a 10,5 m/s, stacionárne a rotačné prúdenie v okolí rotora s uhlovou rýchlosťou $\Omega = 108, 120$ rpm, pohybujúci sa referenčný rámec, intenzita turbulencie $I = 15\%$, hustota vzduchu $1,225 \text{ kg/m}^3$, diskretizácia druhého rádu, algoritmus SIMPLE, $y^+ = 80 - 100$, neštruktúrovaná výpočtová sieť tvorená z hexahedrálnych a prismatických elementov so zväčšujúcou šírkou buniek v závislosti od vzdialenosti od listu rotora. Pre numerickú simuláciu bol zvolený Menterov viskózný model turbulencie $k - \omega$ SST so štandardnou stenovou funkciou. Priestor prúdenia bol tvorený 6 miliónmi buniek

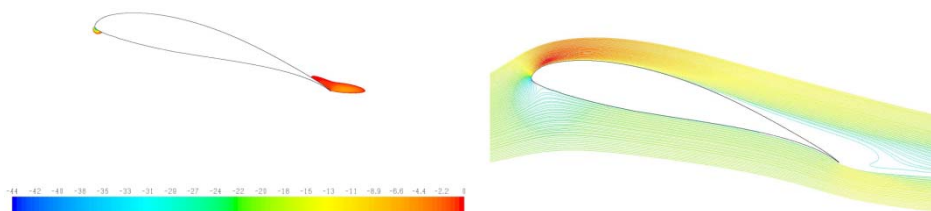
Zistené tlakové koeficienty pri oboch rýchlostiach naznačujú, že na sacej strane profilu krídla dochádza, k strate podtlaku (v druhej polovici krídla), t. j. je tam možné reverzné prúdenie a teda môže dochádzať k dynamickému odtrhnutiu prúdu, čo môže spôsobovať zníženie výkonu. Zároveň na tlakovej strane profilu krídla dochádza k strate tlaku. Z toho dôvodu bolo realizované grafické zobrazenie šmykového napätia na povrchu listu rotora v smere osi Y (obr. 3). Negatívne šmykové napätia a teda miesta separácie prúdenia sú viditeľné v okolí Z-tovej výšky na úrovni 0,75 m (pri oboch rýchlostiach) a od 1,25 do 1,75 m, v prípade rýchlosti prúdenia 10,5m/s.



Fig. 3. Zobrazenie šmykového napätia pri rýchlosti 7 a 10,5 m/s (kladné je zobrazené červenou, záporné predstavujú miesta separácie prúdu).

Fig. 3. Distribution of the shear stress at a speed of 7 and 10.5 m/s (red is positive, negative space presents the separation of flow).

Ak sa pozrieme na rez v mieste odtrhnutia prúdu, z obrázku 4a vyplýva, že v blízkosti odtokovej hrany je prúdenie vzduchu v protismere. V blízkosti nábehovej hrany je tiež prúdenie v negatívnom smere, ktoré ale nevyjadruje separáciu prúdu. To prúdenie vzniká z dôvodu vyššieho uhla nábehu a obtekania nábehovej hrany. Na obrázku 4 je znázornený priebeh prúdnic v okolí profilu, ktoré tiež potvrdzujú odtrhnutie prúdu od profilu.



Obr. 4a). Priebeh negatívnych rýchlostí prúdenia [m/s] v okolí profilu FX 63-137 a 3b) priebeh prúdnic.
Fig. 4a). Distribution of negative flow velocity [m/s], around the airfoil profile FX 63-137 4b) streamlines.

Na základe vykonaných simulácií je možné konštatovať, že v usporiadaní typu downwind dochádza pri týchto rozmeroch veterného zariadenia k ovplyvňovaniu prúdu gondolou veterného zariadenia do vzdialenosti 70% dĺžky listu rotora. Z dôvodu narušenia prúdu gondolou dochádza k odtrhávaniu prúdu na listoch rotora, čo je možné eliminovať zmenou uhla nastavenia listu rotora a tak ovplyvniť jeho aerodynamické parametre.

Záver

Počítačová dynamika tekutín je silným nástrojom pri vývoji veterného zariadenia, s neustálou nutnosťou validácie výsledkov. Nestabilné sily pôsobiace na veterné zariadenie môžu vznikáť aj pri absencii dynamického odtrhnutia prúdu. Nestacionárne efekty sa môžu na lopatkách vyskytnúť, počas nestacionárneho prúdenia aj pri neodtrhnutí prúdu od profilu krídla. Analytické riešenie aerodynamických parametrov je komplikované a vhodnou alternatívou sú metódy numerickej simulácie prúdenia.

Podakovanie: Táto práca bola podporovaná grantom projektu VUKONZE.

Literatúra - References

- [1] Dvořáček, J. a kol: Industrial wastes and economics of their utilization. In: *Metallurgija. Vol. 45, no. 3 (2006), p. 263. - ISSN 0543-5846.*
- [2] Fluent 6.3 Documentation, - Fluent User guide.
- [3] Hamrák, H., Domaracká, L.: Identification and possibilities of resource exploitation at seabed. In: *Transactions of the Universities of Košice. Č. 4 (2010), s. 62-66. - ISSN 1335-2334.*
- [4] Rodi, W., Fueyo, N.: Engineering turbulence modelling and experiments 5: *proceedings of the 5th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Mallorca, Spain, Elsevier Science, Oxford, 2002, ISBN: 0-08-044114-9.*
- [5] Kováč, D., Kováčová, I.: EMC a stavebníctvo, *Košice : TU, FEI, 2009. - 89 s. [CD-ROM]. - ISBN 9788055303178.*
- [6] Kozúbková, M., Drábková, S.: Numerické modelování proudění, *Fluent I, Ostrava 2003.*
- [7] Leishman G, J.: Challenges in Modelling the Unsteady Aerodynamics of Wind Turbines. *21st ASME Wind Energy Symposium and the 40th AIAA Aerospace Science Meeting, RENO, NC, 2002, www.glue.umd.edu/~leishman/Aero/Leishman_Reno02.pdf*
- [8] Leishman, G,J.: Principles of Helicopter Aerodynamics, *Cambridge University press 2006, ISBN 0-521-85860-7.*
- [9] Vancák, I., Rybár, R., Horodníková, J.: Prevzdušňovanie vodných nádrží využitím veternej energie. In: *Energie 21. Vol. 2, no. 1 (2009), p. 46-47. - ISSN 1803-0394.*