

Roman KACZYŃSKI¹, Bogusław HOŚCIŁO²

PROTOTYPOWY, HYDRODYNAMICZNY MINIGENERATOR ENERGII ELEKTRYCZNEJ DO PRACY W PRZEPLYWIE KANAŁOWYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę numeryczną i badania prototypowych rozwiązań minigeneratorów energii elektrycznej projektowanych do montażu w rurociągach o niewielkich średnicach. Zaprezentowano konstrukcję stanowiska badawczego symulującego przepływy zbliżone do rzeczywistych, umożliwiające testowanie różnych geometrii wirników przy zmiennych warunkach przepływu. Do optymalizacji geometrii wirników miniaturowych hydrogeneratorów wykorzystano analizę CFD. Wyznaczono charakterystyki miniaturowych silników krokowych pracujących jako generatory energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: minigenerator, hydrogenerator, prototyp, stanowisko badawcze

A PROTOTYPICAL HYDRODYNAMIC MINI GENERATOR OF ELECTRIC ENERGY TO BE USED IN THE CHANNEL FLOW

Summary. This work presents the numerical analysis and scientific research of prototypical solutions for mini generators of electric energy to be assembled in small diameter pipelines. Additionally, this papers presents the construction of a test stand stimulating similar flow to the actual flow allowing testing various geometry of impellers at variable conditions. In order to optimize the impellers geometry of hydro generators the cfd analysis has been used. The characteristics of miniature stepper motors working as electric energy generators have also been assigned.

Key words: mini generator, hydro generator, prototype, test stand

1. WPROWADZENIE

Minigeneratory mocy to coraz popularniejsze urządzenia, które wytwarzają prąd, wykorzystując drgania mechaniczne podłoża, różnice temperatur oraz światło. Minigeneratory dostarczają energię do bezprzewodowych czujników, urządzeń kontrolnych w sprzęcie gospodarstwa domowego czy w układach elektronicznych. Mają zastosowanie wszędzie tam, gdzie zasilane sieciowe jest niemożliwe lub trudne do uzasadnienia. Odrębną grupą urządzeń są hydrogeneratory przetwarzające energię strugi wody w przepływie kanałowym na energię

¹ Manufacturing Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University in Białystok, Poland, e-mail: r.kaczynski@pb.edu.pl.

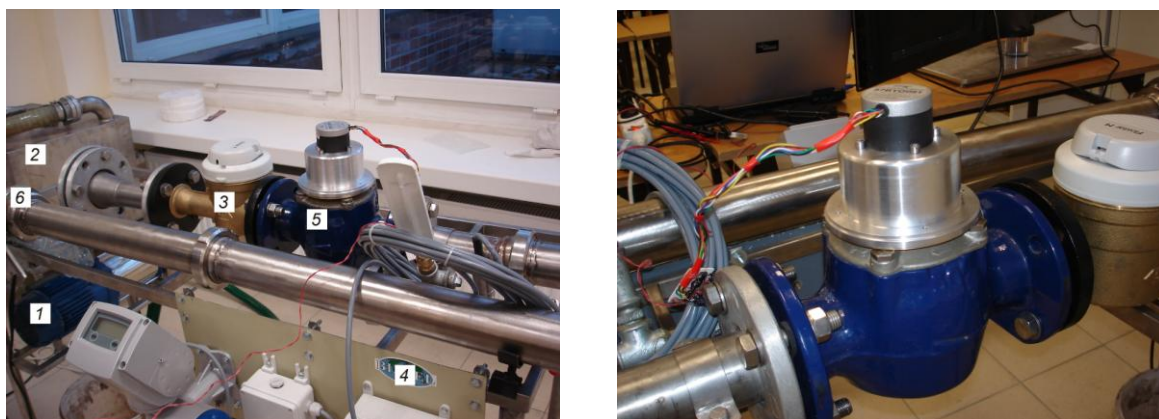
² Manufacturing Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University in Białystok, Poland, e-mail: b.hoscilo@pb.edu.pl.

elektryczną. Główne zespoły tych maszyn to różnorakie turbiny, elementy przeniesienia napędu oraz generatory. Warunki pracy minigeneratora w przepływie kanałowym, jakim jest rurociąg, znacznie odbiegają od warunków panujących w hydro-elektrowniach [1]. Przede wszystkim prędkość strugi, z racji redukcji strat przepływu, nie przekracza 2,5 m/s, natomiast średnia prędkość mieści się w przedziale 0,3-0,6 m/s. Z założenia generator powinien minimalnie zakłócać przepływ oraz charakteryzować się wysoką sprawnością i małymi gabarytami. Do optymalizacji konstrukcji wirnika wykorzystywana jest analiza przepływów CFD [2]. Projektowana konstrukcja zakłada możliwość wykorzystania minigeneratora do instalacji w wodociągu o średnicy nieprzekraczającej 100 mm [3, 4]. Przepływająca zimna woda napędza turbinę, ta zaś przekazuje moment na generator energii elektrycznej.

2. BADANIA LABORATORYJNE PROTOTYPÓW HYDRODYNAMICZNEGO MINIGENERATORA ENERGII

2.1. Stanowisko badawcze

Do weryfikacji doświadczalnej założeń konstrukcyjnych minigeneratora zbudowano stanowisko badawcze (rys. 1) wyposażone w rurociąg o średnicy głównej 70 mm, lokalnie zastosowano redukcje umożliwiające przyłączenie urządzeń o innych średnicach. Czynnikiem roboczym jest woda pobierana przez pompę 1 ze zbiornika 2. Pojemność zbiornika to 125 dm³. Woda jest tłoczona przez pompę o regulowanej bezstopniowo prędkości obrotowej, zasilanej przez przemiennik częstotliwości. Przepływ mierzy wodomierz 3 wyposażony w licznik-przekaznik impulsów. W rurociągu zainstalowano czujniki do pomiaru ciśnienia i temperatury. Parametry pracy generatorów, impulsy odpowiadające wielkości przepływu, ciśnienie i temperatura czynnika roboczego są wysyłane do układu przetwarzającego dane 4 (panel przyłączy czujników oraz centrala CallBOX).



Rys. 1. Stanowisko badawcze minigeneratorów energii elektrycznej; po prawej stronie widoczny kompletny hydrogenerator zamontowany w obudowie licznika wody DN 50

Fig. 1. The test stand of electricity mini hydrogenerators, on the right side shows the complete hydro generator mounted in water flow meter DN 50

Zastosowana na stanowisku centrala CellBOX-H [5] jest zaawansowanym, programowalnym, wielokanałowym rejestratorem mikroprocesorowym, przeznaczonym do pomiaru i rejestracji parametrów sieci wodociągowej oraz umożliwiającym transmisję danych do systemu nadrzędnego w technologii GSM (SMS/GPRS/EDGE). Stanowi ona nieodzowny element współczesnych telemetrycznych systemów dyspozytorskich typu SCADA, łącząc

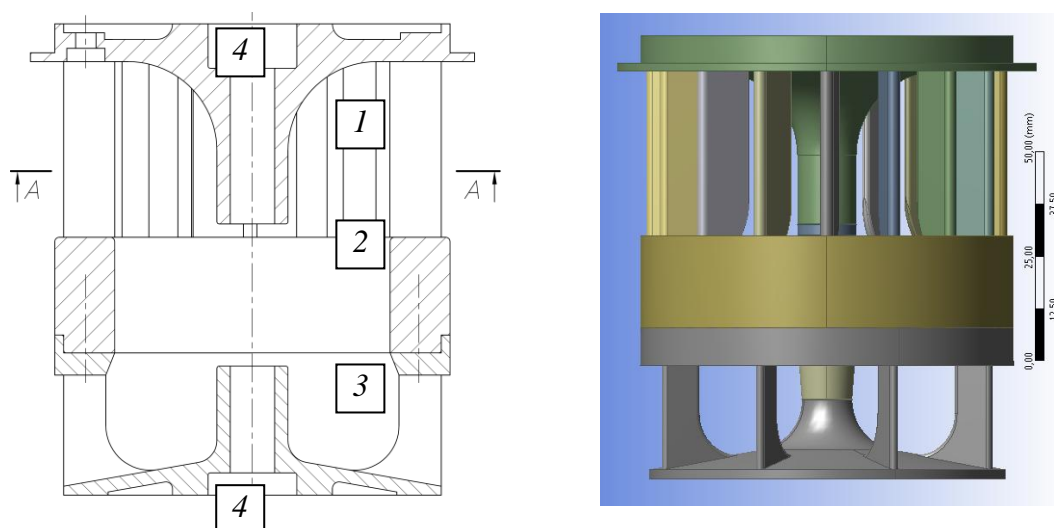
w sobie zalety nowoczesnych technologii gromadzenia i przetwarzania danych z najnowszymi metodami przesyłu informacji przez sieci bezprzewodowe. Na bazie tego urządzenia powstał i jest nadal rozwijany profesjonalny system telemetrii, monitoringu oraz zdalnej diagnostyki stanowiska i pracujących generatorów. W założeniach urządzenie CellBOX-H ma być zasilane energią z ogniw ładowanych przez prototypowe minigeneratory.

Na stanowisku zainstalowano prototypowy hydrogenerator 5. W końcu rurociągu znajduje się zawór dławiący 6, który pozwala na regulację ciśnienia panującego w układzie.

2.2. Prototyp miniturbin

Na stanowisku laboratoryjnym (rys. 1) wykonano testy kilku wariantów turbin wykorzystywanych do napędu minigeneratorów energii elektrycznej. W celu odwzorowania rzeczywistych warunków pracy określono zakresy prędkości strugi w rurociągu testowym, skorelowane z przepływami na obiekcie rzeczywistym. Do celów eksperymentu przyjęto średni przepływ maksymalny na poziomie $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Badaniom poddano kilka wersji napędów z turbinami śrubowymi. W trakcie testów regulowano wartość przepływu strugi, zmieniając przemiennikiem częstotliwości prędkość obrotową napędu pompy, a tym samym jej wydatek.

W celu przeprowadzenia badania wirników turbin o różnej geometrii, przy wykorzystaniu całego przekroju strugi, zaprojektowano i wykonano wkład formujący przepływ, instalowany w korpusie wodomierza DN 50, zilustrowany na rys. 2. Jest to konstrukcja oparta na zasadzie działania dużych, pionowych turbin wodnych Kaplana. Kierownice 1 (rys. 2) mają za zadanie formowanie strugi wody wprowadzanej do głównego kanału turbiny 2. W tym miejscu ma być instalowany badany wirnik turbiny, podparty w tulejach łożyskowych 4. Ciecz robocza wprowadzona w górnej części kanału odpływa pierścieniową komorą wylotową 3. Dzięki takiej konstrukcji możliwe jest łatwe wymianianie wirników turbin oraz sterowanie kierownicami w celu optymalnego dopasowania strugi do badanego w danym momencie wirnika. Kanał składa się z elementów wykonanych w technologii szybkiego prototypowania na drukarce 3D.



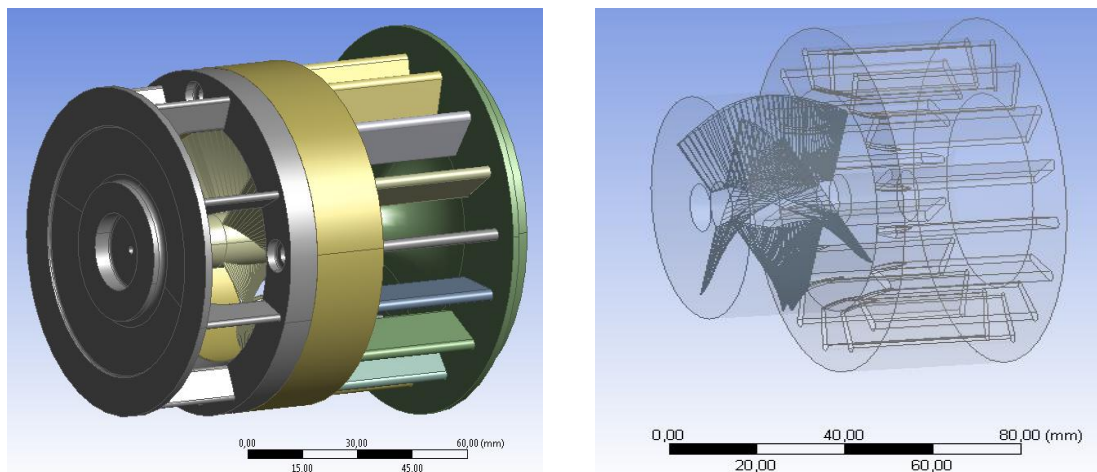
Rys. 2. Kanał hydroturbiny zainstalowany w wodomierzu DN 50, umożliwiający badania wirników miniturbin o różnej geometrii: 1 – kierownice dolotowe, 2 – przestrzeń pracy turbiny, 3 – wylot wody, łożatki wsparcze, 4 – gniazdo łożyskowe miniturbin

Fig. 2. Turbine throat of mini hydro generator mounted in water flow meter DN 50: 1 – wicket gate, 2 – area of turbine, 3 – water outlet with support construction, 4 – bearing seat of mini turbines rotor

3. ANALIZA NUMERYCZNA, OPTIMALIZACJA GEOMETRII WIRNIKA

W trakcie prac nad stanowiskiem równolegle prowadzone były prace związane z optymalizacją prototypu hydrogeneratora. Pierwsze badania tego urządzenia na opisywanym powyżej stanowisku pozwoliły na weryfikację modelu numerycznego przepływów w zespole mini-turbiny. Symulacje wykonano w środowisku ANSYS FLUENT ver.13.0. Model numeryczny bazował na następujących założeniach:

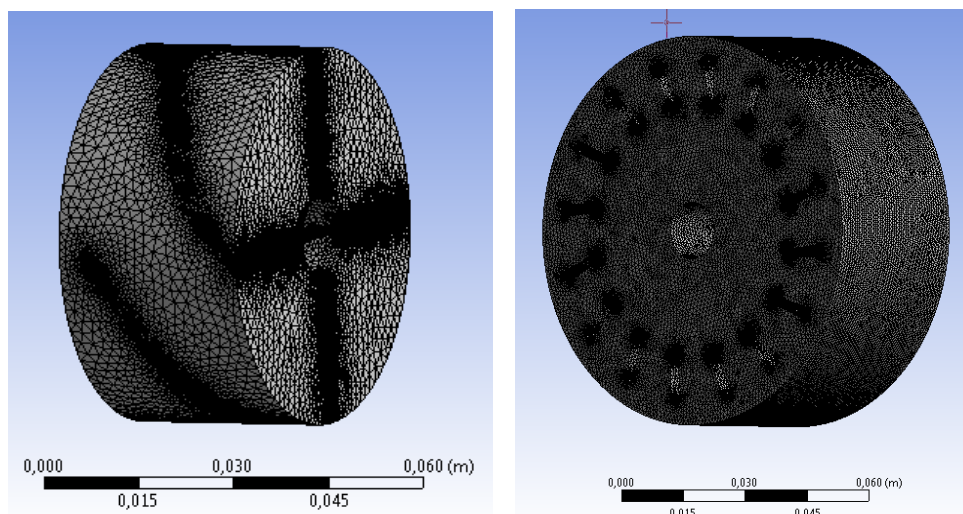
- geometria według rys. 3,
- założone wstępnie prędkości obrotowe rpm = 250 i 400 obr/min,
- gęstość wody, to $998,2 \text{ kg/m}^3$,
- prędkość przepływu = $0,3 \text{ m/s}$ (wartość średnia według informacji z rzeczywistych punktów pomiarowych).



Rys. 3. Geometria turbiny wodnej poddana analizie CFD

Fig. 3. The geometry of the water turbine for Computational Fluid Dynamics Simulation

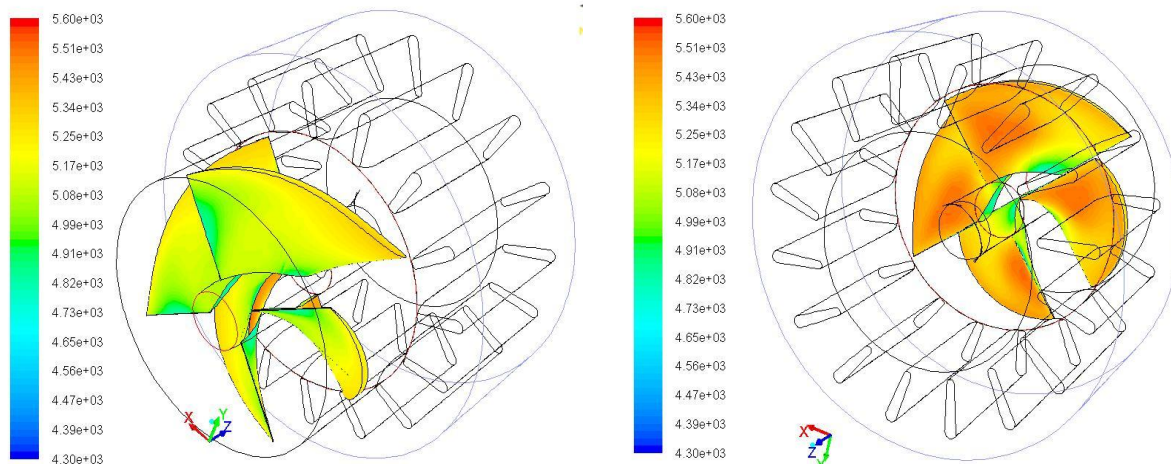
Wygenerowano siatkę dla obszarów komory wlotowej i wirnika (rys. 4). Na wstępne wyniki składają się rozkłady prędkości [m/s] i ciśnienia [Pa] (rys. 5 i 6).



Rys. 4. Czworosienna siatka numeryczna: a) przestrzeni roboczej turbiny, b) kierownicy dolotowej

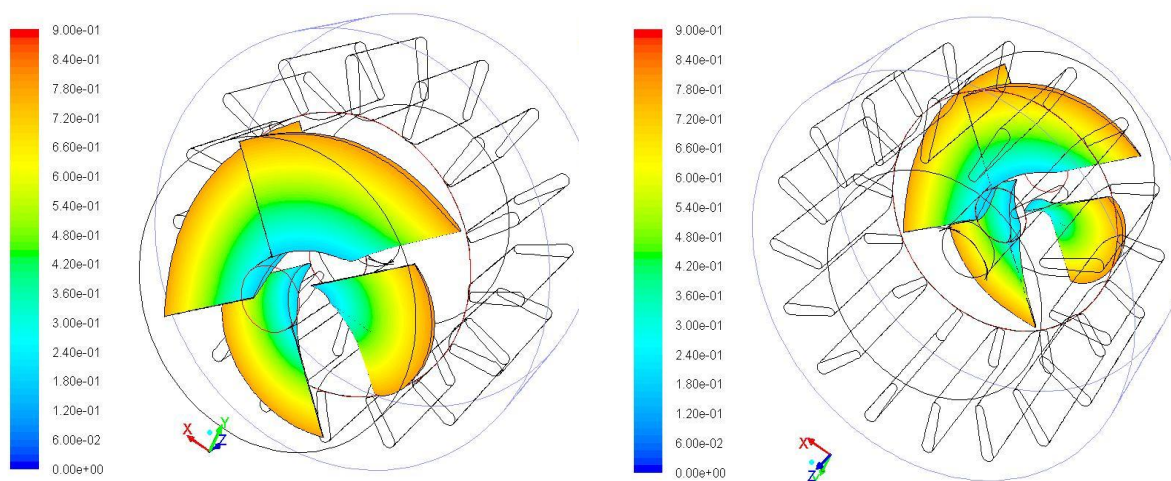
Fig. 4. Numerical tetrahedral mesh: a) the turbine, b) the wicket gate

Po analizie rezultatów symulacji CFD podjęto decyzję o kierunkach optymalizacji układu. Wstępnie zaprojektowano skorygowaną geometrię wirnika, eliminując obszary o małych wartościach rozkładów prędkości, zwiększono także liczbę łopatek wirnika. Spodziewany efekt to zwiększenie różnicy ciśnień nad i pod profilem.



Rys. 5. Rozkład ciśnienia [Pa] na łopatkach wirnika; analiza numeryczna dla prędkości obrotowej 250 rpm

Fig. 5. Pressure distribution [Pa] on the rotor blades; numerical analysis at the speed of 250 rpm



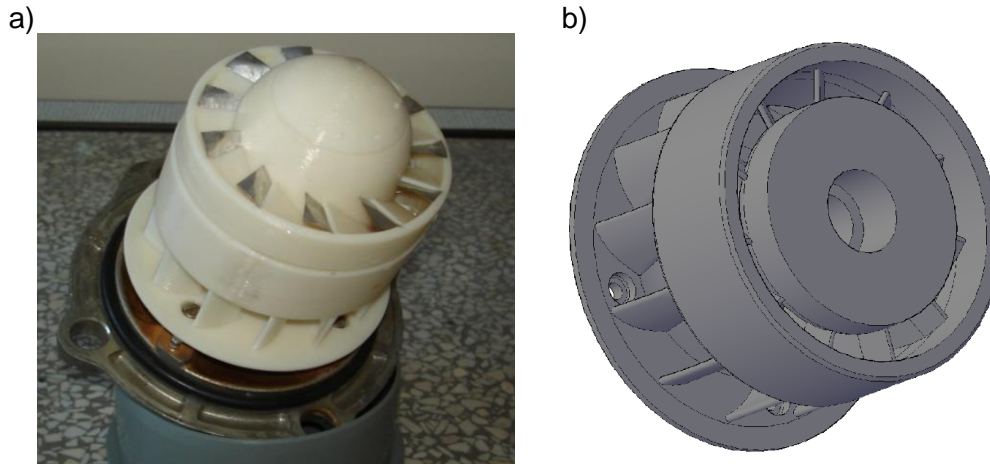
Rys. 6. Rozkład prędkości [m/s] na łopatkach wirnika; analiza numeryczna dla prędkości obrotowej 250 rpm

Fig. 6. Velocity distribution [m/s] on the rotor blades; numerical analysis at the speed of 250 rpm

Na rys. 7 zilustrowano zmodyfikowany zespół hydroturbinę przed montażem w korpusie wodomierza DN 50. Ze względów technologicznych, przedłużenia łopatek wirnika wykonano z cienkiej blachy (ograniczenie minimalnej grubości łopatek wykonywanych w tworzywie ABS). Wykonano pomiary wpływu geometrii łopatek wirnika i kierownic na uzyskiwaną prędkość obrotową turbiny.

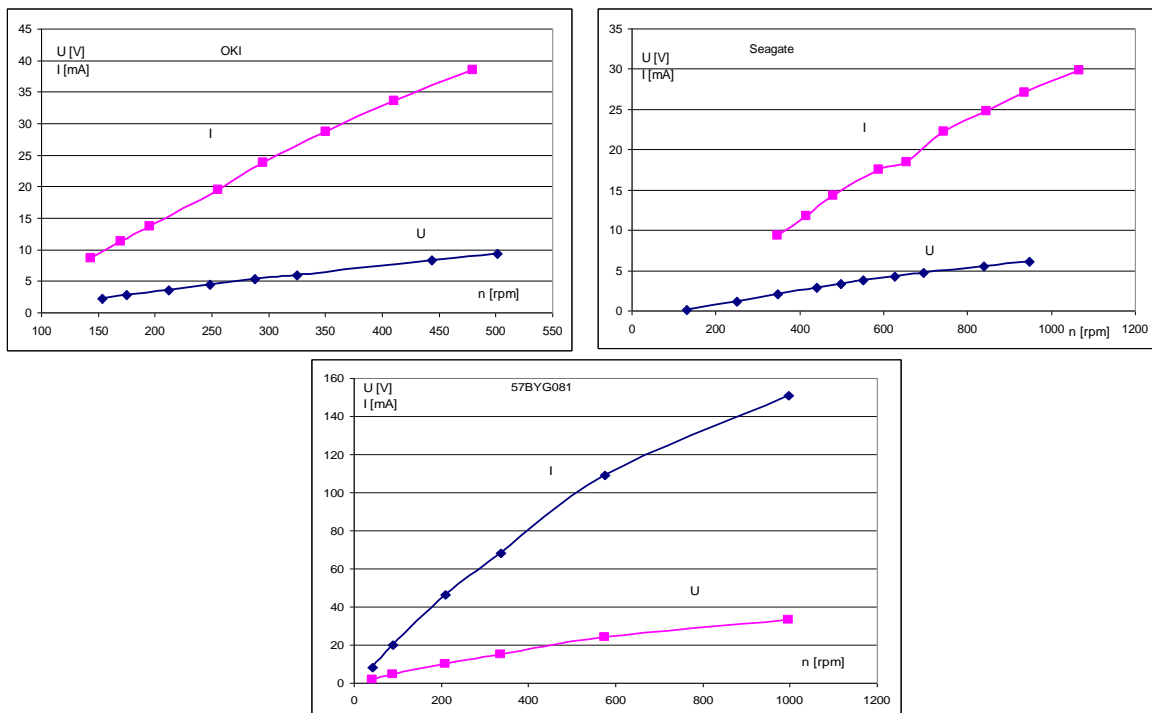
W pierwszym etapie prób turbiny współpracowały z generatorami na bazie silników krokowych, wykorzystywanych w napędach drukarki, dysku komputera oraz silnika 57BYG081. Charakterystyki prądu i napięcia tych maszyn w funkcji prędkości obrotowej ilustruje rys. 8.

W trakcie pomiarów, po wstępnej analizie uzyskanych wyników, można przyjąć za najbardziej obiecujące rezultaty uzyskane przy użyciu wirnika, który został przedstawiony na rys. 7, generatora 57BYG081 (z wynikami przedstawionymi na rys. 8). W dalszej części badań skupiono się na dokładniejszym zilustrowaniu pracy tego zespołu.



Rys. 7. Propozycja zmiany geometrii wirnika po analizie danych z symulacji numerycznej: a) kompletny wkład turbinowy wykonany w technologii rapid prototyping, b) układy kierownic głównych i pomocniczych turbiny

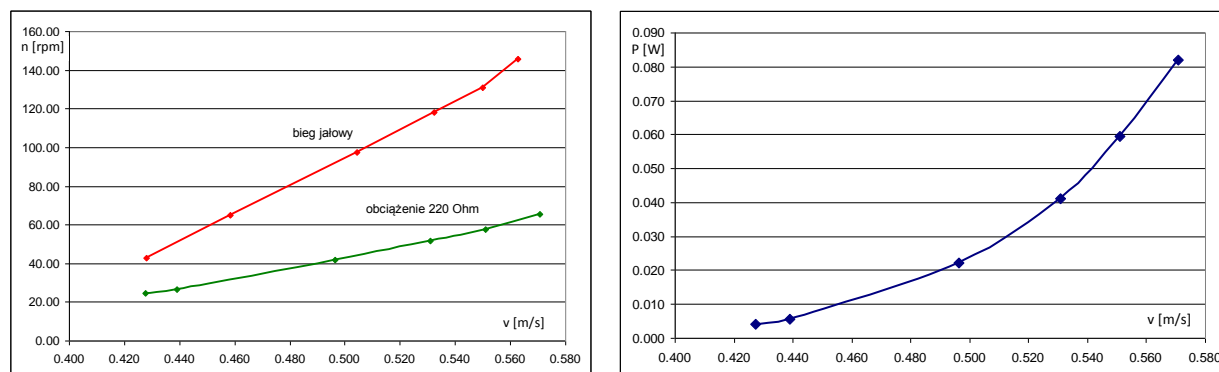
Fig. 7. Modify the geometry of the rothor after numerical simulation CFD: a) rapid prototyping of mini hydrogenerator, b) wicket gate of turbine



Rys. 8. Charakterystyki napięcia i prądu w funkcji prędkości obrotowej wirnika generatorów: silnika drukarki OKI, napędu dysku komputerowego Seagate oraz silnika 57BYG081; obciążenie rezystancyjne 220 Ohm

Fig. 8. Voltage and current as a function of rotor speed of generator: engine of OKI printer, steeper motor of disk drive and steeper motor 57BYG081

Rezultaty badań minihydrogeneratora oraz zależność uzyskiwanej mocy w funkcji prędkości strugi zilustrowano na rys. 9. Badania przeprowadzono, obciążając generator sumą rezystancji mostka prostowniczego i rezystora 220 Ohm. Sprawdzono zachowanie się urządzenia w warunkach pracy normalnej i biegu bez obciążenia. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów określono próg rozruchu minigeneratora. Minimalna prędkość przepływu uruchamiająca obroty turbiny to 0,43 m/s. Jest to kinetyczny próg rozruchu, wynikający z energii kinetycznej płynącej wody. Zasadniczą energią napędzającą minigenerator powinna być energia wewnętrzna wody. Rzeczywisty próg rozruchu może być niższy, jego wartość da się określić w instalacji, w konkretnym, rzeczywistym rurociągu.



Rys. 9. Charakterystyki prędkości strugi wody w funkcji obrotów turbiny, w warunkach pracy normalnej i biegu luzem, oraz uzyskiwanej mocy w rurociągu o średnicy 50 mm

Fig. 9. The characteristics of the water stream velocity as a function of turbine speed and obtained the power in the pipeline with a diameter of 50 mm

Jak wynika z rys. 9, w rurociągu o średnicy 50 mm, przy prędkości przepływu nieprzekraczającej 0,6 m/s, przekształceniu na energię elektryczną ulega w zasadzie tylko energia wewnętrzna wody. Energia kinetyczna stanowi mniej niż dwa promile energii całkowitej cieczy i jej udział w pozyskiwaniu mocy jest znikomy. Badania dotyczą zatem tylko przekształcania energii kinetycznej cieczy i w niewielkim stopniu energii wewnętrznej wody. Pełne wyniki będą możliwe do uzyskania po instalacji minigeneratora w obiekcie rzeczywistym.

4. WNIOSKI

Do celów optymalnego ładowania baterii ogniów najkorzystniejsze wydaje się wykorzystanie generatora na bazie silnika krokowego 57BYG081. Silnik ten jest maszyną dwufazową z wyprowadzeniami początków i końców cewek stojana (4 pary cewek, 8 przewodów). Wyprowadzenia można łączyć parami, a następnie prostować przebieg napięcia lub wykorzystać mostek prostowniczy dla każdej z par cewek niezależnie. W badanym przypadku wykorzystano połączenia szeregowo cewek. Tak ukształtowany przebieg został wyprostowany standardowym jednoamperowym mostkiem prostowniczym. W celu zwiększenia sprawności układu prostowniczego można zastosować diody Schottky'ego. Do uzyskania innych wartości napięć i prądów niż generowane bezpośrednio w urządzeniu należy zastosować odpowiednio dobraną przetwornicę.

Energią przetwarzaną na prąd elektryczny powinna być energia wewnętrzna płynu, będąca funkcją ciśnienia panującego w wodociągu. Energia kinetyczna, przy zarejestrowanej na obiektach rzeczywistych prędkościach przepływu, jest niewystarczająca do zasilania układu ładowania baterii ogniów.

Przy prędkości strugi $v = 0,6$ m/s, w warunkach laboratoryjnych (na posiadanym stanowisku), turbina bez obciążenia osiąga ok. 145 obr/min, pod obciążeniem prędkość obrotowa spada do 65 obr/min, produkując moc na poziomie 80 mW. Z bilansu różnicy ciśnień można określić teoretyczną energię przetwarzaną na poziomie 0,4 J; strata na ciśnieniu to ok. 1,5%. Uzyskanie 250 obr/min turbiny pracującej pod obciążeniem spełnia wymagania co do generowanej mocy. Do analiz brane były średnie prędkości przepływów; większe wartości szczytowe dla danych warunków pozwalałyby na efektywne doładowywanie ogniów.

Bibliografia

1. Gładysiewicz G.: Pompy i turbiny wodne. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Turbiny wodne, Tom II, Warszawa 1951.
2. Styrylski M., Tomalik J., Grahl-Madsen M.: Computer aided engineering as a useful tool in hydraulic turbine design. The 9th International Scientific Conference COMPUTER AIDED ENGINEERING, Szklarska Poreba, Poland 2008.
3. Kaczynski R., Wilczewska I., Hoscilo B.: Construction analysis of mini-generator of electric energy using working medium flow as the working environment. Key Engineering Materials, Vol. 490 (2012), p. 45-53.
4. Kaczynski R.: Minigenerator of electric energy using working medium flow as the working environment for tribological nodes. Electro-energy News, Vol. 3, 2011, p. 11.
5. User Manual of CellBOX- H Recorder and HydraNT Communication Software. Biatel SA, 2004.