

Vizualizacijska metoda merjenja deformacije lopatic aksialnih ventilatorjev *

Matjaž EBERLINC, Marko HOČEVAR, Stane PIVK, Brane ŠIROK

Izveček: Lopatice ventilatorja se zaradi sil, ki delujejo nanje, med obratovanjem deformirajo. Stacionarne deformacije in fluktuacije lopatičnega vrha – temena okoli ravnotežne lege omogočajo oceno obremenitve lopatice na lokaciji pritrditve, v korenu in oceno vpliva deformacije na aerodinamske lastnosti ventilatorja. V prispevku je predstavljena metodologija merjenja deformacije lopatice aksialnih ventilatorjev, zasnovane na računalniško podprti vizualizaciji. Preizkus je bil izveden na aksialnem ventilatorju z osnovno in spremenjeno izvedbo vpetja lopatic. Merjenje je bilo opravljeno na za to namenjenem preizkuševališču na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani, kjer smo s kamero zajemali digitalizirane posnetke v izbranih časovnih intervalih. Deformacije ventilatorske lopatice so bile merjene v optimalni obratovalni točki ventilatorja za oba opazovana primera vpetja lopatic. Na temenu profila lopatice so bili vrednoteni odmiki izbranih točk – markerjev glede na referenčno točko na ohišju ventilatorja. V okolju programske opreme MatLab je bil izdelan program prepoznavanja markerjev in izračunavanja deformacij lopatic rotorja ventilatorja. Z razvito vizualizacijsko metodo je bila izvedena primerjalna analiza obeh načinov vpetja lopatic v pestu ventilatorja. Potrjena je bila primernost uporabljene eksperimentalne metode, ki omogoča enostavno in zanesljivo zaznavanje deformacij rotorskih lopatic.

Ključne besede: aksialni ventilator, lopatica, deformacija, vizualizacija,

1 Uvod

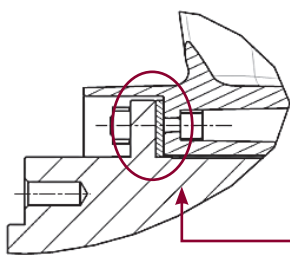
Ocene deformacij sestavnih elementov turbinskih strojev so izrednega

Matjaž Eberlinc, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; doc. dr. Marko Hočevvar, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Stane Pivk, univ. dipl. inž., Hidria Rotomatika, d. o. o., Idrija; prof. dr. Brane Širok, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

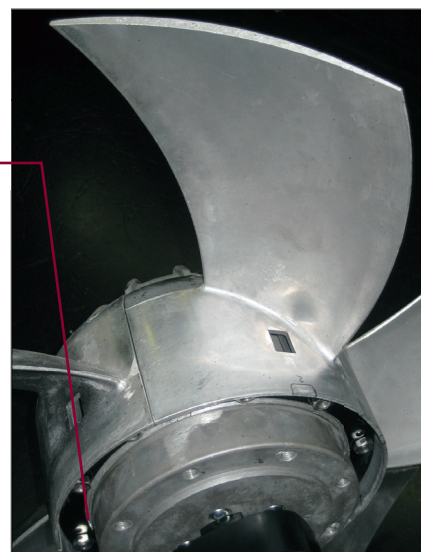
* Raziskave so bile sofinancirane iz evropskega sklada za regionalni razvoj v okviru projektov z naslovom *Razvoj inovacijskega okolja slovenske industrije za klimatizacijo, gretje in hlajenje; Razvoj elementov energetske varčnih in okolju prijaznih KGH sistemov.*

pomena, saj lahko z njimi napovemo obremenitvena stanja in vplive deformacij na delovne karakteristi-

ke strojev. Kot primer je v prispevku predstavljen vpliv vpetja lopatic na pesto ventilatorja na deformacije lopatic, ki lahko zaradi obremenitev vodijo v porušitev ventilatorja. Na izbranem primeru aksialnega ventilatorja Ø630 mm s petimi profiliranimi lopaticami, je bilo pri osnovni izvedbi vpetja ocenjeno preseganje dopustnih deformacij [1]. Predložena je bila korekcija konstrukcijske rešitve, kot je prikazano na *sliki 1*. V področju pesta ventilatorja je bil dodan vijačni spoj konzolno vpetih lopatic na ko-

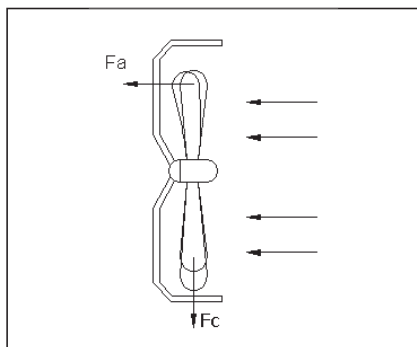


ksialni obroč, ki zmanjšuje deformacijo lopatic.



Slika 1. Konstrukcijska rešitev vpetja ojačitvene prirobnice med lopatico in motorjem ventilatorja [1]

Na lopatice v stacionarnem obratovalnem režimu delujeta centrifugalna in tlačna sila. Centrifugalna sila deluje zaradi rotirajočih mas in je usmerjena radialno s prijemališčem v težišču lopatice (slika 2), tlačna sila, pa je posledica tokovnih razmer v pretočnem traktu aksialne kaskade rotorja. Rezultanto tlačnih sil lahko razdelimo na aksialno in obodno komponento. Aksialno silo lahko ocenimo na osnovi tlačne razlike pred rotorjem ventilatorja in za njim in je posledica obratovalne točke, obodno komponento pa lahko ocenimo z momentom na gredi ventilatorja [2]. Pri tem je potrebno poudariti, da navedena integralna analiza ne poda prijemališča rezultante tlačnih sil, kar onemogoča oceno obremenitvenega stanja na mestih pritrditve lopatic. Prav tako je potrebno poudariti, da so ventilatorske lopatice izpostavljene tlačnim fluktuacijam kot posledica turbulentne narave toka. Tlačne motnje so značilen generator nihanja lopatic okoli ravnovesne lege. Intenziteta nihanja vpliva na napetostna stanja v spojih lopatic na pesto.

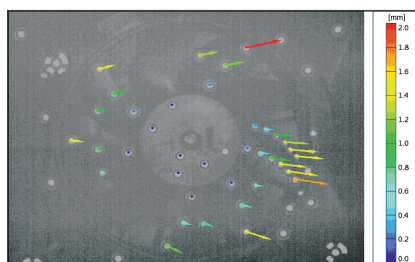


Slika 2. Deformacija zaradi aksialne in centrifugalne sile

Prav zaradi prisotnosti nestacionarnih obremenitev na lopaticah je napoved obremenitvenih stanj zelo omejena.

Ena od možnih metod napovedovanja obremenitvenih stanj je numerično modeliranje tokovnih razmer, kjer se modelirana tlačna porazdelitev iterativno vključuje preko robnih pogojev v numerični model napetostnih stanj v lopatici rotirajoče kaskade turbinskega stroja. Ta metoda je numerično zahtevna in nezanesljiva pri napovedovanju fluktuacijskih

učinkov lopatične strukture. Zato se v tehnični praksi pogosto uporabljajo eksperimentalne metode merjenja deformacij [6], [7]. V zadnjem času se pojavljajo tudi metode, ki temeljijo na računalniško podprti vizualizaciji deformacijskih stanj [8], ki omogočajo ocenjevanje časovno spremenljivih deformacij. Uporabna je metoda, ki je predstavljena v prispevku [3], kjer je bila uporabljena oprema podjetja GOM GmbH iz Braunschweiga [4]. Rezultati te metode so predstavljeni na sliki 3.



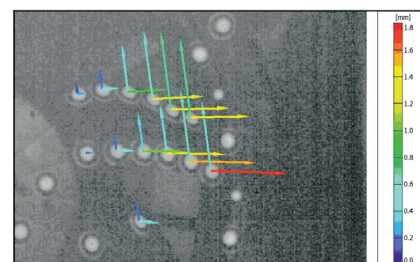
Slika 3. Analiza deformacije aksialnega ventilatorja v smeri z in z-x [4]

Ta metoda je bila uporabljena za ocenjevanje relativnih deformacij lopatic v prečni ravnini ventilatorja. V prispevku pa je analiza usmerjena predvsem v ocenjevanje absolutnih odmikov markerjev v meridianski ravnini pretočnega polja, ki omogoča določitev deformacij temena lopatice glede na referenčno točko, ki je izbrana na ohišju ventilatorja. Da bi na primeru aksialnih ventilatorjev ocenili kinematiko lopatic okoli spremenjenih ravnovesnih leg, smo razvili vizualizacijsko metodo, ki omogoča prepoznavanje lege markerjev v izbranih časovnih intervalih glede na referenčno točko. Ti podatki omogočajo v nadaljevanju statistično vrednotenje deformacijskih stanj na opazovani lopatici. Analiza je bila usmerjena v študijo deformacije ventilatorske lopatice v optimalnem delovnem režimu ventilatorja pri obeh konstrukcijskih izvedbah vpetja. Vizualizacija deformacij in fluktuacije lopatičnega vrha okoli ravnotežne lege omogoča oceno obremenitve lopatice na lokaciji pritrditve in oceno vpliva deformacij na aerodinamske lastnosti ventilatorja. Namreč, če so deformacije prevelike, se pojavita tudi vpliv spremenjene oblike lopatice in obtekanje toka, kar ima za posledico spremenjeno aerodinamsko karakteristiko ventilatorja.

Prispevek predstavlja zlasti računalniško podprto vizualizacijsko metodo na primeru aksialnih ventilatorjev, ki je zaradi univerzalnosti primerna tudi za druge podobne primere.

2 Potek meritev

V Laboratoriju za vodne in turbinske stroje na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so bile opravljene meritve na ventilatorju $\varnothing 630$ mm s petimi profiliranimi lopaticami z



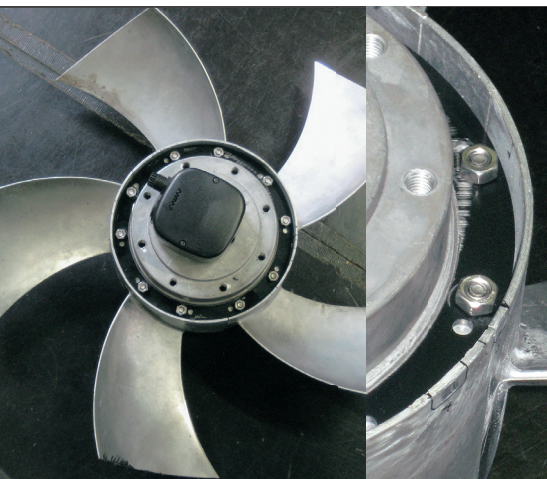
osnovno rešitvijo vpetja lopatice v pesto ventilatorja (tip I – slika 4a) in spremenjeno izvedbo vpetja z dodatno pritrditvijo lopatic preko koaksialnega obroča (tip II – slika 4b). Obratovalni pogoji obeh ventilatorjev so bili enaki in so bili določeni z integralnimi parametri:

- vrtiljaji motorja ventilatorja: $n = 1344 \text{ min}^{-1}$,
- razlika statičnega tlaka na ventilatorju: $\Delta p_s = 241 \text{ Pa}$,
- gostota zraka: $\rho = 1,15 \text{ kg/m}^3$.



Slika 4a. Aksialni ventilator tip I, brez obroča

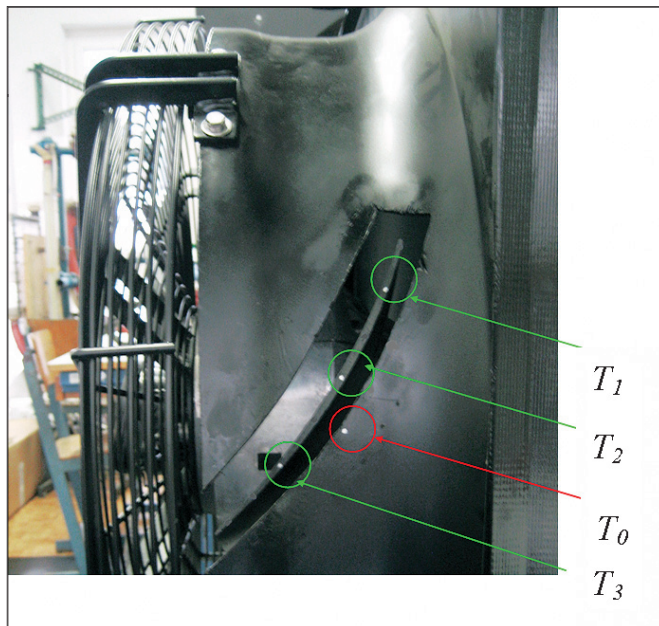
Poskus je bil opravljen na merilni postaji, ki jo prikazuje slika 5. Meritve so bile izvedene v skladu s priporočili standarda ISO 5151:1994 [13].



Slika 4b. Aksialni ventilator tip II, z obročem

Merjene so bile razlike statičnega tlaka na ventilatorju in vrtilne frekvence rotorja. Na osnovi teh podatkov je bilo moč nastaviti želeno delovno točko ventilatorja, pri kateri so bile izvedene meritve deformacij lopatic. Na ustju – ohišju ventilatorja je bila

izrezana odprtina, tako da je bilo vidno teme lopatice, kot je prikazano na *sliki 6*. Za zajemanje slik je bila uporabljena kamera Dragonfly Express IEEE-1394 [9], [10] z objektivom Pentax Precision Co. B25140, 25 mm. Kamera je bila prožena z induktivnim zaznavalom, ki je bilo tik ob pestu pred ventilatorjem. S tem je bila dosežena ponovljivost položaja lopatice pri prehodu skozi izrezano odprtino v ohišju ventilatorja glede na izbrano

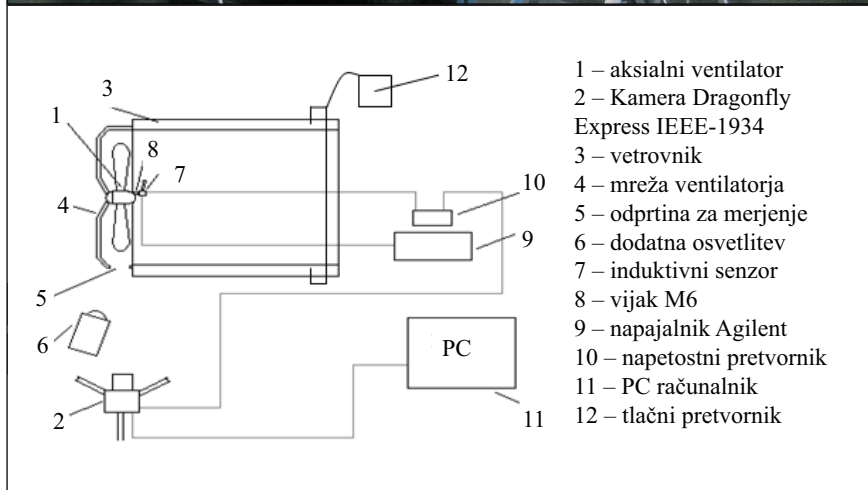
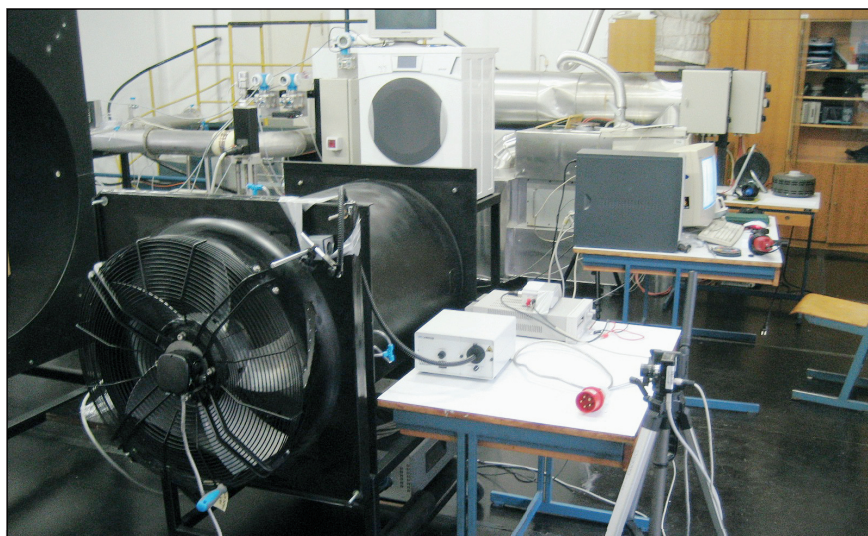


Slika 6. Položaj merjenja lopatice aksialnega ventilatorja

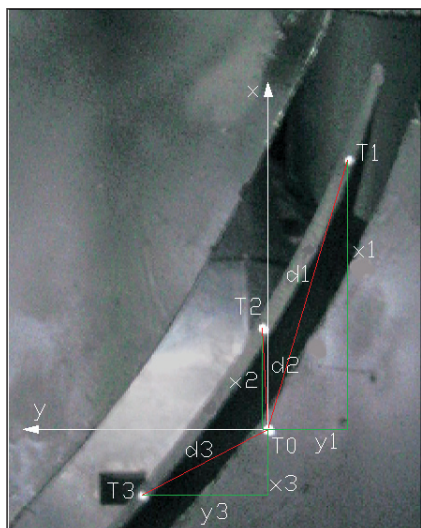
referenčno točko na ohišju (točka T_0 na *sliki 6*). Induktivno zaznavalo je bilo napajano z napajalnikom Agilent E3620A. Digitalizirani posnetki so bili posneti s proženjem kamere v izbranih časovnih intervalih, ki so pripadali izbrani poziciji lopatice. Za kontrolirano zajemanje digitaliziranih posnetkov je bil uporabljen programski paket LabView [11]. Posnetki pa so bili procesirani s pomočjo programskega paketa MatLab [12]. Za vsak obravnavani primer je bilo vzorčenih 150 zaporednih slik, kar zadošča za statistično oceno – časovno povprečne deformacije lopatice, histogram deformaciji in pripadajoči standardni odklon fluktuacij okoli srednje vrednosti.

Izbrane so bile 3 točke – markerji (T_1 , T_2 in T_3) na temenu lopatice, ki omogočajo oceno translatornih in rotacijskih odmikov izbranih točk glede na referenčno točko T_0 na *sliki 6*.

Odnos med stacionarno točko T_0 na ohišju ventilatorja in točkami T_1 , T_2 in T_3 na temenu lopatice je prikazan na *sliki 7*. Postavljen je koordinatni sistem z izhodiščem v točki T_0 . Točke na temenu lopatice T_i ($i = 1, 2, 3$) pa so glede na izbrani koordinatni sistem podane s koordinatama x_i , y_i . Položaj točk na temenu lopatice je določen v trenutku proženja kamere, ki se izvede z magnetnim induktivnim zaznavalom (*slika 5*, točka 7).



Slika 5. Shema preizkuševališča



Slika 7. Shematski prikaz načina izbire točk pri analizi, izdelan s programskim paketom AutoCad

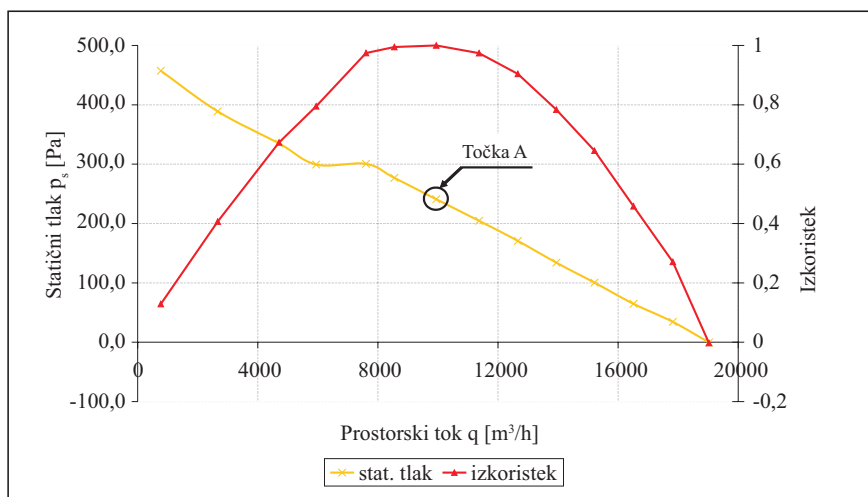
(»pikslov«). Čas zaklopa kamere je znašal 0,2 ms. Izbrani objektiv je imel zorni kot $8,23^\circ$. Kamera je bila postavljena pravokotno na os merjenja temena lopatice v razdalji 1 m od vetrovnika, kot je prikazano na sliki 5, točka 2. Uporabljen je bil asinhroni prenos podatkov. Za doseganje večjega barvnega kontrasta med površino temena ventilatorske lopatice in markerji je bil vrh lopatice pobarvan z mat črno barvo. Osvetlitev temena lopatice pa je bila izvedena tako, da je bil odboj svetlobe v izbranem polju najmanjši.

Negotovost meritve se nanaša predvsem na oceno vpliva časovnega zamika hitre kamere pri proženju in zajemanju digitalizirane slike lopatice. Preprostejša je ocena me-

tic pa lahko razčlenimo le na osnovi posameznih korakov predstavljene metode. Izhajamo iz obodne hitrosti temena lopatice, premera rotorja ventilatorja in frekvence zajemanja signala induktivnega senzora, ki proži digitalno kamero. Največja možna absolutna merilna negotovost znaša $0,038^\circ$, kar lahko ob predvidenih največjih deformacijah lopatic za cca 3° ne presega relativne merilne negotovosti $u_v = 1,3\%$.

3 Analiza deformacij

Pri analizi deformacij ventilatorskih lopatic, ki je bila izvedena na osnovi merjenja razdalj med referenčno točko T_0 na ohišju ventilatorja in točkami – markerji T_1, T_2, T_3 na temenu ventilatorske lopatice, je bila uporabljena metoda računalniško podprte vizualizacije. Algoritmi prepoznavanja digitaliziranih slikovnih vzorcev – markerjev ter izračun položaja markerjev so bili izdelani v programskem okolju MatLab. Algoritem prepoznavanja položaja markerjev v prostoru in času je bil usmerjen v zaznavanje posameznega markerja na temenu lopatice in v nadaljevanju v določanje središčne točke markerja, ki podaja trenutno koordinato markerja glede na izhodiščno točko T_0 (slika 9). Področja izven merilnega območja smo v fazi obdelave podatkov izločili, kar je omogočilo hitrejšo obdelavo digitaliziranih slikovnih vzorcev [5].

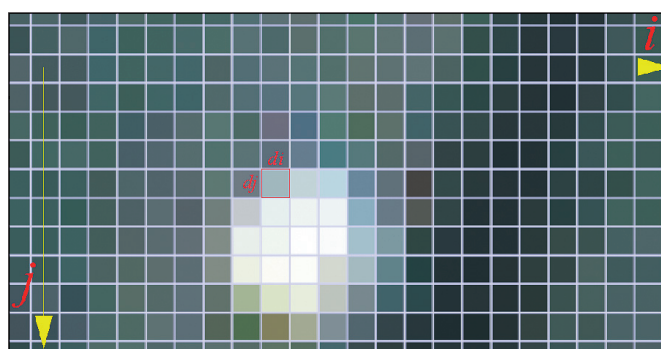


Slika 8. Integralna karakteristika aksialnega ventilatorja [1]

Da bi dosegli primerljivost rezultatov med obema izvedbama ventilatorja, je bil preizkus izveden pri enakih obratovalnih pogojih. Na sliki 8 je prikazana delovna karakteristika ventilatorja $\varnothing 630$ mm s petimi profiliranimi lopaticami, ki je bila izmerjena v podjetju Hidria Rotomatika [1]. V diagramu je podana delovna točka A, pri kateri so bile izvedene meritve deformacij. Iz diagrama je bila v točki A določena razlika statičnega tlaka Δp_s , ki je bila uporabljena kot referenčni parameter na vetrovniku (slika 5, točka 3). Tlačna razlika je bila merjena s tlačnim pretvornikom Endress + Hauser Deltabar S PMD75.

S hitro kamero je bila posneta 8-bitna slika, velikosti 640×484 elementov

rilne negotovosti določanja izbranih obratovalnih točk ventilatorja. Ta je pogojena predvsem z določanjem vrtilne frekvence, ki je v skladu z ISO/WD 5801 ocenjena z $u_N = 0,2\%$, merjenjem tlačne razlike na ventilatorju $u_p = 1,4\%$ in določanjem gostote v zračnem toku, ki je v primeru, da so upoštevani postopki po standardu, enaka $u = 0,4\%$. Merilno negotovost vizualizacijske metode deformacije lopa-



Slika 9. Povečan digitalizirani posnetek

Glede na to, da je bila digitalizacija izvedena z 8-bitno ločljivostjo, se vrednost celoštevilčne spremenljivke $E_p(i, j, t)$ v enačbi (1), ki predstavlja raven sivine celice (»pikslov«) (i, j) v času t , nahaja v razponu:

$$E_p(i, j, t) \in \{0, \dots, 255\} \quad (1)$$

Indeksa i in j elementa E digitalizirane slike predstavljata položaj elementa, kot je prikazano na sliki 9. V opazovanem polju so oblikovane celice – okna velikosti (d_i, d_j) , kjer d_i in d_j predstavljata velikost okna.

Za posamezno sliko v sekvenci digitaliziranih posnetkov temena lopatice je bila izračunana skalarna celoštevilčna funkcija $f(i, j)$, zapisana z enačbo (2):

$$f(i, j) = \frac{1}{d_i} \frac{1}{d_j} \sum_{i_p=1}^{d_i} \sum_{j_p=1}^{d_j} E_p \cdot (i_c + i_p, j_c + j_p) \quad (2)$$

kjer sta i_c in j_c koordinati izbranega okna. Vrednost sivine E_p v točki (i, j) ima mejne vrednosti od 0 (črna barva) do 255 (bela barva). V opazovanem območju slike 9 se funkcija $f(i, j)$ značilno spremeni pri prehodu iz črnega v belo polje, ki pripada markerjem – točkam T_0, T_1, T_2 in T_3 . Da bi določili robove markerjev, se v naslednjem koraku izračuna gradient spremenljivke $f(i, j)$:

$$\nabla f(i, j) = \begin{bmatrix} \nabla f_i(i, j) \\ \nabla f_j(i, j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(i, j)}{\partial i} \\ \frac{\partial f(i, j)}{\partial j} \end{bmatrix} \quad (3)$$

kjer maksimalna skalarna vrednost enačbe (3) omogoča določitev roba markerjev:

$$\|\nabla f(i, j)\| = \max \left[\sqrt{\left(\frac{\partial f(i, j)}{\partial i} \right)^2} + \sqrt{\left(\frac{\partial f(i, j)}{\partial j} \right)^2} \right]_{j=\text{konst}}, \quad \begin{matrix} i_k = i, \\ j_k = j. \end{matrix} \quad (4)$$

Točke v enačbi (4) s koordinatami (i_k, j_k) tvorijo sklenjeno zvezno krivuljo konture markerja, kjer je N število elementov, ki jo tvorijo. Postopek določitve konture markerja pa je enak za vse opazovane točke T_0, T_1, T_2 in T_3 . V zadnjem koraku je izračunano težišče konture izbranega markerja T_k , ki je podan z enačbo (5):

$$T_{k,i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k$$

$$T_{k,j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N j_k$$

$$k \in \{1, 2, 3\}$$

Tako položaj kot razdalje med markerji na temenu lopatice in markerjem T_0 na ohišju ventilatorja se spreminjajo s časom. Iz analiz časovno zaporednih digitaliziranih posnetkov se lahko izvede vrednotenje fluktuacij odmikov markerjev, kar omogoča oceno povprečenih deformacij temena lopatice in oceno intenzivnosti fluktuacij trenutnih odmikov opazovanih točk glede na časovno povprečeno deformacijsko sliko.

Za pretvorbo enot iz elementov slike (»piksel«) v dolžinsko enoto (mm) je bilo iz digitaliziranega posnetka v primeru, ko je ventilator miroval, in izmerjene razdalje med dvema točkama na ohišju ventilatorja

izračunano razmerje $l = 0,284$ po enačbi (6):

$$x_k = T_{k,i} \cdot l,$$

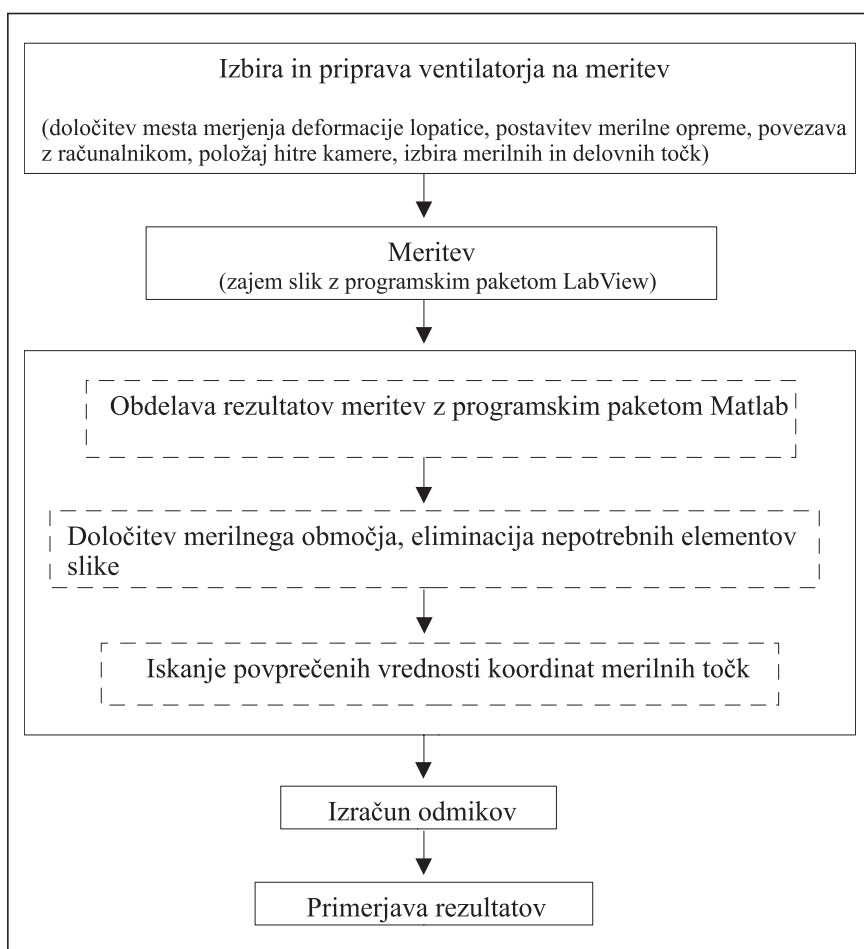
$$y_k = T_{k,j} \cdot l, \quad (6)$$

kjer sta vrednosti za x_k in y_k podani v mm.

Na osnovi predstavljenih algoritmov so bile v prispevku izračunane srednje vrednosti odmikov temena lopatice in pripadajoči histogrami ter standardni odkloni odmikov od srednje vrednosti deformacij. Celoten postopek merjenja in obdelave podatkov je prikazan na blokovnem diagramu (slika 10).

4 Rezultati meritev

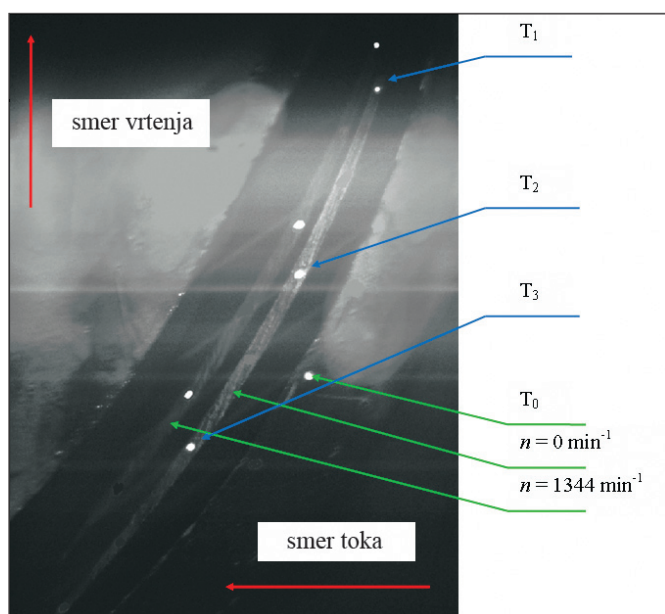
Pri obratovalnih pogojih, ki so podani s točko A na delovni karakteristiki ventilatorja, ki je prikazana na sliki 8, sta bili posneti dve sekvenci digitaliziranih posnetkov. Prva sekvenca je bila posneta z osnovno rešitvijo vpetja lopatice v pestu ventilatorja



Slika 10. Blokovni diagram poteka meritev in obdelave podatkov

(tip I – slika 4a), druga sekvenca pa je bila posneta na spremenjeni izvedbi vpetja z dodatno pritrditvijo lopatic preko koaksialnega obroča (tip II – slika 4b).

Na *sliki 11* je prikazana kvalitativna primerjava rotorja ventilatorja v mirovanju ($n = 0 \text{ mm}^{-1}$) in rotorja ventilatorja pri $n = 1344 \text{ mm}^{-1}$ v delovni točki A (*slika 8*). Za lažji prikaz odmika lopatice sta posnetka lopatic v dveh različnih delovnih točkah združena s pomočjo programskega paketa MatLab v eno sliko, kot to prikazuje *slika 11*. Na *sliki* so prikazani položaji me-rilnih točk T_1 , T_2 in T_3 .



Slika 11. Primerjava položaja lopatic aksialnega ventilatorja v dveh delovnih točkah ($n = 0$ in 1344 min^{-1})

Prikazana je referenčna točka T_0 na ustju ventilatorja, ki miruje v obeh delovnih točkah ventilatorja. Na *sliki* je označena tudi smer vrtenja lopatice in smer zračnega toka skozi ventilator. Na *sliki* se vidi odklik lopatice vzdolž njenega temena. Vidna je značilna deformacija lopatice, ki se odraža tako v odkliku kot v zasuku njenega temena.

Kvantitativna analiza temelji na metodologiji določanja položajev markerjev glede na referenčno točko T_0 , kot je to predstavljeno v poglavju 3. V prvem koraku so določene dolžine med merjeno in referenčno točko. Izračunane so bile dolžine med točkami T_1 , T_2 , T_3 in točko T_0 v dveh delovnih točkah

ventilatorja ($n = 0$ in 1344 min^{-1}) za primer tipa I in tipa II, kot je predstavljeno na *sliki 7*. Časovno povprečni odkliki in standardni odkloni so podani v normirani obliki (enačba 7):

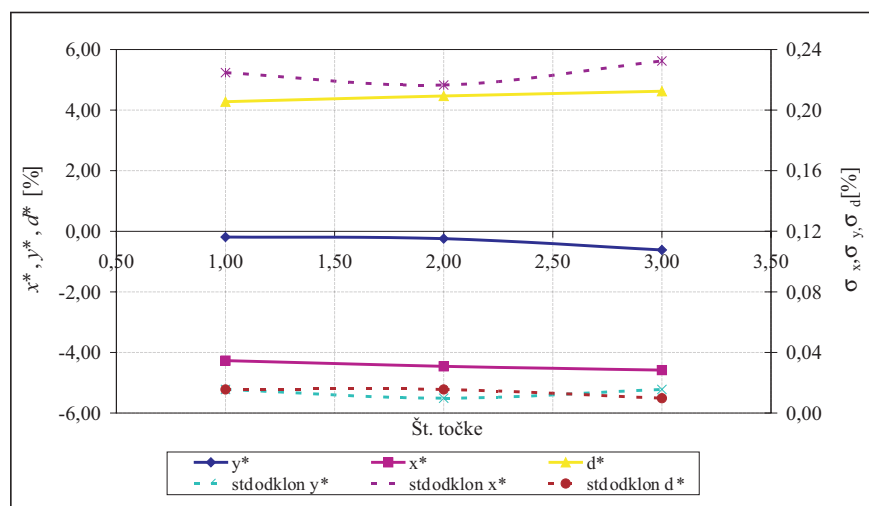
$$\begin{aligned} x^* &= \frac{x}{R_o} \cdot 100\%, y^* = \frac{y}{R_o} \cdot 100\%, d^* \\ &= \frac{d}{R_o} \cdot 100\%, \\ \sigma_x^* &= \frac{\sigma_x}{R_o} \cdot 100\%, \sigma_y^* = \frac{\sigma_y}{R_o} \cdot 100\%, \sigma_d^* \\ &= \frac{\sigma_d}{R_o} \cdot 100\%, \end{aligned} \quad (7)$$

kjer je R_o polmer rotorja ventilatorja.

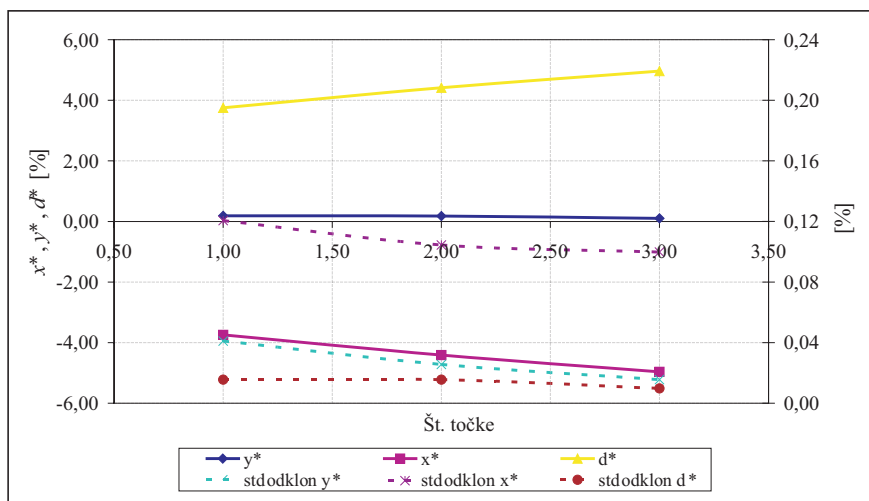
Na *sliki 12* in *13* so predstavljeni normirani odkliki markerjev za oba primera vpetja lopatic ventilatorja tipa I in tipa II. Na osnovni osi so podani časovno povprečni odkliki x^* , y^* in d^* za točke T_1 , T_2 in T_3 . Na sekundarni osi pa so podani pripadajoči normirani standardni odkloni σ_x^* , σ_y^* , σ_d^* .

Pri ventilatorju tip I in tip II je bil znan podoben odklik v vseh smereh koordinatnega sistema (*slika 7*). V smeri abscisne osi x je zaznan odklik temena lopatice proti smeri izstopajočega toka. Na vstopnem robu lopatice je zaznan manjši odklik kot na izstopnem robu lopatice. Ta pojav vpliva na spremembo vstopnega kota lopatice in posredno na aerodinamsko karakteristiko ventilatorja. V smeri osi y (*slika 7*) so odkliki minimalni, kar je posledica vpetja in oblike lopatice. Skupni odklik d^* , ki je sestavljen iz odklika v obeh zgoraj navedenih smereh, je predstavljen na *sliki 12* in *13*. Ob primerjavi deformacij na obeh opazovanih konstrukcijskih rešitvah, ki so prikazane na *sliki 12* in *13*, lahko ugotovimo, da so odkliki pri spremenjeni konstrukcijski rešitvi z obročem (*slika 4b*) manjši. Ta razlika ni značilna.

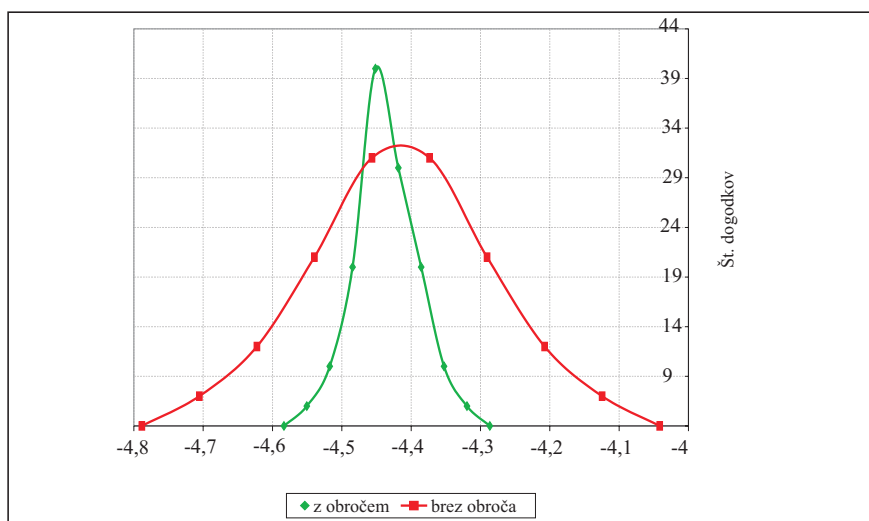
Razlika med obema izvedbama vpetja pa je opazna pri analizi fluktuacij odklikov okoli ravnovesnih leg. Na *sliki 14* je predstavljena primerjava med histogramoma fluktuacij odklikov obeh tipov v točki T_2 v smeri osi x . Iz histograma je enako kot na *sliki 12* in *13* razvidno neznačilno zmanjšanje srednjega odklika lopatice in zmanjšanje fluktuacij odklikov v primeru korigiranja vpetja lopatice z obročem. Zmanjšana fluktuacija bistveno prispeva k zmanjšanju napetostnih stanj v korenu lopatice, kar potrjuje smotrnost uvajanja nove konstrukcijske rešitve vpetja.



Slika 12. Odmiki in standardni odkloni za tri merilne točke v dveh delovnih točkah ($n = 0$ in 1344 min^{-1}) za ventilator tipa I brez obroča



Slika 13. Odmiki in standardni odkloni za tri merilne točke v dveh delovnih točkah ($n = 0$ in 1344 min^{-1}) za ventilator tipa II z obročem



Slika 14. Histogram porazdelitve časovno povprečenih odmikov v normirani obliki za merilno točko 2 v x-smeri

5 Sklep

V prispevku smo prikazali smotrnost konstrukcijske rešitve vpetja lopatice na rotor ventilatorja, ki smo mu dodali ojačitveni obroč, ki zmanjšuje deformacije ventilatorske lopatice. S tem namenom smo predstavili metodologijo merjenja deformacije lopatice aksialnega ventilatorja in razvili eksperimentalno metodo, ki je bila zasnovana na računalniško podprti vizualizaciji. Metoda temelji na zajemanju digitaliziranih posnetkov temena lopatice, prepoznavanju slikovnih struktur – markerjev in določanju deformacij temena lopatice. Z razvito vizualizacijsko metodo je bila izvedena primerjalna analiza obeh načinov vpetja lopatic v pestu ventilatorja. Potrjena je bila

primernost uporabljene eksperimentalne metode, ki omogoča enostavno in zanesljivo zaznavanje deformacij rotorskih lopatic. Ta metoda je primerna za podobne tehnične aplikacije.

Literatura

- [1] PIVK, Stane, MAGAJNE, Aleš, TOMINEC, Uroš. *Meritve aerodinamskih lastnosti aksialnih ventilatorjev premera 630 mm*: julij 2006. Sp. Idrija, Hidria Rotomatika, d. o. o.
- [2] Wallis, R. Allan. *Axial flow fans and ducts*, John Wiley & sons, 1983.
- [3] Tvrčkovi, D., Baršič, Z., Hercigonja, T. *Primjena optičkih metoda merjenja dimenzija*

kod revitalizaciji hidroenergetskih postrojenja, NDT - Competence & Safety, HDKBR/CrSNDT, Zagreb, 2004.

- [4] GOM, Optical Measuring Techniques, *High Speed Deformation Analysis of a Cooling Fan*, <http://www.gom.com/>.
- [5] ŠIROK, Brane, BAJCAR, Tom, DULAR, Matevž. Reverse flow phenomenon in a rotating difuser. *J. flow vis. image process*, 2002, letn. 9, no. 2/3, str. 193–210. [COBISS.SI-ID6030875]
- [6] KUNC, Robert, PREBIL, Ivan, HOČEVAR, Marko, ŠIROK, Brane. Trdnostna analiza rotorja ventilatorja borbenega vozila = Strength analysis of a combat vehicle fan rotor. *Stroj. vestn.*, 1999, letn. 45, št. 12, str. 533–541. [COBISS.SI-ID 3530011]
- [7] ŠIROK, Brane, HOČEVAR, Marko, ZUPAN, Samo, PREBIL, Ivan. Študija dinamičnih karakteristik sklopa radialnega rotorja in vleženja ventilatorja hladilnega sistema borbenih vozil M 84 in T 72 = Study of radial rotor and bearing arrangement dynamic properties of the combat vehicles M 84 and 72 cooling system fan. *Stroj. vestn.*, 1999, letn. 45, št. 11, str. 432–441. [COBISS.SI-ID 3450907]
- [8] ŠIROK, Brane, POTOČAR, Erik, NOVAK, Matej. Analiza kinematike toka za utripajočim profilom spremenljive geometrijske oblike z uporabo računalniške vizualizacije = Analysis of the flow kinematics behind a pulsating adaptive airfoil using computer-aided visualisation. *Stroj. vestn.*, 2000, letn. 46, št. 6, str. 330–341. [COBISS.SI-ID 3894043]
- [9] Dragonfly Express™, IEEE-1394b Digital Camera System Manual, Point Grey Research Inc. 2006, Document revised June 15, 2006.
- [10] OVERTON, M. *Numerical Computing with IEEE Floating Point Arithmetic*, SIAM, Philadelphia, 2001.
- [11] National Instruments LabVIEW™, *User Manual*, Part

Number 320999E-01, April 2003 Edition.

[12] HIGHAM, D. J., HIGHAM, N. J. *MATLAB Guide*, SIAM, Philadelphia, 2000.

[13] ISO 5151:1994: *Non-ducted air conditioners and heat pumps – Testing and rating for performance*



Visualization method for measuring the deformation of axial-flow fan blades

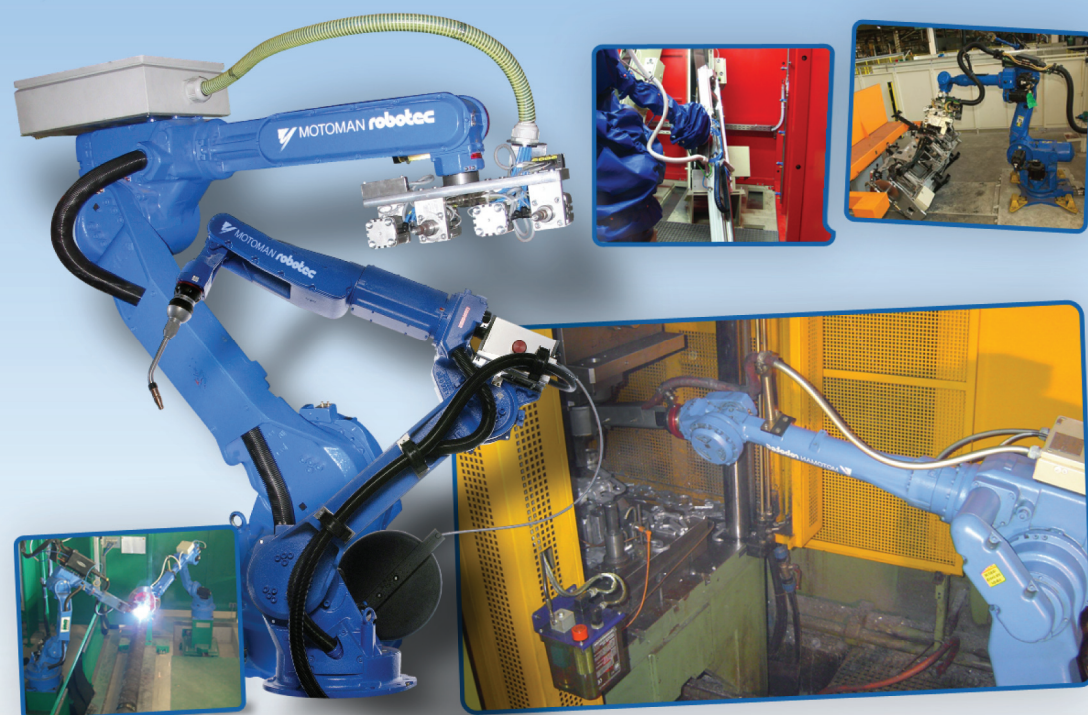
Abstract: Axial-flow fan blades deform during operation due to the various forces that act on them. The steady-state deformation and fluctuation of the blade peak, i.e., the vertex around the poise position, allow us to evaluate the volume of load, where the blade is fixed on the rotor, and assess the influence of the deformation on the aerodynamic characteristics of the axial-flow fan. In the paper we present the methodology for measuring the deformation of the axial-flow fan blade, which is supported by a computer-based visualization. The experiment was carried out on an axial-flow fan, with both basic and modified constructions, where the blade is fixed to the rotor. Measurements were carried out on the measuring station at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, where using a high-speed camera we obtained digital pictures at selected time intervals. The deformations of the axial-flow fan blade were measured at the optimal working point for the axial-flow fan with the basic and modified constructions. On the blade vertex, we evaluated the deviation of the measuring point, in terms of the reference point that is on the fan casing. We have written software in Matlab to recognize the measuring points and to calculate the blade deformation on the vertex of the axial fan blade. With the help of the developed visualization method, we compared results that we got from the axial-flow fan with the basic and modified constructions. The experimental method used in this paper can easily and reliably detect the deformation of the axial-flow fan blade.

Keywords: axial-flow fan, blade, deformation, visualization,



MOTOMAN robotec d.o.o.

Podjetje za trženje, projektiranje ter gradnjo industrijskih robotskih in fleksibilnih sistemov



VODILNI SVETOVNI PROIZVAJALEC ROBOTOV

MOTOMAN ROBOTEC s proizvodnjo 18.000 robotov letno nudi široko paleto implementacij robotov v različna tehnološka okolja

- .varjenja (MIG/MAG, uporabno, TIG)
- .rezanja (laser, plazma, vodni curek)
- .brušenja oz. površinske obdelave
- .strege (CNC obdelovalnih strojev, stružnic)
- .tlačni liv
- .čiščenja odlitkov oz. pobiranja srha
- .montaže
- .paletiranja

Naša strokovna ekipa vam nudi celovito rešitev od idejne izvedbe projekta do zagona, usposabljanja in servisiranja.



SIST EN 45012
C001



ISO 9001
Q-234



1473
EN 45 012

Naslov: Lepovče 23, 1310 Ribnica, SLOVENIJA
Telefon: + 386 (0)1 83 72 410 + 386 (0)1 83 72 350
Telefax: + 386 (0)1 83 61 243 / www.motomanrobotec.si
E-mail: info@motomanrobotec.si