

Zagadnienia metrologiczne w procesie wytwarzania szablonu aerodynamicznego profilu śmigła turbiny wiatrowej

RYSZARD FILIPOWSKI, JÓZEF ZAWORA, MICHAŁ MARCZAK *

W artykule opisano zagadnienia dotyczące pomiarów profilu aerodynamicznego śmigła turbiny wiatrowej za pomocą szablonu, wykonanego z płaskiej stalowej blachy. Szablon stosuje się do sprawdzania poprawności wykonania profilu śmigła na ustalonym promieniu. Profil zadany jest ciągiem punktów. Dla poprawienia dokładności wykonania profilu obliczono dodatkowe punkty profilu. Do tego celu posłużono się programem FERPRF bazującym na krzywych kubicznych Fergusona. Zwiększoną liczbę punktów wprowadzono do programu CHARSDW, który generuje ciąg odcinków i łuków wprowadzanych do systemu AutoCAD. Utworzony w systemie wstępny projekt wycinania profilu, jako plik .dxf, wprowadza się do systemu PEPS CAD/CAM. Postprocesor systemu PEPS tworzy program obróbki w kodzie ISO dla wycinarki Robofil 440SLP. Poprawność wykonania profilu aerodynamicznego mierzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej VIS Warszawa, metodą skanowania sztywną sondą z końcówką walcową.

Wstęp

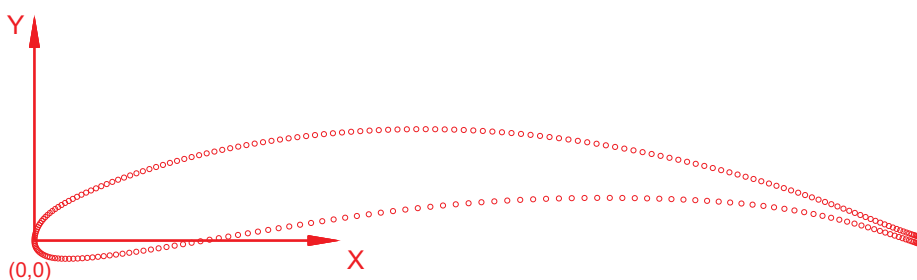
Profil śmigła przedstawiony na rys. 1 jest profilem wklęsło-wypukłym [1, 3] i jest zadany ciągiem 257 punktów. Jest on elementem szablonu przeznaczonego do kontroli przekrojów profilu śmigła na ustalonym promieniu.

Profil jest wycinany na wycinarce drutowej Robofil 440 SLP. Do wycinania

profilu między dwoma punktami przyjęto interpolację liniową (G01), zaś przy dużej krzywiznie interpolację kołową poprzez trzy kolejne punkty (G02, G03). Dla zmniejszenia odchyłki obróbki względem teoretycznego zarysu profilu zwiększono początkową liczbę 257 punktów leżących na profilu do liczby 500 punktów. Zwiększona, w stosunku do procedury opisanej w [4], liczba punktów do 500 poprawiła dokładność wykonania

noska profilu. Do obliczenia zwiększonej liczby punktów na profilu opracowano program o nazwie FERPRF. Program realizuje obliczenia punktów ze stałym krokiem parametrycznym $\Delta=0,002$, za pomocą kubicznych krzywych sklepanych Fergusona (splajnów) [6, 9]. Do zrealizowania ruchu wzdłuż odcinków lub łuków w funkcji zmieniającej się krzywizny profilu, opracowano program o nazwie CHARSDW, który tworzy plik z rozszerzeniem .SCR wczytywany do AutoCAD. W programie AutoCAD tworzy się wstępny projekt obróbki profilu (plik .DXF), który wczytuje się do profesjonalnego programu PEPS CAD/CAM [4]. W systemie tym tworzy się roboczy projekt wycinania profilu, a następnie za pomocą postprocesora generowany jest wolny od błędów kod ISO sterujący pracą wycinarki Robofil 440 SLP podczas wycinania profilu.

Poprawność wykonania profilu aerodynamicznego mierzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej, Koordynatometr XYZ VIS Warszawa, metodą



Rys. 1. Profil wklęsło-wypukły zadany ciągiem 257 punktów w układzie kartezjańskim XY

* Dr inż. R. Filipowski (rfilipowski@meil.pw.edu.pl), dr hab. inż. J. Zawora, dr inż. M. Marczak, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technik Wytwarzania.

skanowania sztywną sondą z końcówką walcową [8].

Algorytm obliczania punktów funkcji Fergusona

Parametryzacja ciągu punktów na profilu

Każdy punkt P_i zapisany w pliku cechują dwie współrzędne (x_i, y_i) w układzie kartezjańskim oraz wskaźnik i położenia współrzędnych w zbiorze. Dodatkowo wprowadza się parametryzację punktów. Polega ona na tym, że każdemu punktowi przypisujemy dodatkowo wartość parametru u_j . Dla wszystkich punktów wartość parametru zmienia się od wartości zero do wartości jeden. Do obliczenia parametru u_j punktu w zbiorze wykorzystano algorytm ilorazów długości linii łamanych. Parametr dla punktu o wskaźniku j oblicza się następująco:

obliczono długość łamanej L wszystkich punktów profilu:

$$L = \sum_{i=1}^{i=n} l_i = \sum_{i=1}^{i=n} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1)$$

obliczono długość łamanej L_j do punktu o wskaźniku j :

$$L_j = \sum_{i=1}^{i=j} l_i = \sum_{i=1}^{i=j} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (2)$$

parametr punktu o wskaźniku j obliczono z ilorazu długości łamanych, wg zależności:

$$u_j = L_j / L \quad (3)$$

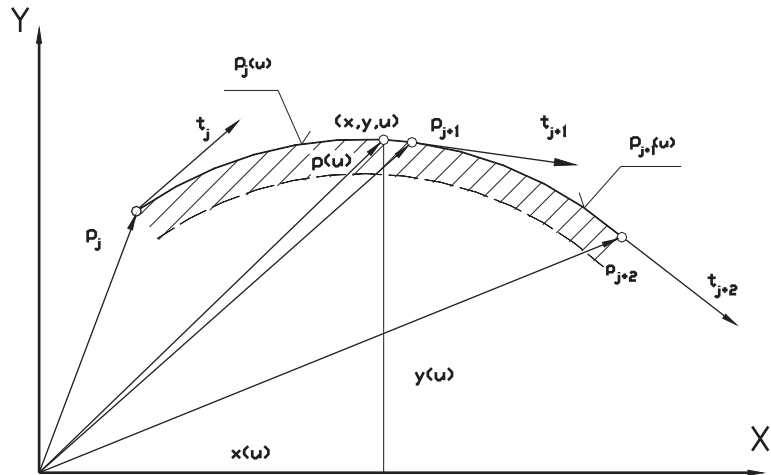
W ten sposób, każdy punkt p_j o wskaźniku j określony jest przez: indeks j , współrzędne kartezjańskie (x_j, y_j) oraz parametr u_j

$$p_j = [jx_j, jy_j, u_j] \quad (4)$$

Funkcje kubiczne Fergusona

Funkcja kubiczna Fergusona [5] jest funkcją parametryczną trzeciego stopnia względem drugiego parametru $\lambda \in (0; 1)$, którą prowadzi się przez dwa kolejne punkty oznaczone przez wektory pozycyjne punktów p_j, p_{j+1} o parametrach u_j, u_{j+1} (rys. 2).

Pomiędzy trzema wektorami punktów p_j, p_{j+1}, p_{j+2} , rozpięte są dwie krzywe kubiczne Fergusona $p_j(u)$ oraz $p_{j+1}(u)$, przy czym parametr w każdej z nich $\lambda \in (0; 1)$.



Rys. 2. Krzywe kubiczne Fergusona przechodzące przez trzy wektory pozycyjne p_j, p_{j+1}, p_{j+2} , oraz trzy wektory styczne t_j, t_{j+1}, t_{j+2} ; punkt na krzywej określa wektor pozycyjny $p(u)$ dla $u \in (0; 1)$

Funkcja kubiczna Fergusona $p_j(u)$

Funkcja kubiczna Fergusona [6, 9] $p_j(u)$ rozpięta między wektorami punktów p_j, p_{j+1} ma postać:

$$p_j(u) = \begin{cases} \lambda^3 [2 \cdot (p_j - p_{j+1}) + t_j + t_{j+1}] + \\ \lambda^2 [3 \cdot (p_{j+1} - p_j) - 2 \cdot t_j - t_{j+1}] + \\ \lambda \cdot t_j + p_j \end{cases} \quad (5)$$

Parametr λ dla zadanego parametru u , między dwoma kolejnymi wektorami punktów p_j, p_{j+1} , o parametrach odpowiednio: u_j i u_{j+1} , oblicza się wg podziału liniowego między parametrami tych punktów:

$$\lambda = \frac{u - u_j}{u_{j+1} - u_j} \quad (6)$$

Przyjęta metoda obliczania parametru λ pozwoliła zachować poprawność warunków brzegowych w funkcji kubicznej Fergusona na jego brzegach.

Funkcja kubiczna Fergusona $p_{j+1}(u)$

Podobnie jak wyżej, określa się funkcję kubiczną Fergusona $p_{j+1}(u)$ między wektorami punktów p_{j+1}, p_{j+2} , o parametrach u_{j+1}, u_{j+2}

$$p_{j+1}(u) = \begin{cases} \lambda^3 [2 \cdot (p_{j+1} - p_{j+2}) + t_{j+1} + t_{j+2}] + \\ \lambda^2 [3 \cdot (p_{j+2} - p_{j+1}) - 2 \cdot t_{j+1} - t_{j+2}] + \\ \lambda \cdot t_{j+1} + p_{j+1} \end{cases} \quad (7)$$

Funkcje wektorowe (5) i (7) zawierają znane wielkości: parametr λ , wektory pozycyjne p_j, p_{j+1}, p_{j+2} oraz nieznanne wektory styczne t_j, t_{j+1}, t_{j+2} (rys. 2).

Obliczenie nieznanek wektorów stycznych na kubicznej funkcji Fergusona

Wektory styczne w punkcie $p_j(u)$ oraz styku między krzywymi Fergusona oznaczonymi przez $p_{j+1}(u)$ oraz $p_{j+2}(u)$ oblicza się z warunku zerowania się drugich pochodnych:

$$p''_j(u=1), \quad p''_{j+1}(u=0) \quad (8)$$

otrzymujemy w ten sposób pierwszy warunek wiążący wektory styczne w postaci:

$$t_{j+2} + 4 \cdot t_{j+2} + t_j = 3(p_{j+2} - p_j) \quad (9)$$

Otrzymane równanie zawiera trzy nieznane wektory styczne: t_j, t_{j+1}, t_{j+2} . Pozostałe dwa równania niezbędne do znalezienia nieznanek wektorów stycznych znajdujemy z warunków brzegowych lewo i prawostronnych krzywych $p_j(u)$ oraz $p_{j+1}(u)$ – rys. 2.

Dla krzywej $p_j(u)$ warunek brzegowy lewostronny ma postać:

$$p''_j(u=0) = 0 \quad (10)$$

Z warunku tego otrzymujemy drugie równanie wiążące wektory styczne:

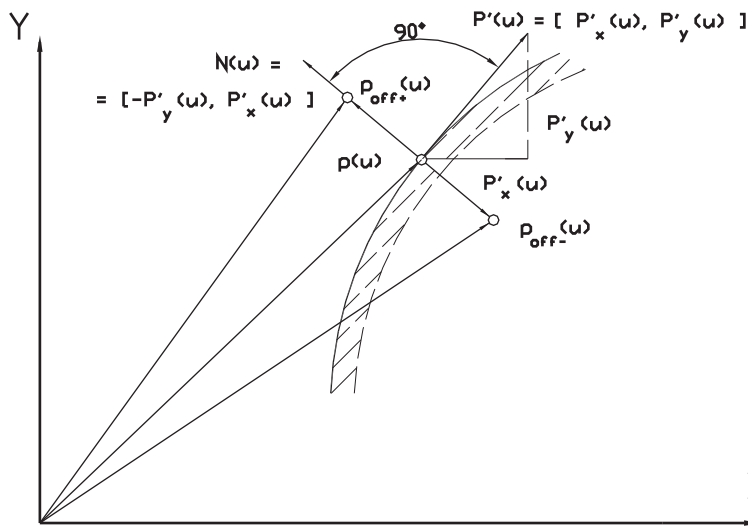
$$2 \cdot t_j + t_{j+1} = 3(p_{j+1} - p_j) \quad (11)$$

Podobnie, dla krzywej $p_{j+1}(u)$ warunek brzegowy prawostronny ma postać:

$$p''_{j+1}(u=1) = 0 \quad (12)$$

Z warunku tego, otrzymujemy drugie równanie wiążące wektory styczne:

$$t_{j+1} + 2 \cdot t_{j+2} = 3(p_{j+2} - p_{j+1}) \quad (13)$$



Rys. 3. Definiowanie współrzędnych punktu odsuniętego p_{off+} lub p_{off-} względem punktu $p_j(u)$ dla parametru u ; wskaźniki $off+$ lub $off-$ określają stronę od krzywej kubicznej

W ten sposób otrzymano poniższy układ trzech równań liniowych wiążących wektory styczne z ich promieniami wodzącymi:

$$\begin{cases} 2 \cdot t_j + t_{j+1} = 3(p_{j+1} - p_j) \\ t_{j+2} + 4 \cdot t_{j+1} + t_j = 3(p_{j+2} - p_j) \\ t_{j+1} + 2 \cdot t_{j+2} = 3(p_{j+2} - p_{j+1}) \end{cases} \quad (14)$$

Dalsze rozważania wygodniej jest śledzić w zapisie macierzowym poprzez wprowadzenie stosownych wektorów i macierzy, tj.:

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} t_j \\ t_{j+1} \\ t_{j+2} \end{bmatrix}, DP = \begin{bmatrix} p_{j+1} - p_j \\ p_{j+2} - p_j \\ p_{j+2} - p_{j+1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Zapis macierzowy układu równań liniowych (14) przyjmuje zatem formę:

$$A \cdot T = 3 \cdot DP \quad (16)$$

Wektor niewiadomych T oblicza się przez mnożenie lewostronne równania (16) przez macierz odwrotną A^{-1} , co daje rezultat

$$T = 3 \cdot A^{-1} \cdot DP \quad (17)$$

Macierz odwrotna obliczona wg rozwinięcia Laplace'a przyjmuje formę:

$$A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} \cdot (A^T)^D \quad (18)$$

gdzie: $\det(A) = 1/12$ – wartość wyznacznika macierzy A ,

$$(A^T)^D = \begin{bmatrix} +7 & -2 & +1 \\ -2 & +4 & -2 \\ +1 & -2 & +7 \end{bmatrix} - \text{macierz dołączona}$$

na transpozycji macierzy A ,

Macierz wektorów stycznych T oblicza się wg wzoru

$$T = \begin{bmatrix} t_j \\ t_{j+1} \\ t_{j+2} \end{bmatrix} = 3 \cdot A^{-1} \cdot DP = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} +7 & -2 & +1 \\ -2 & +4 & -2 \\ +1 & -2 & +7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{j+1} - p_j \\ p_{j+2} - p_j \\ p_{j+2} - p_{j+1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Równanie (19) jest równaniem wektorowym. W celu obliczenia składowych wektorów stycznych t_{jx} , dla $j=j, j+1, j+2$, we wzorze (19) należy podstawić w macierzy DP składowe w osi x wektorów p_{jx} , dla $j=j, j+1, j+2$. Analogicznie, dla obliczenia składowych wektorów stycznych t_{jy} , dla $j=j, j+1, j+2$, we wzorze (19) należy podstawić w macierzy DP składowe w osi y wektorów p_{jy} , dla $j=j, j+1, j+2$.

Następnie, podstawia się obliczone składowe wektorów $t_j (t_{jx}, t_{jy})$, $j=j, j+1, j+2$ oraz wektorów $p_j (p_{jx}, p_{jy})$, $j=j, j+1, j+2$ do wzoru $p_j(u)$ (5, lub 7) i uzyskuje się dla bieżącego parametru u składowe wektora $p_j(u)$, $(p_{jx}(u), p_{jy}(u))$ punktu na krzywej.

Obliczenie odsunięcia względem funkcji ferguson

Krzywa odsunięta leży w odległości promienia względem krzywej kubicznej Fergusona. Położenie punktu odsuniętego względem punktu pozycyjnego $p(u)$ oznaczono wektorem p_{off+-} – rys. 3.

Punkt odsunięty może leżeć wewnątrz lub na zewnątrz krzywej kubicznej, co określają odpowiednio znaki $+$, $-$. Obliczenie odsunięcia względem krzywej kubicznej bazuje na twierdzeniu rachunku wektorowego, mianowicie: rzut sumy wektorów na oś równy jest sumie rzutów wektorów składowych na tę oś [2].

Cosinusy kierunkowe dla odsunięcia

Wektor pozycyjny $p(u)$ dla założonej wartości parametru u oblicza się wg (5), gdyż w realizowanym cyklu obliczeń parametr $u \in \langle u_j, u_{j+1} \rangle$ (rys. 3). W punkcie $p(u)$ określonym przez parametr u obliczamy wektor styczny $p'(u)$ do krzywej kubicznej, a następnie konstruujemy wektor normalny $N(u)$. Oba wektory styczny i normalny związane są twierdzeniem z rachunku wektorowego, wg którego ich iloczyn skalarny jest równy zero [2]:

$$p'(u) \cdot N(u) = 0 \quad (20)$$

Oznaczając składowe wektora stycznego $p'(u)$ odpowiednio przez $[p'_x(u), p'_y(u)]$ (rys. 3), składowe wektora normalnego są następujące:

$$N(u) = [-p'_y(u), p'_x(u)] \quad (21)$$

Moduł wektora normalnego $N(u)$ oblicza się ze wzoru:

$$|N(u)| = \sqrt{(-p'_y)^2 + (p'_x)^2} \quad (22)$$

Cosinusy kierunkowe z osią OX i OY oblicza się z definicji cosinusa, tj. wg wzorów:

$$I_x(u) = \cos \alpha = \frac{-p'_y}{|N(u)|}, \quad I_y(u) = \cos \beta = \frac{p'_x}{|N(u)|} \quad (23)$$

gdzie: α, β – kąty wektora $N(u)$ odpowiednio z dodatnim zwrotem osi OX lub osi OY .

$P'(u)$ oraz $N(u)$ są wektorami stycznym i normalnym w punkcie $p_j(u)$ na krzywej kubicznej Fergusona (rys. 3).

Współrzędne punktów odsuniętych

Współrzędne punktów odsuniętych oblicza się zgodnie z twierdzeniem: rzut sumy wektorów równa się sumie rzutów wektorów składowych:

$$- \text{składowa w osi } OX: p_{y_{off+-}}(u) = p_x(u) I_x(u) \cdot r \quad (24)$$

– składowa w osi OY :

$$p_{x_{off+}}(u) = p_x(u) \cdot l_x(u) \cdot r \quad (25)$$

gdzie: r – oznacza promień (odległość).

Do oprogramowania cyklu obliczenia punktów na krzywej odsuniętej użyto język *FORTRAN* oraz zbiór podprogramów *System/360* [7]. Utworzono program o nazwie *FERPRF*. Plik wykonawczy o nazwie *FERPRF.EXE* skompilowano za pomocą programu *Digital Visual Fortran, Version 6*.

Obliczanie dodatkowych punktów na profilu śmigła

Każdy punkt w zbiorze określającym profil aerodynamiczny ma przydzielony: indeks i , współrzędne kartezjańskie (x_i, y_i) oraz obliczone parametry u_i wg wzoru (3). Parametr punktu pierwszego (x_1, y_1) ma wartość $u_1 = 0$, punkt ostatni (x_n, y_n) , ma wartość $u_n = 1$. W cyklu iteracyjnym dla odsunięcia $r = 0$ obliczane są punkty na krzywych Fergusona dla wartości parametru $(u_i + \Delta u)$. Wartość kroku Δu przyjmuje użytkownik programu *FERPRF* w cyklu konwersacyjnym. Przyjęto standardowa wartość $\Delta u = 0,002$, co daje liczbę 500 punktów. W cyklu obliczeń, gdy wartość $u_i + \Delta u > u_{i+1}$, wtedy krzywe Fergusona są tworzone dla kolejnych trzech wektorów punktów $(p_{j+1}, p_{j+2}, p_{j+3})$ $(p_{j+1}, p_{j+2}, p_{j+3})$. Końcowy cykl obliczeń wykonywany jest na krzywych rozpiętych na wektorach punktów (p_{n-2}, p_{n-1}, p_n) . Współrzędne kolejnych wektorów $p_j(u)$, $(p_{jx}(u), p_{jy}(u))$ punktów na krzywej są pamiętane w zbiorze tekstowym programu. Punkty obliczone przez program *FERPRF* przedstawiono na rys. 4, na tle punktów zadanych profilu aerodynamicznego.

Obliczenia sekwencji ruchu wzdłuż profilu

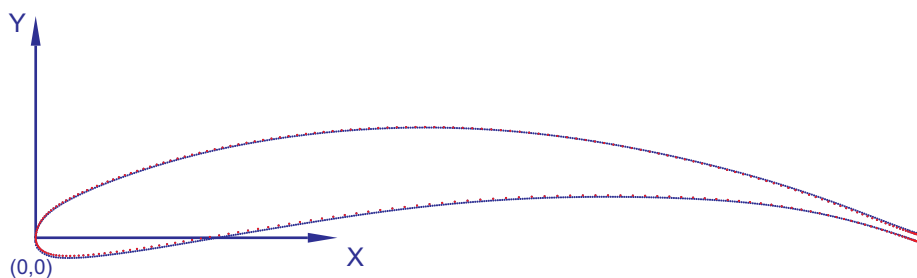
Krzywizna profilu aerodynamicznego jest zmienna, duża na nosku profilu, mała przy krawędzi spływu profilu (rys. 4). Krzywizna k profilu określona jest zależnością [2]:

$$k = (y'') / (1 + (y')^2) \quad (26)$$

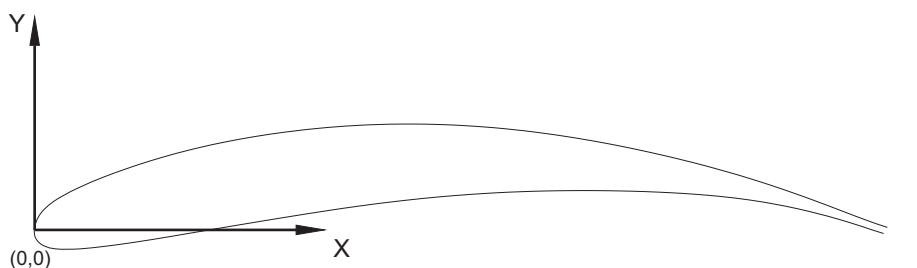
gdzie: y' – pierwsza pochodna krzywej, y'' – druga pochodna krzywej.

Promień krzywizny R jest odwrotnością krzywizny k :

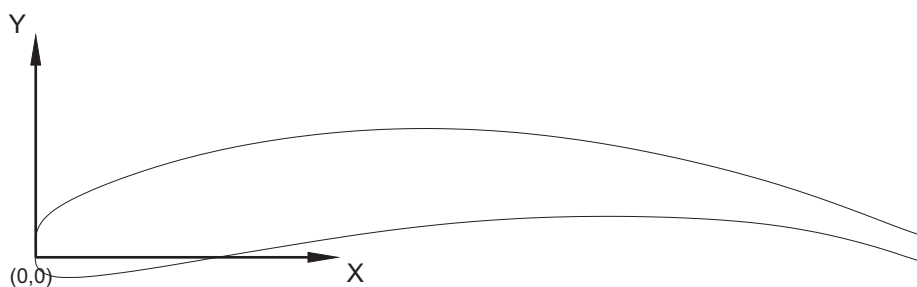
$$R = 1/k \quad (27)$$



Rys. 4. Profil wklęsło-wypukły zadany dwoma ciągami punktów w układzie kartezjańskim XY : kolor niebieski – ciągiem 500 obliczonych punktów, kolor czerwony – ciągiem 257 punktów



Rys. 5. Wielolinia profilu złożona z sekwencji poleceń *LINE* oraz *CIRCLE*



Rys. 6. Wstępny projekt wycinania profilu: wielolinia grzbietu (górna) przesunięta w osi $OY = 5$ mm, wielolinia koryta (dolna)

Do obliczenia krzywizny w bieżących punktach profilu opracowano program o nazwie *CHARCDW*, w którym pochodne pierwszego i drugiego rzędu y' i y'' oblicza się dla bieżących punktów na profilu z ich definicji, a krzywiznę k wg wzoru (26). W programie *CHARCDW* wprowadzono graniczną wartość krzywizny $k = 0,02$, utworzono także instrukcję warunkową:

jeśli $(k > 0,02)$ to ruch wykonuje się przez dwa kolejne punkty po prostej (*LINE*),

przeciwnie $(k < 0,02)$ to ruch wykonuje się przez trzy kolejne punkty po łuku (*CIRCLE*).

Do programu *CHARCDW* wczytuje się zbiór *.txt* punktów definiujących profil, punkty *obliczane* (rys. 4). Uzyskany zbiór wynikowy *.SCR* z ciągiem poleceń *LINE*, lub *CIRCLE* wczytuje się do systemu *AutoCAD* i uzyskuje się wielolinię profilu (rys. 5).

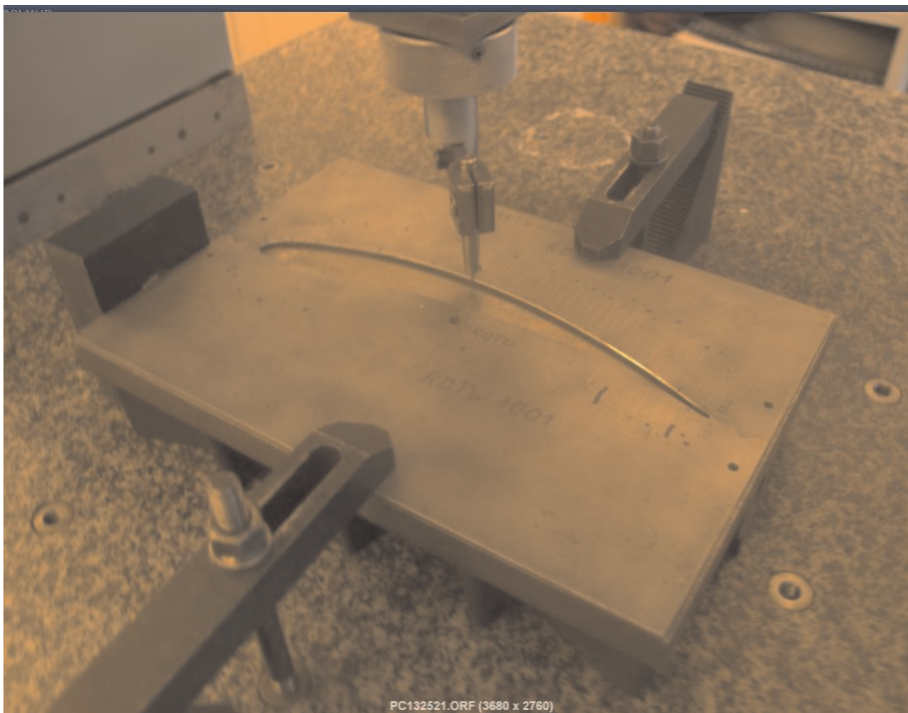
Wczytana do systemu *AutoCAD* wielolinia podlega modyfikacji, która polega na translacji grzbietu profilu w osi $OY = 5$ mm (rys. 6).

Uzyskany wstępny projekt wycinania profilu zapisany w systemie *AutoCAD* jako plik *.DXF* wczytywany jest do systemu *PEPS CAD/CAM* [4], w którym tworzy się roboczy projekt obróbki. Obróbkę i montaż szablonu opisano w pracy [4].

Pomiar profilu śmigła metodą skanowania na WMP

Szablon profilu śmigła pomierzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej *WMP* [8] metodą skanowania sztywną sondą pomiarową (rys. 7). Do pomiaru wykorzystano walcową sondą pomiarową średnicy 1,05 mm.

Podczas pomiaru zapisywane są współrzędne środka walcowej sondy po-



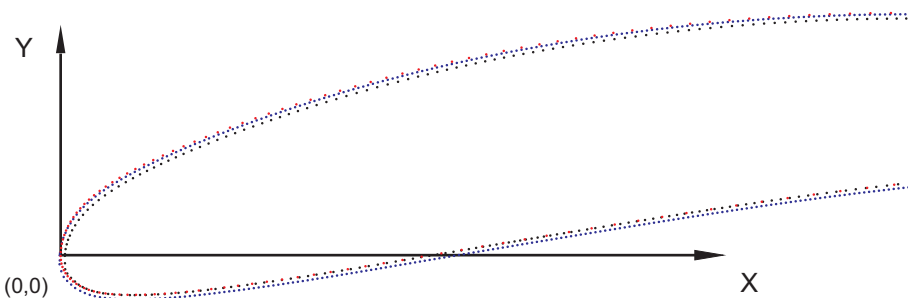
CHARSDW, w zależności od krzywizny profilu. Plik .ISO wycinania profilu generuje postprocesor systemu PEPS dla wycinarki Robofil 440SLP.

Program FERPRF wykorzystuje się także do kontroli poprawności wykonania profilu aerodynamicznego wykorzystując, wyniki pomiarów podczas skanowania profilu na WMP sztywną walcową sondą pomiarową z końcówką walcową.

Literatura

1. Bukowski J., Łucjanek W.: Napęd śmigłowy. Teoria i konstrukcja. Wydawnictwo MON, Warszawa 1986.
2. Dreszer J.: Poradnik Inżyniera, Matematyka, WNT, Warszawa 1971, str. 481.
3. Erick Y., Gómez U., Jorge A., López R.A., Jimenez G., López V., and Villalon J.: Design and Manufacturing of Wind Turbine Blades of Low Capacity Using CAD/CAM Techniques and Composite Materials. Energy Procedia Letters, vol. 57, Elsevier 2014, pp.682–690,
4. Filipowski R., Zawora J., Marczak M.: Technologia wycinania aerodynamicznego profilu śmigła turbiny wiatrowej. Obróbka Metalu, nr 1/2019, str. 17-20.
5. PEPS CAD/CAM SYSTEM, Germany: Camtek GmbH, Oberer Wasen 16-20, D-73630 Remschalden-Geradstetten, www.PEPS.de; UNITED KINGDOM, Vero UK Limited, e-mail: info@verosoftware.com, str. 199-220, Importowanie danych CAD.
6. Pressman R.S., Williams J.N.: Numerical Control and Computer-Aided Manufacturing. John Wiley & Sons Ed., New York 1977, p. 238-246.
7. Sbornik naučných programů na fortranie, Matriènjaja algebra i liniejnjaja algebra. Podprogramy. Moskva, <STATISTIKA>, 1974, Podprogramy, str. 31-40, 72-74,
8. WMP, KOORDYNATOMETR XYZ, Instrukcja Obsługi, IO NE Nr. 5/88, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Narzędzi VIS, Warszawa 1988.
9. Ye J., Qu R.: Fairing of parametric cubic splines. Mathematical and Computer Modelling, Volume 30, Issues 5-6, 1999, pp. 121-131.

Rys. 7. Pomiar profilu śmigła metodą skanowania w szablonie na WMP sztywną walcową sondą pomiarową [9]



Rys. 8. Trzy ciągi punktów na profilu: kolor czarny – punkty profilu skanowanego, kolor niebieski – punkty profilu odsuniętego o 0,525 mm, kolor czerwony – punkty profilu zadanego

miarowej, które oznaczono kolorem czarnym rys. 8.

Na rys. 8 przedstawiono ponadto: kolorem niebieskim – ciąg punktów odsuniętych, obliczonych przez program FERPR, oraz kolorem czerwonym – ciąg punktów definiujących profil aerodynamiczny.

Odchyłki profilu aerodynamicznego od profilu odsuniętego

Wartość odchyłek rzędnych Δ w osi OY wzdłuż profilu aerodynamicznego i profilu odsuniętego, wyznaczonych z zależności:

$$\Delta = y_{aerod} - y_{odsun} \tag{28}$$

są zawarte w przedziale (0,3÷0,5) mm.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione oprogramowanie własne (FERPRF, CHARDSW) oraz profesjonalne (AutoCAD, PEPS CAD/CAM) wykorzystuje się w procesie technologicznym wytwarzania i pomiaru szablonu profilu śmigła.

W pierwszej fazie program FERPRF wykorzystuje się do obliczenia liczby 500 punktów na profilu aerodynamicznym śmigła ze stałym krokiem parametrycznym Δu. Przyjmuje się wówczas, że promień sondy pomiarowej r = 0. Profil aerodynamiczny w szablonie jest wycinany na wycinarce Robofil 440SLP wzdłuż wielolinii. Rodzaj interpolacji (liniowa lub kołowa) dobiera program