

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE STU BRATISLAVA
Ústav chemického a environmentálneho inžinierstva
Oddelenie chemického a biochemického inžinierstva

VENTILÁTORY A DÚCHADLÁ

Obsah

Zoznam použitej literatúry	3
Abstrakty článkov	4
Abstract	7
1. Úvod.....	8
2. Aplikácie ventilátorov v chladiacich systémoch.....	8
3. Opatrenia predstavujúce úsporu energie pri prevádzkovaní ventilátorov.....	11
Záver.....	12
Odporúčaná literatúra	13

Zoznam použitej literatúry

- [1] Bredell, J.R.; Kröger, D.G.; Thiart, G.D.: Numerical investigation of fan performance in a forced draft air-cooled steam condenser, *Applied Thermal Engineering* 26, rok 2006, str. 846-852
- [2] Yu, F.W.; Chan, K.T.: Improved condenser design and condenser-fan operation for air-cooled chillers, *Applied Energy* 83, rok 2006, str. 628-648
- [3] McKane, A.; Hasanbeigi, A.: Motor systems energy efficiency supply curves: A methodology for assessing the energy efficiency potential of industrial motor systems, *Energy Policy* 39, rok 2011, str. 6595-6607
- [4] Staats, W.L.; Brisson, J.G.: Active heat transfer enhancement in air cooled heat sinks using integrated centrifugal fans, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 82, rok 2015, str. 189-205
- [5] Lanzerstorfer, Ch.; Neder, F.; Schmied, R.: Constant design air flow industrial ventilation systems with regenerative dust filters: Economic comparison of fan speed-controlled, air damper controlled and uncontrolled operation, *Energy and Buildings* 128, rok 2016, str. 503-510

Abstrakty článkov

[1]: Numerical investigation of fan performance in a forced draft air-cooled steam condenser:

Inlet air flow distortions in a large air-cooled steam condenser (ACSC), caused by structures, wind and other fans may result in a significant reduction in fan performance, or volumetric effectiveness, as well as fan blade vibration. This phenomenon has an adverse effect on the heat rejection capacity of an ACSC due to a decrease in air mass flow rate. In this study the effect of inlet flow distortions on the flow rate through the fans in an ACSC is numerically investigated by modelling the flow field in a section of such a system using the computational fluid dynamics code, FLUENT. The effect of platform height on the volumetric effectiveness of two different types of axial flow fans is considered. The two fans have the same diameter, number of blades and rotational speed, but feature different blade designs, and hub-tip-ratios of respectively 0.153 and 0.4. Numerical simulations show all-round superior performance in terms of volume flow rate for the fan with a hub-tip-ratio of 0.4. It is furthermore confirmed that the addition of a walkway can significantly increase the flow rate through the fans located near the edge of the fan platform.

Keywords: Air-cooled; Inlet flow distortion; Axial flow fan; Fan performance; CFD

[2]: Improved condenser design and condenser-fan operation for air-cooled chillers:

Air-cooled chillers traditionally operate under head pressure control via staging constant-speed condenser fans. This causes a significant drop in their coefficient of performance (COP) at part load or low outdoor temperatures. This paper describes how the COP of these chillers can be improved by a new condenser design, using evaporative pre-coolers and variable-speed fans. A thermodynamic model for an air-cooled screw-chiller was developed, within which the condenser component considers empirical equations showing the effectiveness of an evaporative pre-cooler in lowering the outdoor temperature in the heat-rejection process. The condenser component also contains an algorithm to determine the number and speed of the condenser fans staged at any given set point of condensing temperature. It is found that the chiller's COP can be maximized by adjusting the set point based on any given chiller load and wet-bulb temperature of the outdoor air. A 5.6–113.4% increase in chiller COP can be achieved from the new condenser design and condenser fan operation. This provides important insights into how to develop more energy-efficient air-cooled chillers.

Keywords: Air-cooled chillers; Coefficient of performance; Evaporative pre-cooler; Variable speed condenser fans

[3]: Motor systems energy efficiency supply curves: A methodology for assessing the energy efficiency potential of industrial motor systems:

Motor-driven equipment accounts for approximately 60% of manufacturing final electricity use worldwide. A major barrier to effective policymaking, and to more global acceptance of the energy efficiency potential in industrial motor systems, is the lack of a transparent

methodology for quantifying the magnitude and cost-effectiveness of these energy savings. This paper presents the results of groundbreaking analyses conducted for five countries and one region to begin to address this barrier. Using a combination of expert opinion and available data from the United States, Canada, the European Union, Thailand, Vietnam, and Brazil, bottom-up energy efficiency supply curve models were constructed to estimate the cost-effective electricity efficiency potentials and CO₂ emission reduction for three types of motor systems (compressed air, pumping, and fan) in industry for the selected countries/region. Based on these analyses, the share of cost-effective electricity saving potential of these systems as compared to the total motor system energy use in the base year varies between 27% and 49% for pumping, 21% and 47% for compressed air, and 14% and 46% for fan systems. The total technical saving potential varies between 43% and 57% for pumping, 29% and 56% for compressed air, and 27% and 46% for fan systems.

Keywords: Industrial motorsystems Energy efficiency Conservation supplycurve

[4]: Active heat transfer enhancement in air cooled heat sinks using integrated centrifugal fans:

The enhancement of convective heat transfer in an air-cooled heat sink using integrated, interdigitated impellers was investigated. The experimentally investigated heat sink is representative of a subcomponent of an unconventional heat exchanger with a loop heat pipe, multiple parallel flat-plate condensers, and integrated, interdigitated centrifugal fans, designed to meet the challenges of thermal management in compact electronic systems. The close integration of impeller blades with heat transfer surfaces results in a decreased thermal resistance per unit pumping power compared to conventional forced convection heat sinks.

The fan performance (i.e. fan curve and power consumption) and heat transfer of a single integrated fan heat sink were experimentally characterized for 12 impeller designs and modelled in terms of dimensionless correlations. Correlations were developed to give estimates of the dimensionless fan curve and the dimensionless power curve based on the fan geometry. Additionally, a two-parameter correlation was developed to estimate the dimensionless heat flux based on the fan's operating point. The heat transfer in the integrated fans was observed to be a function of the operating point (i.e. the rotational speed of the impeller and the flow rate of air), with only a weak direct dependence on the fan geometry. The insensitivity of the heat transfer performance to the impeller geometry greatly simplifies the design process of integrated fan heat sinks because the fan design can be optimized independently of the heat transfer performance. Finally, the heat transfer enhancement (compared to pressure-driven flow at the same flow rate) appears to be due to turbulent flow structures induced by the impeller.

Keywords: Heat exchanger; Heat sink; Fan; Thermal management; Convection enhancement; Active enhancement

[5]: Constant design air flow industrial ventilation systems with regenerative dust filters: Economic comparison of fan speed-controlled, air damper controlled and uncontrolled operation:

Variable speed drives for fans in small and medium-size ventilation systems with a constant design airflow, including a regenerative filter for dust separation, are evaluated in this paper. In the past, variable speed drives were considered for systems with varying air flow. It was found that this is also an appropriate measure to reduce the operating costs of such systems. With the chosen approach the calculated payback period based on 24 h operation is between 0.7 and 1.7 years, depending on the size of the system. For systems in a two-shift operation the payback periods are still in the range of 1.4–3.4 years. The profitability of the installation of fan speed-control based on 12,000 service hours is in the range of 80–150%. A new operation mode, in which the filter cleaning is triggered at a fixed pressure drop of the filter cake, would further reduce the payback period and improve profitability. Systems with automatic damper flow control are much less economical. However, for the assumed conditions such systems are still better than uncontrolled systems. The installation of speed-control for fans in ventilation systems with a constant design air flow is therefore highly recommended for an economical design.

Keywords: Ventilation system Fabric filter Fan operation Flow control Variable-speed drive

Abstract

Air is material widely used in industry. To obtain forced draft of air with low pressure difference, ventilators or air blowers are used. In industry, ventilators are being used in various types of coolers, chillers and heat exchangers in general. Besides of that, ventilators deliver air for combustion in kilns, or they provide fresh air needed for air conditioning. Air is also needed for cooling of electronics, and many other purposes. For proper design of ventilators, careful analysis needs to be done. Also it is necessary to analyse installed and already working systems, to identify, whether it is possible to reduce energy consumption of such device.

1. Úvod

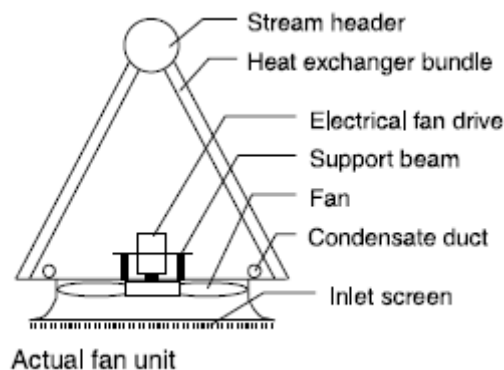
Ventilátory majú široké uplatnenie nielen v priemysle. Okrem ventilácie a vzduchotechniky ako celku majú kľúčovú úlohu aj pri chladení, či už sa jedná o chladenie strojov, výpočtovej techniky, alebo teplonosných médií. Vzduch je často používaný ako nosič a odvádzač tepla. Jeho výhodou je, že je dostupný všade vôkol nás. Náklady tým pádom vznikajú len pri jeho preprave, úprave a spracovaní. Z tohto dôvodu je vhodné vykonať analýzy a opatrenia vedúce k úspore energií. V nasledujúcom texte sú uvedené niektoré možné aplikácie ventilátorov a spôsoby zníženia spotreby elektrickej energie na elektromotoroch, ktoré ventilátory poháňajú.

2. Aplikácie ventilátorov v chladiacich systémoch

Vzduchové chladiče s vynúteným prúdením vzduchu sa používajú na chladenie vodných, resp. parných okruhov, médií cirkulujúcich v chladiarenských okruhoch, alebo napr. elektroniky a výpočtovej techniky. Okrem týchto spomenutých prípadov jestvuje samozrejme mnoho iných aplikácií, avšak odborná literatúra [1,2,4] sa venuje práve týmto aplikáciám.

2.1. Ventilátory v systéme ACSC

Systém ACSC (air-cooled steam condenser) predstavuje sústavu chladičov, ktorá pozostáva z konštrukcie v tvare A, kde v hornej časti v rozvodoch prúdi para, ktorá je zospodu ofukovaná okolitým vzduchom privádzaným ventilátorom. Para postupne kondenzuje v rebrovaných rúrach a zospodu systému sa odvádza kondenzát. Jedna jednotka takéhoto chladiča je znázornená na obrázku č. 1. [1]



Obr. č. 1: Vzduchom chladený parný kondenzátor

Takýto chladiaci systém pozostávajúci z viacerých jednotiek sa používa v uzavretých parných cykloch, ktoré predstavujú napr. parné turbíny. Je zrejmé, že zmena v odvode tepla cez ACSC, vyvolá zmenu aj na parnej turbíne, čo môže mať negatívny dopad na efektívnosť jej chodu. Preto je potrebné určiť vplyv jednotlivých premenných na prevádzku ACSC. Chod ventilátora a teda aj účinnosť chladenia ako celku môže byť negatívne ovplyvnená vzniknutými deformáciami toku vzduchu na nasávaní ventilátora. Tieto deformácie môžu byť spôsobené krížovým tokom vzduchu, spôsobeným jednak poveternostnými podmienkami, ale aj susednými ventilátormi. Taktiež výška plošiny, na ktorej je sústava umiestnená má vplyv na tok vzduchu, čím je táto výška nižšia, tým je nižší aj prietok vzduchu cez ventilátory. Pri

zlej distribúcií vzduchu do ventilátora sa zníži aerodynamická účinnosť lopatiek, čo môže viesť až k vibráciám lopatiek. Pri návrhu ACSC je preto potrebné zvoliť vhodný typ ventilátora. [1]

Kvôli tomu bolo uskutočnené porovnanie dvoch axiálnych ventilátorov, modelovaním CFD, aby sa zistil vplyv na zmeny toku vyvolaný konštrukciou, napr. umiestneným motora nad ventilátorom. Ventilátory boli uvažované s rovnakým priemerom, počtom lopatiek a rotačnou rýchlosťou. Líšili sa iba v priemere ich stredovej časti, teda v pomere priemeru čapu a lopatiek ventilátora. Pri ventilátore s nižším priemerom čapu bolo zistené, že dochádza k spätnému toku vzduchu v blízkosti jeho osi. Celkovo ventilátor s väčším čapom vyšiel z porovnania lepšie, pretože bol menej ovplyvnený deformáciami toku [1].

Keďže je ťažké vyhodnotiť vplyvy jednotlivých faktorov na chod ventilátora kvôli zložitosti toku, boli určené korelácie vyjadrujúce závislosť objemovej účinnosti (podiel prietoku vzduchu cez ventilátor v sústave ku prietoku vzduchu cez voľne stojaci ventilátor) od výšky umiestnených ventilátorov, priemeru ventilátorov a počtu ventilátorov v sústave [1].

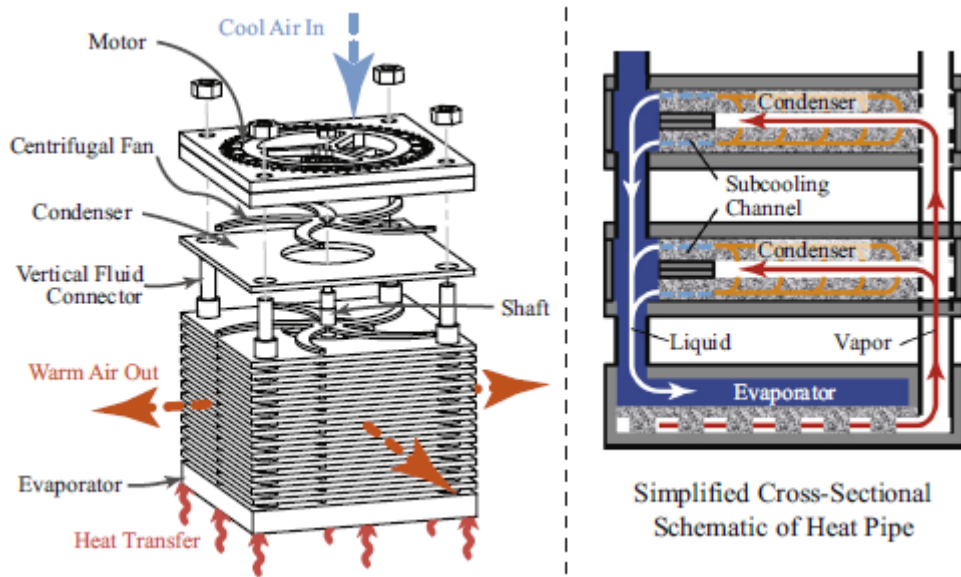
2.2. Chladienie kondenzátorov chladiarenského cyklu

Vzduchové chladiče majú vplyv na efektívnosť chladiarenského cyklu. V literatúre [2] bol uvažovaný tzv. HPC (head pressure control, čiže riadenie tlaku na výstupe z kompresora). Pri tomto spôsobe riadenia sa zapájajú ventilátory jeden po druhom podľa požiadavky. Systém HPC dokáže šetriť energiu na ventilátoroch, ale je neefektívny z hľadiska šetrenia energie na kompresore pri poklese teploty na nižšie hodnoty ako sú dizajnové. Pri nižších teplotách môže dochádzať k výraznému poklesu COP. Zväčšenie efektivity chladienia možno dosiahnuť znížením kondenzačnej teploty a použitím predradených chladičov, ktoré ochladia vzduch ešte pred vstupom do kondenzátora. Na efektívnosť systému majú takisto vplyv otáčky ventilátora, pokiaľ sa systém neprevádzkuje pri maximálnom zaťažení. [2]

V literatúre [2] bol zostavený model systému chladienia pozostávajúci zo skrutkového kompresora a päť skupín ventilátorov, každá obsahujúca štyri ventilátory. Boli uskutočnené porovnania rôznych prípadov, ako HPC s konštantnými otáčkami ventilátora, zaradenie predchladiča a inštalácia ventilátorov s premenlivými otáčkami. Cieľom je čo najviac zvýšiť COP, čo je možné dosiahnuť optimalizáciou systému pozostávajúceho z predchladiča a ventilátorov s premenlivými otáčkami [2]

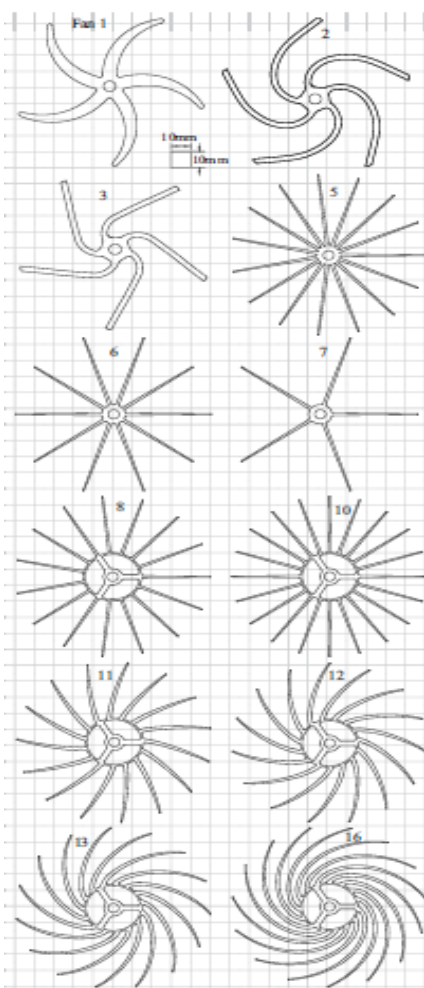
2.3. Chladiče elektroniky

S vývinom výpočtovej techniky a elektroniky všeobecne rastú požiadavky na chladienie týchto systémov. Trendom je zvyšovanie výkonu elektroniky za súčasného znižovania veľkosti. Z tohto dôvodu súčasné chladiace systémy nebudú postačujúce, preto bol navrhnutý nový typ vzduchového chladiča, ktorý je vyobrazený na obrázku č. 2. [4]



Obr. č. 2: Chladič s integrovanými ventilátormi

Skúmal sa odvod tepla ventilátorom umiestneným medzi dvoma diskami. Celá analýza je veľmi komplexná, uvažuje s mnohými geometriami ventilátorov. Všetky tieto geometrie sú znázornené v 10 mm mriežke na obrázku č. 3. [4]



Obr. č. 3: Skúmané typy ventilátorov

Na analýzu boli zavedené bezrozmerné koeficienty, konkrétne koeficient toku, tlaku a výkonový koeficient. Okrem týchto koeficientov sa ešte skúmal tzv. bezrozmerný tok tepla a tiež účinnosť ventilátora. Ako ďalšie kritériá boli zavedené tri geometrické pomery (pomer šírky lopatiek ku vonkajšiemu priemeru, pomer šírky lopatiek ku šírke medzery medzi diskami a pomer vnútorného priemeru statora ku vonkajšiemu priemeru). Na základe tohto boli zostavené korelácie a príslušné závislosti charakterizujúce ventilátory. [4]

Analýza sa týka tiež prestupu tepla v tomto systéme. Zistilo sa, že prestup tepla nezávisí ani tak od geometrie ventilátora, ako skôr od jeho operačného bodu, čiže uhľovej rýchlosti a objemového toku vzduchu. Poznatky z analýzy viedli ku vytvoreniu korelácií vyjadrujúcich bezrozmerný tok tepla, tepelného odporu a mechanického výkonu od príslušných premenných. Výhoda takto navrhnutého systému je, že má nízky tepelný odpor a malý objem, čo umožňuje jeho inštaláciu do príslušných zariadení. [4]

3. Opatrenia predstavujúce úsporu energie pri prevádzkovaní ventilátorov

Pri znižovaní nákladov je dôležité zamerať sa na celý systém, či už na elektromotor, alebo na vzduchotechniku ako celok. Okrem spomínaných aplikácií ventilátorov v systémoch chladenia sa používajú napr. aj na vetranie, kedy je ich úlohou hlavne výmena vzduchu z hľadiska udržiavania požadovanej teploty a koncentrácie CO₂.

Z priemyselného hľadiska sa ventilátory používajú na pohon strojov, v cementárenských peciach a banských systémoch. Keďže ventilátory zabezpečujú vysoký prietok vzduchu a pomerne malý pretlak, energia, ktorú spotrebuje motor, slúži na vytvorenie ťahu a prekonanie strát tlaku spôsobených rozvodmi, filtrami a podobne. Ak sa mení zaťaženie prevádzky, menia sa aj požiadavky na ventilátor. Z tohto dôvodu nemusí ventilátor bežať pri konštantnom výkone, ale jeho reguláciou môžeme dosiahnuť potenciálnu úsporu. Reguláciou rýchlosti ventilátorov môžeme dosiahnuť úsporu elektrickej energie od 25 do 50%. [5]

Ventilátory sa navrhujú pre podmienky, kedy je v systéme maximálny tlakový spád. Toto zodpovedá situácii, kedy je vzduchový filter zanesený tak, že je potrebné ho regenerovať. Z toho vyplýva, že po regenerácii sa v neriadených systémoch dosahuje vyšší prietok vzduchu ako je požadovaný. Keďže oba stavy musia zodpovedať príslušným bodom na charakteristike ventilátora a pri nadizajnovanom stave sa počíta s najlepšou účinnosťou, po vyčistení filtra a odstránení prekážky toku vo forme filtračného koláča môže dôjsť k zvýšeniu spotreby energie na ventilátore. Čím je pracovný bod vzdialenejší od projektovaného, tým je aj účinnosť ventilátora nižšia. Tento jav je možné odstrániť pridaním klapky na saní ventilátora. Ak je regulácia klapky efektívna, ventilátor môže byť konštantne prevádzkovaný na projektovanom operačnom bode. Vďaka tomu bude aj spotreba energie počas chodu ventilátora prakticky konštantná. [5]

Ďalším riešením môže byť inštalácia frekvenčného meniča, čím je možné riadiť rýchlosť ventilátora. V tomto prípade tiež dôjde k odchýlke od projektovaného pracovného bodu a teda aj zhoršeniu účinnosti, ale tým, že je v systéme potrebné prekonať nižší rozdiel tlakov dochádza aj k nižšej spotrebe energie. Pri inštalácii frekvenčných meničov však treba brať do úvahy dobu návratnosti investície, ktorá závisí od požadovaných zmien prietoku vzduchu a od nákladov na elektrickú energiu, avšak vo väčšine prípadov nepresiahne dva roky. Taktiež

platí, že doba návratnosti klesá s rastúcou veľkosťou systému. Podrobný prehľad o nákladoch spojených s inštaláciou frekvenčného meniča je v literatúre [5].

Hlavnú úsporu predstavuje ušetrená elektrická energia na elektromotore, treba sa však zamerať aj na iné miesta, ktoré dokážu potenciálne ušetriť náklady. Štatisticky sú to najmä úniky zo systému, poškodené tesnenia a neuzavreté nepoužívané rozvody, nánosy prachu a nečistôt na ventilátoroch a miestach odkiaľ by sa mohli dostať do systému. Úspora sa dá taktiež dosiahnuť vhodným plánovaním údržieb, prípadným nahradením predimenzovaných ventilátorov a hnacích sústav za efektívnejšie jednotky. [3]

Záver

Ventilátory majú v praxi široké uplatnenie. Aby boli systémy obsahujúce ventilátory navrhnuté čo najefektívnejšie, je potrebné vykonať určité analýzy. Na tento účel je vhodné použiť metódu CFD. Táto metóda je komplexná a dokáže veľmi dobre opísať reálny tok vzduchu ventilátorom. Metóda má však nevýhodu v tom, že je pomerne časovo a výpočtovo náročná. Pre dizajn ventilátorov je možné použiť korelácie uvedené v literatúre, vďaka ktorým môžeme získať informácie o účinnostiach a iných parametroch ventilátora.

Taktiež je dôležité sa zamerať na už inštalované systémy a určiť, či by nebolo namieste vykonať určité úpravy, ktoré by nám pomohli znížiť spotrebu energie a optimalizovať chod zariadenia.

Odporúčaná literatúra

- [6] Saidur R., a kol.: Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, rok 2012, str. 543-550
- [7] Lee Y.-T., Lim H.-Ch.: Performance assessment of various fan ribs inside a centrifugal blower, *Energy* 94, rok 2016, str. 609-622
- [8] Duvenhage K. a kol.: Flow distortions at the fan inlet of forced draft air-cooled heat exchangers, *Applied Thermal Engineering* 16, rok 1996, str. 741-752
- [9] Li Ch. a kol.: Performance, aeroacoustics and feature extraction of an axial flow fan with abnormal blade angle, *Energy* 103, rok 2016, str. 322-339
- [10] Kröger D.G.: Fan performance in air-cooled steam condensers, *Heat Recovery Systems and CHP* 14, rok 1994, str. 391-399