

Dariusz Borkowski, Tomasz Węgiel
Politechnika Krakowska

ANALIZA SPRAWNOŚCI TORU PRZETWARZANIA ENERGII MAŁEJ ELEKTROWNI WODNEJ ZE ZINTEGROWANĄ TURBINĄ PRACUJĄCĄ PRZY ZMIENNEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ

EFFICIENCY ANALYSIS OF ENERGY CONVERSION SYSTEM FOR SMALL HYDRO POWER WITH INTEGRATED TURBINE WORKING AT VARIABLE SPEED

Streszczenie: Jednym z najważniejszych aspektów przy wyborze systemu przetwarzania energii dla elektrowni wodnych jest ich sprawność. Małe elektrownie wodne, które w większości są elektrowniami przepływowymi, charakteryzują się koniecznością pracy przy zmiennych warunkach hydrologicznych. Z tego względu, tory przetwarzania energii powinny zapewniać wysoką sprawność w szerokim zakresie przepływów wody. Artykuł ten przedstawia analizę sprawności toru przetwarzania energii składającego się z turbiny śmigłowej zintegrowanej z generatorem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi. W celu zapewnienia wysokiej sprawności w szerokim zakresie przepływu wody wykorzystano możliwość pracy hydrozespołu ze zmienną prędkością obrotową, natomiast dopasowanie parametrów generowanej energii do wymagań systemu elektroenergetycznego zrealizowano poprzez energoelektroniczny układ przekształtnikowy AC/DC/AC. Prezentowana analiza dotyczy wszystkich elementów składowych toru przetwarzania energii rzeczywistego obiektu o mocy 75kW. W artykule zaprezentowano zarówno rozważania teoretyczne jak i rzeczywiste charakterystyki sprawności.

Abstract: One of the most important aspects in choosing the energy conversion system for water power plants is its efficiency. Small Hydropower Plants, which are mostly run-of-the-river plants, are characterized by necessity of working with changeable hydrological conditions. That is why their energy conversion systems should ensure high efficiency in a wide range of water flow.

This paper presents efficiency analysis of energy conversion system containing integrated propeller turbine with permanent magnet synchronous generator. In order to obtain high efficiency in a wide range of water flow the variable speed operation method, has been used. This solution requires a Power Electronic Unit in the energy conversion system to match the load and control the power flow from the generator to the grid. Presented analysis concerns all elements of energy conversion system of real object of 75kW power. This article contains both theoretical analysis, and real efficiency characteristics.

Słowa kluczowe: *zmienna prędkość obrotowa, generator z magnesami trwałymi, mała elektrownia wodna*
Keywords: *variable speed operation, PM synchronous generator, small hydropower plant*

1. Wstęp

Małe Elektrownie Wodne (MEW) są obiektami, których moc nie przekracza 5 MW. Opłacalność inwestycyjna MEW zależy głównie od kosztów jej budowy oraz od warunków hydrologicznych danej lokalizacji [1]. W większości przypadków MEW to elektrownie przepływowe, charakteryzujące się małymi możliwościami magazynowania wody. Z uwagi na dużą zmienność warunków hydrologicznych większości rzek w ciągu roku, wymagana jest praca w szerokim zakresie fluktuacji przepływu wody [2]. Turbiny o podwójnej regulacji, którą jest między innymi często wykorzystywana turbina Kaplana, spełniają te wymagania, jednakże są to

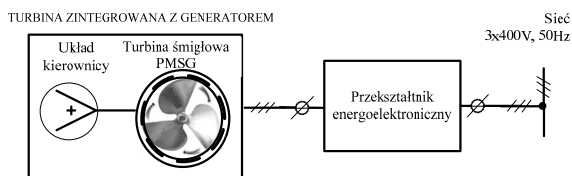
rozwiązania drogie z uwagi na złożony mechaniczny system sterowania łopatom wirnika i kierownicy. Turbiny tego typu instaluje się przeważnie w dużych elektrowniach wodnych, gdyż dla MEW użycie ich jest często nieuzasadnione ekonomicznie. Rozwiązaniem alternatywnym jest zastosowanie zmiennej prędkości obrotowej, która pozwala dopasować prędkość turbiny do aktualnych warunków hydrologicznych tak, aby uzyskać maksymalną możliwą sprawność [3]. Turbina śmigłowa ze stałymi łopatom wirnika jest w tym przypadku najbardziej obiecującym rozwiązaniem dla lokalizacji o niskich spadach wody [4]. Takie rozwiązanie znacząco upraszcza mechaniczną część systemu jednak

wymaga zastosowania przekształtnika energoelektronicznego dopasowującego parametry energii elektrycznej generatora do węzła systemu elektroenergetycznego [5]. Niskie prędkości obrotowe turbin wodnych w większości przypadków wymagają stosowania przekładni mechanicznych. Stosując generatory synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi o dużej liczbie par biegunów można wyeliminować konieczność stosowania przekładni. Dodatkową zaletą generatorów wzbudzonych magnesami trwałymi w porównaniu z generatorami asynchronicznymi jest ich wysoka sprawność w szerokim zakresie zmian prędkości i obciążenia [6].

Koszty budowy elektrowni wodnej w przeważającej części dotyczą infrastruktury budowlanej, czyli budynku elektrowni oraz kanału dopływowego i odpływowego [1]. Konstrukcja budynku elektrowni może zostać znacząco uproszczona przy zastosowaniu turbiny wodnej zintegrowanej z generatorem [7]. Rozwiązanie to eliminuje również konieczność wyprowadzenia wału z komory turbiny. Ponadto, gabaryty hydrozespołu są znacząco zmniejszone a jego instalacja jest stosunkowo łatwa i prosta.

Innowacyjne rozwiązanie MEW zawierającej dwa zintegrowane hydrozespoły o łącznej mocy 150 kW (parametry znamionowe jednego hydrozespołu $P_{NG}=75\text{ kW}$, $U_{NG}=500\text{ V}$, $n_N=300\text{ obr/nim}$) przedstawiono w pracy [7].

W niniejszym artykule natomiast dla wspomnianej MEW, zostanie zaprezentowana analiza sprawności poszczególnych elementów toru przetwarzania energii dla jednego z hydrozespołów w skład, którego wchodzi zintegrowana turbina wodna z generatorem synchronicznym z magnesami trwałymi oraz przekształtnik energoelektroniczny (Rys. 1).

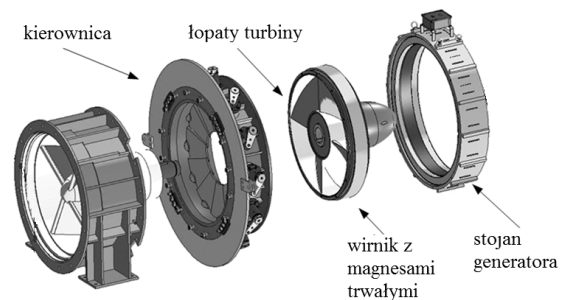


Rys. 1. Główne elementy toru przetwarzania energii MEW

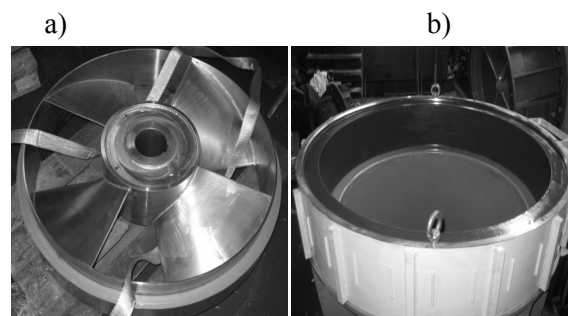
2. Zintegrowana turbina z generatorem

2.1 Konstrukcja hydrozespołu

Budowa hydrozespołu opiera się na konstrukcji rurowej (Rys. 2). Stojan generatora ma 3-fazową klasyczną budowę, jednak obwód magnetyczny musi być specjalnie zaprojektowany dla konkretnych wymiarów turbiny, wynikających z wartości znamionowego spadku i przepływu wody dla danej lokalizacji (Rys. 3.b). Dodatkowo, uzwojenia stojana, z uwagi na izolację elektryczną, powinny być zabezpieczone przed wodą za pomocą specjalnej masy uszczelniającej. Łopaty turbiny wodnej zamontowane są w wirniku i przymocowane do pierścienia, na którym umieszczone są magnesy trwałe (Rys. 3a). Pierścień przenosi moment mechaniczny z turbiny, przez co wyeliminowany został wał zewnętrzny.



Rys. 2. Elementy składowe hydrozespołu



Rys. 3. Elementy rzeczywistego hydrozespołu 75 kW: a) wirnik z łopatami turbiny, b) stojan

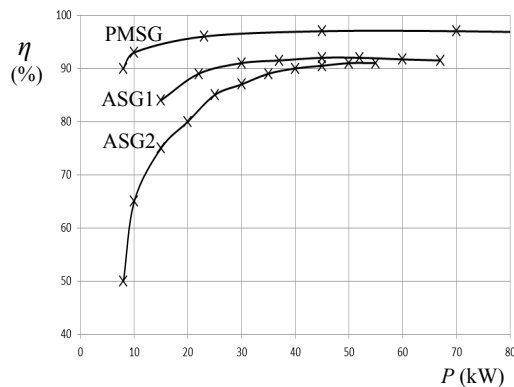
Dodatkową zaletą integracji turbiny wodnej i generatora jest efektywne chłodzenie stojana poprzez wodę w szczelinie między stojanem i wirnikiem.

Kolejnym ważnym elementem hydrozespołu jest kierownica, która stanowi zamknięcie wody do turbiny oraz pełni funkcję regulacji przepływu wody przez turbinę.

2.2 Generator wzbudzany magnesami trwałymi

Generator synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi charakteryzuje się wyższą sprawnością w szerokim zakresie zmian obciążenia w porównaniu z generatorami asynchronicznymi. Na rysunku 4 przedstawiono wartości sprawności generatora w funkcji obciążenia, gdzie porównano ją z przykładowymi dwoma generatorami asynchronicznymi.

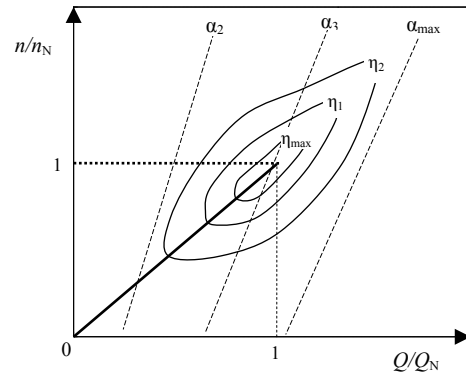
Można zauważyć, że sprawność generatora synchronicznego jest stała w szerokim zakresie zmian obciążenia. Podobnie jest w przypadku zmiany sprawności w zależności od prędkości obrotowej.



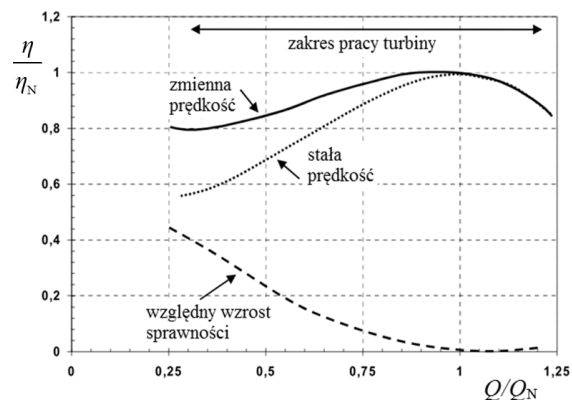
Rys. 4. Sprawność generatora synchronicznego (PMSG) w funkcji mocy zestawiona z przykładowymi generatorami asynchronicznymi (ASG1 [8], ASG2 [4])

2.3 Turbina śmigłowa

Całkowita sprawność hydrozespołu zależy głównie od sprawności turbiny, która jest silnie zależna od prędkości obrotowej oraz od wartości przepływu wody. Zależności te prezentuje charakterystyka uniwersalna turbiny. Przedstawia ona krzywe sprawności na płaszczyźnie prędkości obrotowej i przepływu wody (Rys. 5). Zauważyć należy, że najwyższą sprawność uzyskuje się poprzez zmianę prędkości wraz ze zmianą przepływu wody (linia ciągła pogrubiona). Wzrost sprawności w porównaniu z pracą przy stałej prędkości (linia kropkowana) uzyskuje się szczególnie w zakresie małych wartości przepływu wody. Zależność ta została przedstawiona na rysunku 6.



Rys. 5. Charakterystyka uniwersalna turbiny śmigłowej ($\eta_{max}=0.8$)



Rys. 6. Krzywe sprawności turbiny [9]

Drugim parametrem obok przepływu wody, który znacząco wpływa na zmianę sprawności turbiny, jest spadek wody definiowany, jako różnica poziomu wody górnej i dolnej. Wpływ zmian spadku na wartość sprawności został przedstawiony w artykule [10]. Wynika z niego, że zmienna prędkość obrotowa zapewnia prawie stałą, niezależną od zmiany spadku, sprawność turbiny.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że zmienna prędkość obrotowa przynosi znaczące korzyści.

2.4 Analiza strat mechanicznych w szczelinie

Obecnością wody w szczelinie pomiędzy stojanem a wirnikiem przyczynia się do powstawania dodatkowych strat mocy hydrozespołu wywołanych tarciami wirnika o ciecz. Straty te mogą być znaczące i przykładowo w silnikach głębinowych szacuje się je na poziomie 3-12% mocy użytecznej [11]. Analityczny opis zjawiska strat w szczelinie sprowadza się do zamodelowania generatora, jako dwóch współosiowych cylindrów. Z uwagi na skomplikowany charakter zjawiska obliczenia strat dokonuje się na podstawie

zależności empirycznych. Poniżej przedstawiono często wykorzystywaną w tego typu obliczeniach zależność.

$$\Delta P = \lambda \cdot l \cdot D^4 \cdot n^3 \cdot 10^{-1} \text{ [W]} \quad (1)$$

gdzie: λ – współczynnik oporu hydraulicznego,
 l – długość szczeliny [m],
 D – średnica wirnika [m],
 n – prędkość obrotowa [obr/min]

Współczynnik oporu hydraulicznego zależy od wielu czynników, takich jak np.: chropowatości powierzchni, temperatury, czy charakteru przepływu cieczy. Jego wartość można wyznaczyć z diagramu Moody'ego na podstawie współczynnika względnej chropowatości ε wyrażonego wzorem:

$$\varepsilon = \frac{e}{\delta} \quad (2)$$

gdzie: e – chropowatość powierzchni [mm],
 δ – wysokość szczeliny [mm],

oraz liczby Reynoldsa, która określa charakter przepływu cieczy:

$$Re = \frac{\omega \cdot r \cdot \delta}{\nu} \quad (3)$$

gdzie:

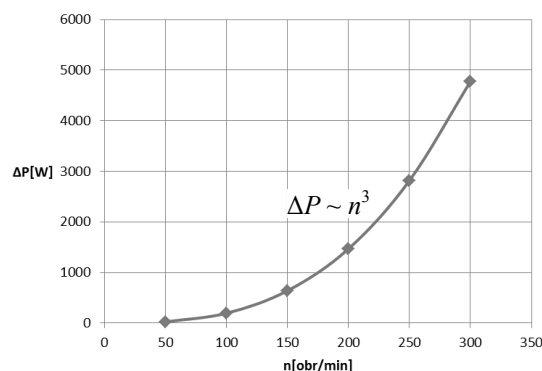
ω – prędkość kątowna $\frac{n \cdot \pi}{30} \left[\frac{rad}{s} \right]$,
 r – promień wirnika $D/2$ [m],
 δ – wysokość szczeliny [m],
 ν – współczynnik lepkości kinematycznej wody w temp 15°C ($\nu = 1.13 \cdot 10^{-6} [m^2/s]$)

Biorąc pod uwagę rzeczywiste wymiary generatora: $l = 0,1$ m, $D = 0,9$ m, $\delta = 0,005$ m oraz chropowatość powierzchni na poziomie 0.01 mm, można obliczyć wartość strat mechanicznych dla różnych prędkości obrotowych (Tabela 1).

Tabela 1. Wyniki obliczeń start mocy

n [obr/min]	100	150	200	300
Re	20850	31275	41700	62550
λ	0.03	0.029	0.028	0.027
ΔP [W]	196	642	1470	4780

Zmiana wartości liczby Reynoldsa w zależności od prędkości kątowej nie wpływa znacząco na zmianę współczynnika oporu hydraulicznego. Stwierdzić można, więc że straty mocy mechanicznej w szczelinie zależą od prędkości obrotowej w trzeciej potęgze (Rys. 7).



Rys. 7. Starty mechaniczne w szczelinie w funkcji prędkości obrotowej wirnika

Dla stanu znamionowej pracy straty te są znaczące i stanowią 6,4% mocy znamionowej hydrozespołu. Należy podkreślić, że obliczenia te dotyczą przypadku idealnego tzn. nie uwzględnia się ekscentryczności statycznej i dynamicznej generatora oraz zakłada się brak zanieczyszczeń w wodzie występującej w szczelinie, które mogą znacząco zwiększać straty mechaniczne.

3. Przekształtnik energoelektroniczny

Przekształtnik energoelektroniczny AC/DC/AC pełni dwie podstawowe funkcje w prezentowanym torze przetwarzania energii. Pierwszą z nich jest dopasowanie zmieniających się parametrów energii generatora synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi do stałych wartości (napięcie i częstotliwość) wymaganych przez system elektroenergetyczny. Drugim zadaniem układu przekształtnikowego jest regulacja mocy generatora zgodnie z aktualnymi warunkami hydrologicznymi wg zadanego kryterium optymalizacyjnego. Ponadto układ ten utrzymuje wymagane parametry jakości energii elektrycznej poprzez minimalizację zawartości wyższych harmonicznych prądów płynących do sieci oraz dodatkowo może kontrolować i kompensować moc bierną.

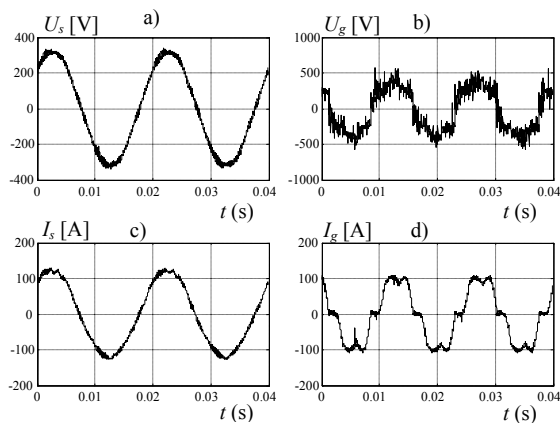
Podobne rozwiązania są stosowane w systemach z turbinami wiatrowymi. Najbardziej rozpowszechnioną strukturą przekształtnika jest pełno wymiarowy układ AC/DC/AC [5].

Zastosowany w omawianej MEW układ przekształtnika pracuje w oparciu o algorytm DPC-SVM, czyli bezpośredniego sterowania mocą ze sprzężeniem od wirtualnego strumienia sieci. Zasada działania tego układu oraz wpływ poszczególnych jego parametrów na jakość regulacji hydrozespołu zostały przedstawione w pracach [12] i [13].



Rys. 8. Widok przekształtnika energoelektronicznego o mocy 90 kW

Przykładowe przebiegi czasowe napięć i prądów generatora oraz sygnałów wyjściowych przekształtnika zostały przedstawione na rysunku 9.



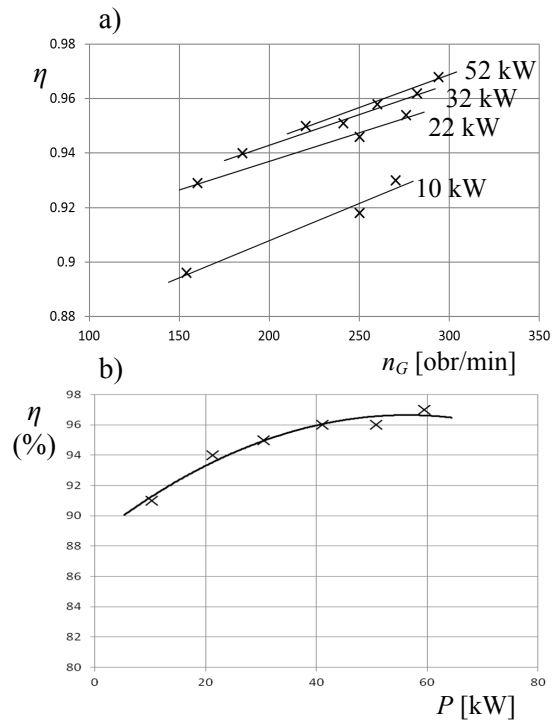
Rys. 9. Przykładowe przebiegi czasowe: a) napięcie sieci, b) napięcie generatora, c) prąd sieci, d) prąd generatora; dla parametrów: $n=298$ [obr/min], $P=54.9$ [kW].

Na przebiegach czasowych napięć sieci można zauważyć niewielką zawartość wyższych harmonicznych oraz brak przesunięcia fazowego między prądem i napięciem.

Przebiegi czasowe sygnałów generatora są mocno zniekształcone. Prąd generatora ma kształt typowy dla układów zasilanych z diodowego prostownika mostkowego.

Analizując przedstawione powyżej przebiegi czasowe napięć i prądów można na podstawie znanej formuły (4) wyznaczyć moce czynne: wejściową i wyjściową oraz określić sprawność przekształtnika.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \quad (4)$$



Rys. 10. Charakterystyki sprawności przekształtnika w funkcji: a) prędkości obrotowej generatora, b) mocy

Sprawność ta jest zależna od prędkości obrotowej generatora. Chcąc utrzymać stałą moc pobieraną z generatora przy niższych prędkościach obrotowych należy zwiększyć prąd przekształtnika z uwagi na mniejsze wartości generowanych napięć, przez co starty łączeniowe i przewodzenia elementów półprzewodnikowych rosną. Większe straty przy niskich prędkościach obniżają sprawność przekształtnika (Rys. 10a). Na rysunku 10b przedstawiono uśredniony wykres sprawności w funkcji mocy transferowanej przez przekształtnik. Wartości sprawności dla mocy większych niż 40 kW przekraczają 96%.

Tabela 2. Wartości sprawności poszczególnych elementów toru przetwarzania energii dla dwóch różnych punktów pracy

Elementy toru przetwarzania energii	η_1 $n_1=150$ rpm $P_1=10$ kW	η_{\max} $n_2=300$ rpm $P_2=60$ kW
Turbina śmigłowa*	0.55	0.74
Generator synchroniczny	0.9	0.97
Przekształtnik AC/DC/AC	0.91	0.97
Tor przetwarzania energii	0.45	0.70

* - z uwzględnieniem start w szczelinie

6. Podsumowanie

Artykuł przedstawia analizę sprawności toru przetwarzania energii opartego o innowacyjną konstrukcję zintegrowanej turbiny śmigłowej z generatorem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi. Uzyskany wynik maksymalnej sprawności (Tabela 2) jest porównywalny ze standardowymi układami stosowanymi w MEW. Dzięki zastosowaniu zmiennej prędkości obrotowej zaletą tego rozwiązania jest wysoka sprawność toru przetwarzania energii dla mniejszych mocy, zwiększenie zakresu pracy hydrozespołu (od 30 do 120% wartości znamionowego przepływu) oraz uniezależnienie sprawności od wartości spadku wody. Z uwagi na zmienne warunki hydrologiczne małych rzek ma to kluczowe znaczenie w ocenie efektywności energetycznej elektrowni w ujęciu rocznym.

Zaprezentowane rozwiązanie stanowi ciekawą alternatywę dla standardowych rozwiązań stosowanych w MEW. Uproszczenie konstrukcji mechanicznej poprzez eliminację przekładni, wałów zewnętrznych oraz układu regulacji łopat turbiny prowadzi do zmniejszenia kosztów inwestycyjnych zapewniając jednocześnie wysoką sprawność przetwarzania energii w szerokim zakresie zmian warunków pracy elektrowni.

7. Literatura

- [1]. G.A. Aggidis, E. Luchinskaya, R. Rothschild, D.C. Howard, *The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential*, Renewable Energy, 35 (2010) p. 2632-2638.
- [2]. A. Wijesinghe, Loi Lei Lai, *Small Hydro Power Plant Analysis and Development*, in Proceedings of the 4th International Conference DRPT, China, 2011, p. 25-30.

- [3]. J. Fraile-Ardanuy, J.R. Wilhelmi, J.J. Fraile-Mora, J.I. P'erez, *Variable-Speed Hydro Generation: Operational Aspects and Control*, IEEE Transactions On Energy Conversion, vol. 21, No. 2, June 2006, p. 569 – 573.

- [4]. Status report on variable speed operation in small hydropower, Energie publication, Austria, 2000: http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/small_hydro/statusreport_vspinhsp_colour2.pdf [dostęp: 06.08.2012]

- [5]. S. Nababan, E. Muljadi, F. Blaabjerg, *An Overview of Power Topologies for Micro-hydro Turbines*, in Proceedings of the 3rd International Symposium PEDG, Aalborg, Denmark, 2012, p. 737-744.

- [6]. I. Boldea, *The Electric Generators Handbook, Volume II: Variable speed generators*, CRS Press, Taylor & Francis Group, 2006.

- [7]. T. Węgiel, D. Borkowski, *Variable Speed Small Hydropower Plant*, in Proceedings of the 3rd International Symposium PEDG, Aalborg, Denmark, 2012, p. 167-174.

- [8]. W. Deprez, A. Dexters, C. Bastiaensen, F. Parasiliti, R. Belmans, *Induction machine efficiency in motor and generator mode*, in Proceedings of the Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS), Beijing, China, June 10-13, 2007.

- [9]. B. Köhler, *Drehzahlvariable, getriebelose Wasserkraftanlage mit permanentmagneterregtem Synchrongenerator und Francis turbine*, Fortschritt-Berichte VDI, Series 21 (Elektrotechnik), No. 256, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.

- [10]. D. Roberts, J. Bard, D. Shenhai, *Variable speed operation of axial flow turbines*, Hydropower and Dams, 2/98, 1998.

- [11]. Kubzdela K., Kubzdela S.: *Straty mocy wywołane tarciem wirnika o ciecz wypełniającą wnętrze silnika głębinowego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr.48, str. 343-349, 2000.

- [12]. Borkowski D., Węgiel T.: *Optymalizacja przetwarzania energii dla małych elektrowni wodnych z generatorami pracującymi ze zmienną prędkością obrotową*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 92/2011, pp. 121-126.

- [13]. Węgiel T., Borkowski D.: *Doświadczenia z eksploatacji MEW o zmiennej prędkości obrotowej*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 3/2012 (96), str. 97-103.

Autorzy

Dr inż. Dariusz Borkowski *, Dr inż. Tomasz Węgiel **
Politechnika Krakowska,
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej,
* tel. +48 12 628-26-59, email: dborkowski@pk.edu.pl
**tel. +48 12 628-26-21, email: pewegiel@cyfronet.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Jakub Bernatt