

CERCETAREA ȘI ELABORAREA ROTORULUI CU PALE CU PROFIL HIDRODINAMIC AL MICROHIDROCENTRALEI DE FLUX

BOSTAN V., CIOBANU O., GLADIȘ V.

Universitatea Tehnică a Moldovei

Summary.: A more efficient use of hydraulic energy, in terms of environmental and social impacts, is the conversion of kinetic energy of running river water without dams' construction. A new design and functional concept of a hydraulic flow turbine with vertical axis and individualized orientation of the hydrodynamic blades were proposed and elaborated. Using a high order panel method the potential flow analysis is performed in order to compute the hydrodynamic lift and moment coefficients. The drag coefficient is computed through a boundary layer analysis. The turbulent boundary layer parameters are computed using the Head's model and the drag coefficient is provided by Squire-Young formula.

Keyword: flow micro hydropower plant, kinetic energy of flowing water, hydrodynamic blade, hydrodynamic rotor, hydrodynamic force, hydrostatic pressure.

INTRODUCERE

Viteza curentului de $1m/s$ reprezintă o densitate energetică de $500W/m^2$ a secțiunii de traversare, însă doar o parte din această energie poate fi extrasă și convertită în energie electrică sau mecanică utilă. Aceasta depinde de tipul rotorului și al paletelor. Viteza este, în special, importantă, pentru că o dublare a vitezei apei dă în rezultat o creștere de opt ori a densității energetice. Există diverse soluții conceptuale, însă problema măririi eficienței de conversie a energiei cinetice a apei rămâne în atenția cercetătorilor. Analiza variantelor constructive ale rotoarelor microhidrocentralelor de flux examinate anterior nu satisfac pe deplin sub aspectul eficienței de conversie a energiei cinetice a apei. Într-o roată hidraulică clasică cu ax orizontal adâncimea maximă, la care este afundată una dintre pale, constituie cca $2/3$ din înălțimea paletei [1]. Deci, doar această suprafață participă la transformarea energiei cinetice a apei în energie mecanică. Pala, care urmează după pala afundată maxim în apă, este acoperită complet de aceasta și, practic, nu participă la conversia energiei cinetice a apei. De aceea, eficiența acestor roți hidraulice este mică.[1, 2, 3]

Cercetările au condus la elaborarea și brevetarea unor soluții tehnice performante de rotoare a microhidrocentralelor de flux de apă, bazate pe efectul hidrodinamic, generat de profilul hidrodinamic al paletelor rotorului și orientarea paletelor în pozițiile optime față de curenții de apă din punct de vedere al eficienței conversiei energiei în fiecare fază de rotire a rotorului turbinei (fig.1). Alegerea și argumentarea teoretică a formei profilului hidrodinamic optim al paletelor este bazată pe cercetările efectuate în cadrul dinamicii computaționale ale fluidelor.

Avantajele de bază ale acestor tipuri de microhidrocentrale sunt:

- impact redus asupra mediului;
- nu sunt necesare lucrări de construcții civile;
- râul nu își schimbă cursul său natural;

Rezultatele investigațiilor efectuate de autori referitor la viteza de curgere a apei în locul selectat pentru instalarea microhidrocentralei, la prospectările geologice ale malului râului în locul instalării fundației de ancorare, la necesitățile energetice ale potențialului consumator, reprezintă date inițiale

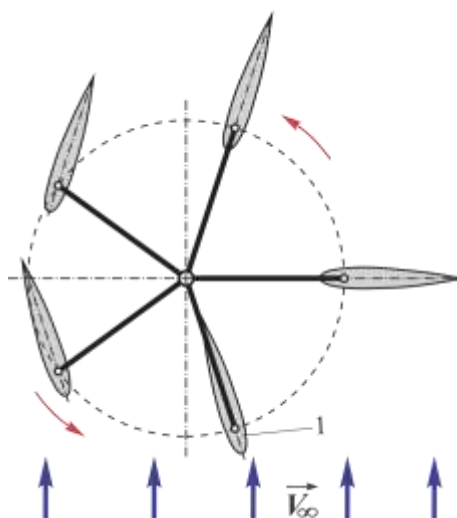


Fig. 1. Schema conceptuală a rotorului cu profil hidrodinamic al paletelor reglabile față de curenții de apă (elaborată de autori).

pentru elaborarea conceptuală a microhidrocentralelor cu ax orizontal al turbinei.

ARGUMENTAREA TEORETICĂ A ALEGERII PROFILULUI HIDRODINAMIC AL PALEI ÎN SECȚIUNE NORMALĂ ȘI DETERMINAREA COEFICIENȚILOR HIDRODINAMICI DE PORTANȚĂ (LIFT) C_L ȘI REZISTENȚĂ (DRAG) C_D .

Se consideră profilul simetric al palei, aflat într-un curent de fluid care se mișcă uniform cu viteza V_∞ (figura 2) [1]. În punctul de fixare O' a palei simetrice cu brațul $O'O'$ considerăm două sisteme de coordonate, și anume: sistemul $O'x'y'$ cu axa $O'y'$ orientată în direcția vectorului vitează V_∞ , iar axa $O'x'$ normală la această direcție; și sistemul $O'x''y''$ cu axa $O'y''$ orientată în direcția brațului $O'O'$, iar axa $O'x''$ normală la această direcție. Punctul A corespunde bordului de fugă, iar punctul B corespunde bordului de atac. Unghiul de atac α este unghiul dintre coarda AB a profilului și direcția vectorului vitează V_∞ , iar unghiul de poziționare φ este unghiul dintre direcția vectorului vitează și brațul $O'O'$.

Forța hidrodinamică F are componentele în direcțiile $O'x'$ și $O'y'$, numite forța de portanță și forța de rezistență:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V_\infty^2 S_p, \quad (1)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 S_p, \quad (2)$$

unde ρ este densitatea fluidului, V_∞ este viteza curentului, $S_p = ch$ (c este lungimea corzii AB , h este înălțimea palei) reprezintă aria suprafeței laterale a palei, iar C_L și C_D sunt coeficienții hidrodinamici adimensionali, numiți coeficientul de portanță (lift) și coeficientul de rezistență (drag). Coeficienții hidrodinamici C_L și C_D sunt funcții de unghiul de atac α , numărul Reynolds Re și forma hidrodinamică a profilului palei. Componentele forței hidrodinamice în sistemul de coordonate $O'x'y'$ sunt:

$$\begin{aligned} F_{x'} &= -F_L \sin \varphi + F_D \cos \varphi, \\ F_{y'} &= F_L \cos \varphi + F_D \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Momentul de torsiune la arborele rotorului $O'O'$ dezvoltat de pala i este

$$T_{r,i} = F_{x'} \cdot |O'O'|, \quad (4)$$

iar momentul de torsiune total dezvoltat de toate palele este

$$T_{r\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{pal}} T_{r,i}, \quad (5)$$

unde N_{pal} este numărul palelor rotorului.

În general, forța hidrodinamică nu are punctul de aplicație în originea sistemului de axe ale palei O' , astfel că produce un moment rezultat. Momentul produs este determinat în raport cu un anumit punct de referință. Drept punct de referință vom considera punctul situat la distanța de $1/4$ de coardă de la bordul de atac B . Momentul, numit și momentul de tangaj, se calculează după formula:

$$M = \frac{1}{2} C_M \rho V_\infty^2 c S_p, \quad (6)$$

unde C_M reprezintă coeficientul de moment al profilului.

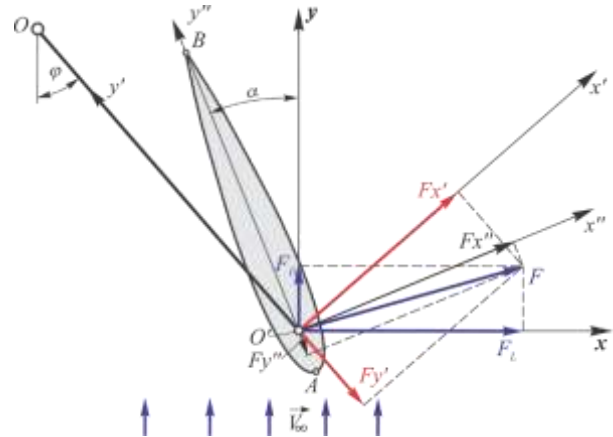
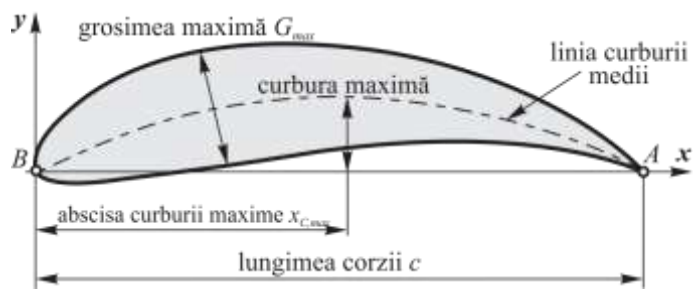


Fig. 2. Pală cu profil hidrodinamic.

Profilul hidrodinamic va fi ales din familia profilurilor aerodinamice NACA. În cadrul acestei familii, profilurile sunt exprimate ca funcții de 3 variabile, și anume: curbura maximă C_{max} , abscisa curburii maxime $x_{c,max}$ și grosimea



maximă G_{max} (figura 3). De exemplu, profilul NACA 5416 are 5% curbura maximă, situată la 40% a cozii și are grosimea de 16%, procentele fiind calculate din lungimea cozii. Coordonatele profilului se obțin prin combinarea coordonatelor liniei curburii medii și a distribuției grosimii.

Fig. 3. Parametrii de formă a profilului din familia NACA cu 4 cifre.

Pentru calculul coeficientului de rezistență C_D se utilizează formula Squire–Young. Presupunem că sunt calculate următoarele mărimi: grosimea pierderii de impuls θ , parametrul de formă H și viteza V în punctul corespunzător bordului de fugă TE de pe suprafața superioară și cea inferioară a conturului C . Atunci, coeficientul de rezistență este dat de relația:

$$C_D = (2\theta_{TE} \cdot V_{TE}^\lambda)_{C_{sup}} + (2\theta_{TE} \cdot V_{TE}^\lambda)_{C_{inf}}, \quad (2.103)$$

unde

$$\lambda = (H_{TE} + 5)/2.$$

Cu scopul de a valida rezultatele numerice se efectuează o analiză a convergenței. Astfel, în figura 4 se prezintă coeficientul de rezistență C_D calculat pentru profilul aerodinamic NACA 0016 (cu coarda de lungime 1) și unghiul de atac $\alpha = 15^\circ$ în funcție de numărul de noduri de discretizare N (figura 4 (a)) și în funcție de $1/N$ (figura 4 (b)).

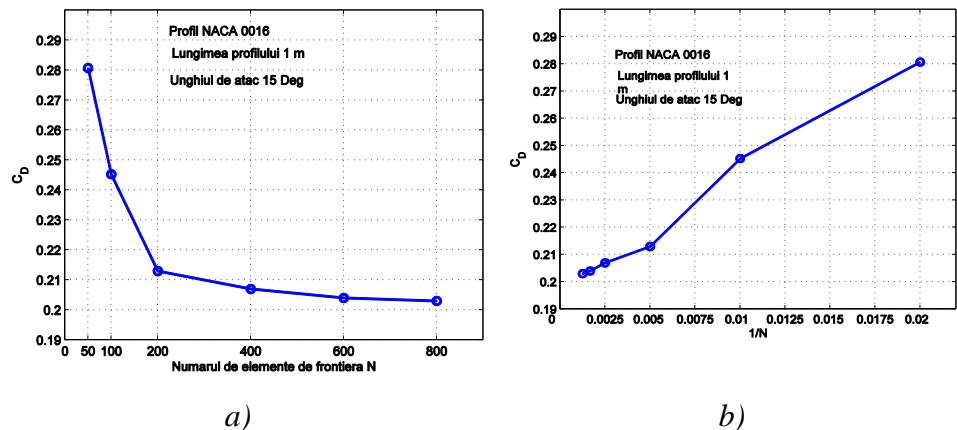


Fig. 4. Coeficientul de rezistență funcție de numărul de elemente de frontieră N (a) și $1/N$ (b).

Rezultatele prezentate în figura 4 atestă convergența metodei și indică faptul că 400–600 de noduri sunt suficiente pentru a atinge un grad de precizie acceptabil. În figura 5 este prezentată diagrama schemei de calcul a coeficienților hidrodinamici C_L , C_M și C_D fiind dați parametrii geometrici a profilului și unghiul de atac.

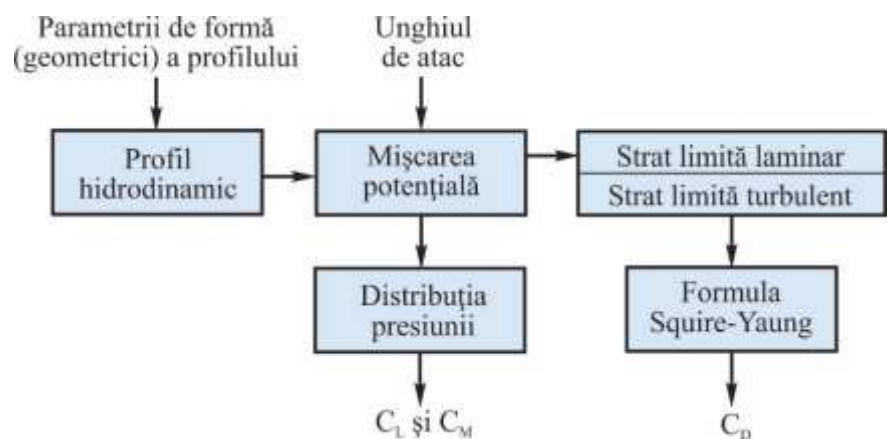


Fig. 5. Schema de calcul a coeficienților hidrodinamici.

În scopul de a maximiza performanța turbinei cu pale hidrodinamice se caută profilul hidrodinamic optim al palei [1, 2, 3, 4]. Se aplică

metodele de calcul numeric descrise anterior pentru a calcula coeficienții $C_{L,ref}$ și $C_{D,ref}$ pentru profilurile simetrice din librăria de profiluri aerodinamice NACA cu coarda de lungime $c_{ref} = 1 \text{ m}$. Remarcăm că metoda de calcul converge pentru unghiuri de atac α care nu

depășesc $20^\circ - 25^\circ$, în dependență de profilul ales și numărul Reynolds corespunzător ($Re = 1300000$).

Pentru unghiuri de atac mai mari decât această valoare critică se iau valorile corespunzătoare unui profil plat pentru aceasta sunt considerate profilurile: NACA 0012, 0016, 63018 și 67015. Coeficienții hidrodinamici de

portanță $C_{L,ref}$ și rezistență $C_{D,ref}$, în funcție de unghiul de atac, sunt reprezentați în figura 6. Luând în considerație datele prezentate în figura 6, în calitate de profil de referință se alege profilul hidrodinamic NACA 0016. Ulterior, acest profil va fi optimizat cu scopul de a mări performanțele turbinei.

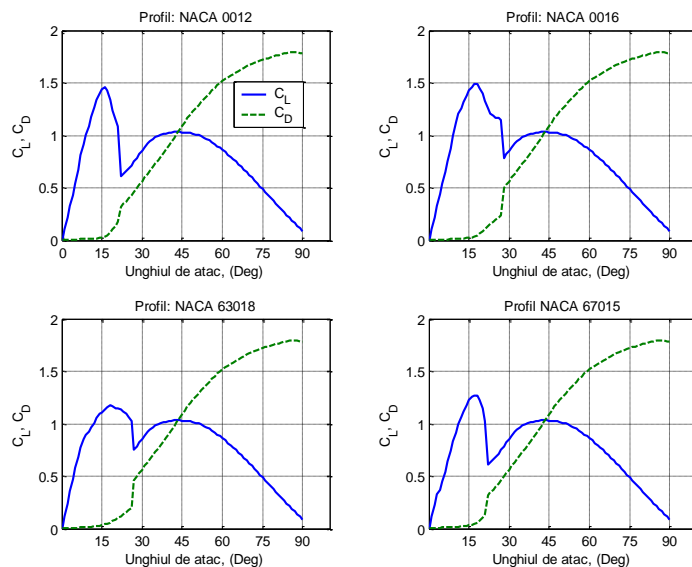


Fig. 6. Coeficienții hidrodinamici C_L și C_D în funcție de unghiul de atac pentru profilurile NACA 0012, 0016, 63018 și 67015.

ELABORAREA, PROIECTAREA ȘI FABRICAREA ROTORULUI HIDRODINAMIC MULTIPAL AL MICROHIDROCENTRALEI

Rotorul hidrodinamic a fost elaborat în mediul de proiectare Autodesk MotionInventor și este prezentat în figura 7 (a) – cu 5 pale și în figura 7 (b) – cu 3 pale. Varianta rotorului cu cinci pale asigură o uniformitate mai înaltă a mișcării de rotație a organului de lucru, însă este mai costisitoare. Rotorul hidrodinamic este organul de lucru principal al unei microhidrocentrale și este destinat pentru conversia energiei cinetice a fluxului de apă și transmiterea acesteia prin lanțul cinematic către generatorul electric sau pompa hidraulică 1) (figura 7 (c)).

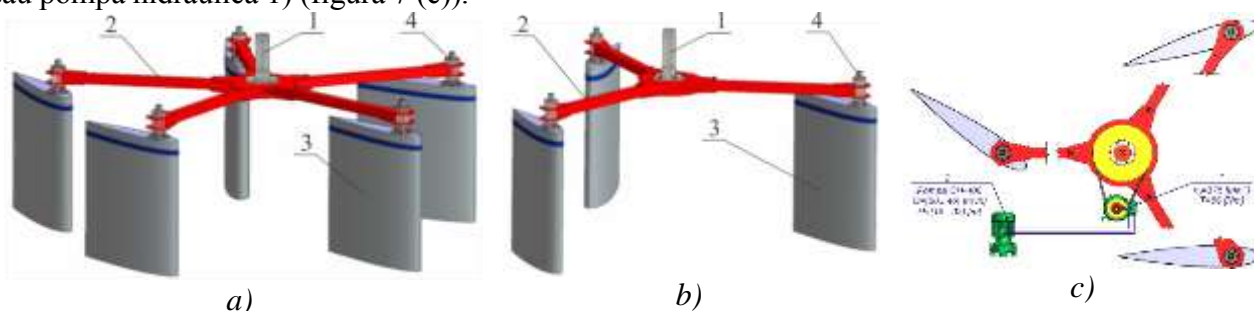


Fig. 7. Rotoarele hidrodinamice cu cinci pale (a), cu trei pale (b) și cuplat cinematic cu generatorul 1 (c).

Din punct de vedere al construcției, rotorul include arborele principal 1 (figura 7 (a, b)), carcasa cu bare radiale 2, la extremitățile cărora sunt montate palele 3 cu profil hidrodinamic prin intermediul nodului de asamblare 4. Arborele principal 1 și carcasa cu bare 2 sunt asamblate demontabil. Rotorul hidrodinamic reprezintă o structură spațială sollicitată complex cu momente de încovoiere și răsucire. Carcasa cu bare radiale este fabricată din profil de aliaj de aluminiu cu dimensiuni calculate să asigure poziționarea de proiect (calculată) a palelor cu abateri minime (săgeata de încovoiere a axelor palelor – până la 5 mm , unghiul de răsucire a barelor radiale $\pm 1^\circ$).

Fiind elaborate palele hidrodinamice cu ecrane transversale și construcție modulară cu lungimea cordului $l=800\text{ mm}$ înălțimea submersată $h = 1600\text{ mm}$ la rândul său au fost asamblate și variatele rotorul hidrodinamic cu 3 pale. Pe figura 8 este prezentat rotorul cu 3 pale elaborat în mediul de proiectare Autodesk MotionInventor și fabricat în Laboratorul Centrului de Elaborare a Sistemelor de Conversie a Energiilor Regenerabile, UTM (figura 9).

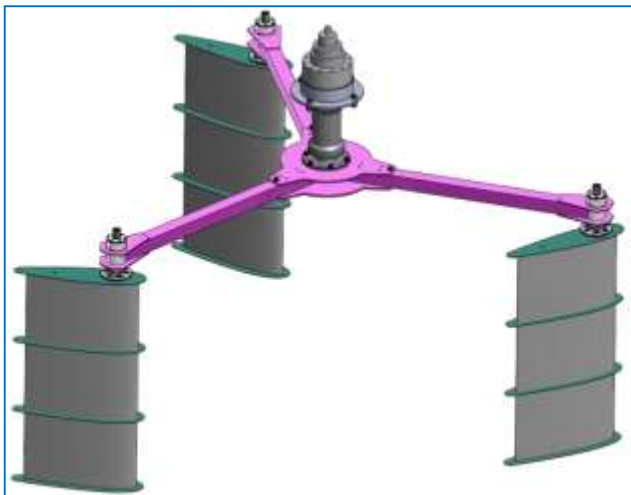


Fig. 8. Rotor cu 3 pale hidrodinamice cu ecrane transversale și construcție modulară cu lungimea cordului $l=800\text{ mm}$ înălțimea submersată $h = 1600\text{ mm}$.



Fig. 9. Rotor cu 3 pale hidrodinamice fabricat în Laboratorul Centrului de Elaborare a Sistemelor de Conversie a Energiilor Regenerabile, UTM.

Soluțiile tehnice adoptate în construcția finală a rotorului hidrodinamic au rezultat din cercetări efectuate prin simularea pe calculator, utilizând softurile ANSYS CFX 14.5, subprograme în pachetul de modelare matematică MathCAD ș.a., cu aplicarea sarcinilor posibile în exploatarea reală. Nodul de asamblare 4 permite varierea poziționării palelor 3 față de axul de rotire al acestora, în scopul asigurării momentului de tangaj optim (soluția tehnică conține elemente Know-How).

CONCLUZII

Pentru determinarea preliminară a parametrilor geometrici, constructivi și funcționali a microhidrocentralei de flux, poate fi implementată metoda elementului de frontieră pentru descrierea curgerii potențiale, cuplată cu modelul Head pentru analiza startului limită bidimensional. Cercetarea efectelor de turbulență în rotor și în vecinătatea palelor, a detașării stratului limită la curgerea fluidului în direcția lungimii și a cordului palei, cu identificarea gradului lor de influență asupra eficienței conversiei. Optimizarea profilului palelor, în vederea minimizării influenței efectelor de turbulență și separării stratului-limită la curgerea fluidului pe înălțimea palelor. A fost elaborată baza de date pentru proiectare și fabricare a palelor hidrodinamice utilizate la construcția rotorului, cu recomandări și soluții tehnice pentru sporirea eficienței conversiei.

BIBLIOGRAFIE

1. Ciobanu O. Contribuții privind cercetarea organului de lucru al microhidrocentralelor de flux. Teză de dr. în tehnică. Chișinău, 2014. 260 p.
2. Bostan V. Modele matematice și metode de eficientizare a conversiei energiilor regenerabile în baza efectelor aerohidrodinamice. Teză de dr. habilitat în tehnică. Chișinău, 2013. 433 p.
3. Bostan I., Dulgheru V., Ciobanu O., Ciobanu R. Studiu privind sistemele de conversie a energiei cinetice a apei râurilor. În: Meridian Ingineresc. Chișinău: Universitatea Tehnică a Moldovei, 2003, nr. 4, p. 49 - 50.
4. Bostan I., Dulgheru V., Bostan V., Ciobanu O. Micro-hidropower station for kinetic energy conversion of flowing whater with hydrodynamic rotor. Proceedings of the International Conference on Industrial Power Engineering EI 2014, The 9-th Edition. Bacău: Alma Mater, 2014, p. 31-36. ISSN 2069-9905.
5. Bostan I., Dulgheru V., Bostan V., Ciobanu O. Micro-hydropower station for kinetic energy conversion of flowing whater with hydrodynamic rotor. În: Proceedings of The International Conference on Industrial Power Engineering, The 9-th Edition, Bacău-România, 2014, p.31-36. ISSN 2069-9905.