

Tomasz Z. Kaczmarczyk, Grzegorz Żywica, Piotr Klonowicz
Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk

ZASTOSOWANIE PRĄDNIC Z MAGNESAMI TRWAŁYMI DO BUDOWY MIKROTURBOGENERATORÓW ORC

APPLICATION OF PERMANENT MAGNET GENERATORS FOR THE CONSTRUCTION OF ORC MICROTURBOGENERATORS

Streszczenie: W pracy omówiono zagadnienia związane z projektowaniem nowego typu maszyn elektrycznych dedykowanych do pracy w układach kogeneracyjnych małej mocy. Do konwersji ciepła odpadowego ze spalania biomasy na energię elektryczną zastosowano mikroturbogenerator zasilany parą czynnika niskowrzącego HFE7100. Wysokoobrotowy turbogenerator o mocy nominalnej 2,5 kWe pracuje w obiegu ORC, który oprócz energii elektrycznej umożliwia produkcję energii cieplnej na poziomie 20 kW. Do budowy wirnikowej maszyny ekspansyjnej zastosowano trójfazowy, synchroniczny silnik z magnesami trwałymi o maksymalnej prędkości obrotowej 80000 obr/min. Zaprojektowany i zbudowany mikroturbogenerator jest hermetyczny i posiada bezolejowy system łożyskowania. Ponieważ elementy generatora elektrycznego pracują w podwyższonych temperaturach, w artykule poruszono zagadnienia związane z wymaganiami stosowania zewnętrznego układu chłodzenia. W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań mikroturbogeneratora parowego pracującego w instalacji ORC z czynnikiem niskowrzącym. Zamieszczono charakterystyki cieplno-przepływowe instalacji oraz omówiono warunki termodynamiczne jakie winny być spełnione podczas pracy ekspanderów parowych. Przedstawiono potencjalne zastosowanie małych kogeneratorów ORC z mikroturbinami parowymi w budowie układów elektroenergetycznych bazujących na OZE i ciepłe odpadowym.

Abstract: The article discusses issues related to the design of the new type of electric machines intended for operation in low power cogeneration systems. For the conversion of waste heat (coming from biomass combustion) to electricity, a microturbogenerator powered by a low-boiling medium's vapour (HFE7100) was used. The high-speed turbogenerator with a nominal power of 2.5 kWe works in the ORC system which, in addition to generating electricity, enables heat production of 20 kW. A three-phase synchronous permanent magnet motor, with a maximum rotational speed of 80,000 rpm, is an integral part of the developed expansion machine. The designed and manufactured microturbogenerator has a hermetic structure and is equipped with an oil-free bearing system. Since some elements of the electric generator must be able to operate at elevated temperatures, this article raises issues related to the use of an external cooling system. This paper reports selected results from studies of the vapour microturbogenerator that operated in the ORC installation with HFE7100 as the working fluid. Thermal and flow characteristics of the installation are presented as well. Furthermore, thermodynamic conditions that should be met during operation of the vapour expanders are discussed. It was shown that small ORC cogeneration systems with vapour microturbines could be successfully applied in the construction of electricity systems that utilise renewable energy sources and waste heat.

Słowa kluczowe: mikroturbogenerator, organiczny obieg Rankina, silnik z magnesami trwałymi, HFE7100
Keywords: microturbogenerator, organic Rankine cycle, permanent magnet motor, HFE7100

1. Wstęp

Zgodnie z dyrektywą 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. [1] Polska zobowiązała się do 15% udziału OZE w końcowym zużyciu energii brutto do 2020 roku. Dlatego w ostatnich latach promowano układy wykorzystujące energię słoneczną, wody (w tym geotermalną), wiatru czy chemiczną zawartą w m.in. biomasie. Z raportu [2] z 2017 roku wynika, że udziału OZE w końcowym zużyciu energii w Polsce będzie w przedziale od 10% do 13,8%. Stąd istnieje zapotrzebowanie rynku na układy elektroenergetyczne bazujące na OZE. Układy takie po-

winny charakteryzować się stabilną, bezpieczną pracą oraz minimalnym wpływem na środowisko naturalne przy jednoczesnym efektywnym wykorzystaniu lokalnych zasobów. Doskonale w powyższe wymagania wpasowują się układy CHP (Combined Heat and Power) w tym układy ORC (Organic Rankine Cycle). W układach ORC przeważnie stosowane są czynniki robocze niskowrzące, które w skojarzeniu ze źródłami niskotemperaturowymi (np. energia słoneczna, geotermalna czy ciepło odpadowe) mogą produkować energię elektryczną, ciepło

lub chłód. W zależności od poziomu temperaturowego źródła ciepła i jego wydajności dobierany jest czynnik roboczy i rodzaj maszyny ekspansyjnej. Maszyny ekspansyjne stosowane do „konwersji energii cieplnej na elektryczną” ze względu na charakter pracy ogólnie można podzielić na objętościowe (np. spiralne, śrubowe, tłokowe) i przepływowe (np. turbiny lub strumienice) [3,4]. Z badań [5] wynika, że maszyny objętościowe generują wysoki poziom drgań i hałasu w stosunku do turbin, który może być przyczyną dyskomfortu użytkowników [6]. Ponadto ekspandery objętościowe są na ogół wolnoobrotowe i odznaczają się znacznie większymi gabarytami w odniesieniu do turbin, które ze względu na ultra wysokie prędkości (nawet do 1 miliona obr/min) [7,8] muszą mieć małe wymiary. Ze względu na małe gabaryty kłopotliwe jest wykonanie układu przepływowego turbin oraz dobór generatorów elektrycznych, które mają zasadniczy wpływ na sprawność całej maszyny [9]. Ze względu na różnorodność odpadowych źródeł ciepła wynikającą m.in. ze sposobu ich wykorzystania, poziomu temperatur, czy ich wydajności, w praktyce zarówno konstrukcja turbiny i współpracującego z nią generatora elektrycznego muszą być zaprojektowane na konkretne parametry pracy. Generatory stosowane w turbogeneratorach ORC muszą charakteryzować się możliwie jak najwyższą sprawnością przy jednoczesnej trwałości i odporności na ciężkie warunki pracy (np. wysoka temperatura, odporność na pary czynnika itp.). Powyższe wymagania spełniają generatory z magnesami trwałymi, które charakteryzują się wysokimi sprawnościami, dużą niezawodnością pracy, szerokim zakresem prędkości obrotowej, czy małymi wymiarami [10].

2. Stanowisko badawcze

Instalacja ORC (symulująca mikrosiłownię kogeneracyjną – rys. 1) składa się z trzech głównych obiegów: grzewczego, chłodzącego i czynnika roboczego. W mikrosiłowni ORC zastosowano czynnik niskowrzący HFE7100, który jest przyjazny dla środowiska naturalnego (współczynnik GWP wynosi zero). Układ grzewczy wyposażony jest w prototypowy kocioł biomasowy (zasilany peletem drzewnym o średnicy 5 mm) o mocy nominalnej 30 kW, płytowego wymiennika ciepła (parownika) oraz pompy olejowej. Olej termalny jest medium pośredniczącym w przekazywaniu ciepła od spalin z kotła biomasowego do czynnika roboczego.

Nośnik źródła ciepła (olej termalny) przepływający w obiegu czynnika roboczego przez parownik powoduje odparowanie czynnika niskowrzącego. Wytworzona para jest kierowana do mikroturbogeneratora, gdzie na skutek ekspansji czynnika niskowrzącego produkowana jest energia elektryczna.



Rys. 1. Stanowisko badawczego ORC

Następnie para kierowana jest do skraplacza i po kondensacji do pompy obiegowej. Ciepło odebrane w skraplaczu w aplikacjach gospodarstw domowych wykorzystuje się na cele grzewcze oraz pozyskanie ciepłej wody użytkowej. Czynnik roboczy pracuje w obiegu zamkniętym tzn. po podniesieniu ciśnienia cieczy HFE7100 za pomocą pompy obiegowej ponownie kierowany jest do parownika.

2.1. Mikroturbogenerator – zagadnienia i problemy konstrukcyjne

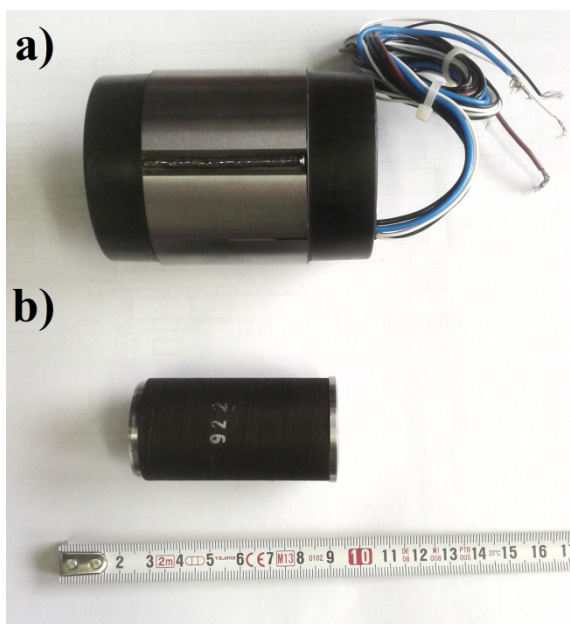
W Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku zaprojektowano i zbudowano instalację ORC z mikroturbogeneratorem o mocy elektrycznej 2,5 kW (rys. 2).



Rys. 2. Mikroturbogenerator o mocy 2,5 kW

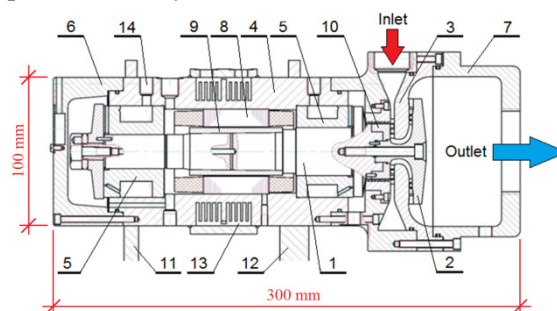
Mikroturbina ma cztery stopnie przepływowe i jest konstrukcją hermetyczną wyposażoną w bezolejowy system łożyskowania. W układzie zastosowano prototypowe łożyska gazowe, które są zasilane parą czynnika HFE7100. Przy nominalnych parametrach pracy, tj. natężeniu

przepływu czynnika roboczego 0,17 kg/s, ciśnieniu 12 bar, temperaturze ok. 170°C, mikro-turbina osiąga ok. 24000 obr/min przy której wytwarza moc elektryczną na poziomie 2,5 kW. Do budowy mikro-turbogeneratora zastosowano specjalnie zaprojektowany czteropolowy, trójfazowy generator synchroniczny z magnesami trwałymi. Elementy generatora elektrycznego tj. statora i rotora pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Elementy generatora: a) stator, b) rotor
Maksymalna prędkość generatora wynosi 80000 obr/min, przy której można uzyskać moc 8.4 kW. Ze względu na trudne warunki pracy elementy generatora, po pierwsze muszą wykazywać się odpornością chemiczną, ponieważ czynnik roboczy HFE7100 zaliczany jest do grupy rozpuszczalników. Po drugie, działanie podwyższonej temperatury – para kierowana na układ łopatkowy mikro-turbozespołu może osiągać chwilowo (w stanie nieustalonym) wartości do 180°C. Dlatego uzwojenie generatora zostało wykonane w klasie F (155°C) i odpowiednio zabezpieczone przy wykorzystaniu dwupunktowego pomiaru temperatury wewnątrz jego konstrukcji. Należy również wspomnieć, że rotor generatora jest umieszczony w korpusie i zamontowany na jednym wale wraz z wirnikami (koła łopatkowe) mikro-turbiny, który jest osadzony w korpusie. Wewnątrz korpusu maszyny może wystąpić ciśnienie par czynnika roboczego ok. 14 bar(a), a przy bardzo wysokich prędkościach obrotowych wału rotor generatora narażony jest na duże przyspieszenia i siły odśrodkowe. Kluczowa jest zatem wytrzymałość

mechaniczna, szczególnie laminatu rotora generatora narażonego na działanie par rozpuszczalnika o wysokim ciśnieniu i temperaturze. Dlatego w generatorze zaistniała potrzeba zastosowania warstwy odpowiedniego kompozytu zabezpieczającego przez odrywaniem magnesów przy dużych prędkościach. Było to konieczne, ponieważ przy niedostatecznej odporności chemicznej oraz wytrzymałości mechanicznej i termicznej wirnika generatora może dojść do zniszczenia mikro-turbogeneratora oraz narażenia obsługi na niebezpieczeństwo. Kluczową sprawą była temperatura, która degradująco działa na czynnik roboczy (przy nadmiernym wzroście temperatury powoduje rozkład HFE7100 i zmianę jego własności termofizycznych oraz chemicznych), izolacja termiczna uzwojenia (ryzyko wystąpienia przebicia i uszkodzenia generatora) oraz wytrzymałość mechaniczna kompozytu (włókna węglowe), która maleje wraz ze wzrostem temperatury. Dlatego zaistniała konieczność zaprojektowania zewnętrznego układu chłodzenia generatora. Widok układu chłodzenia mikro-turbogeneratora pokazano na rys. 4.



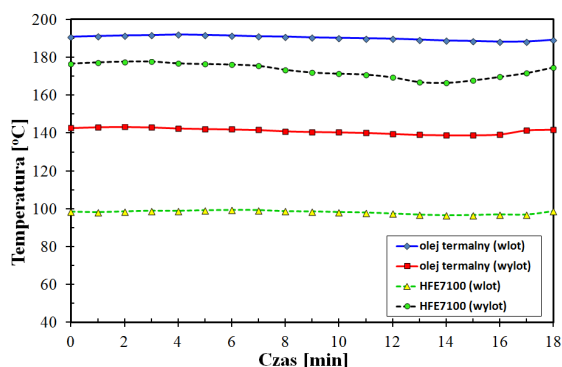
Rys. 4. Przekrój mikro-turbogeneratora [15]:
1-rotor, 2-tarcza łopatkowa, 3-kierownica, 4-korpus, 5-łożyska gazowe, 6-pokrywa tylna, 7-pokrywa przednia, 8-stator generatora, 9-rotor generatora, 10-stopień dośrodkowy wirnika, 11-suport tylni, 12-suport przedni, 13-układ chłodzenia generatora, 14-kanal zasilający łożysko gazowe

Do chłodzenia generatora elektrycznego zastosowano łożyskowy wymiennik ciepła zasilany wodą. Gęstość strumienia odbieranego ciepła z korpusu mikro-turbogeneratora regulowana jest za pomocą zmiany natężenia przepływu cieczy chłodzącej. Regulacja mocy cieplnej wymiennika odbywa się w oparciu o pomiar temperatury wody na zasilaniu i wylocie z wymiennika. Prowadzone były również badania nad zastosowaniem EHS (Energy Harvesting System) w układzie chłodzenia mikro-turboge-

neratora. Zastosowanie układu EHS umożliwiło wygenerowanie dodatkowej mocy elektrycznej oraz wzrost sprawności termicznej i elektrycznej całego układu ORC [11].

3. Wyniki badań

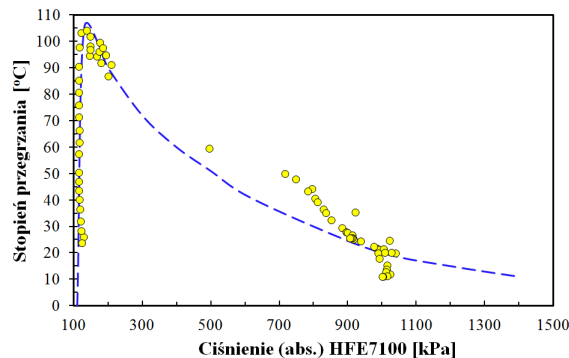
Wybrane przebiegi temperatur oleju termalnego oraz czynnika HFE7100 zmierzone w parowniku podczas badań mikroturbogeneratora w obiegu ORC przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przebiegi temperatur mediów roboczych przepływających przez parownik

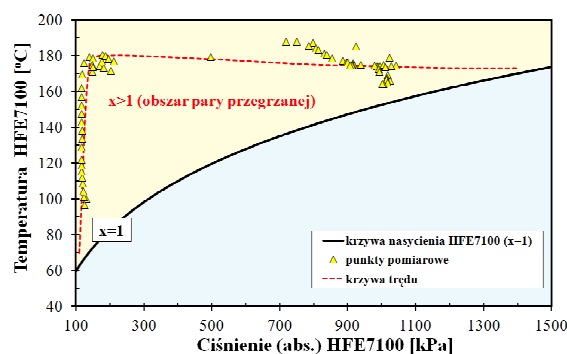
Średnia temperatura oleju termalnego po podgrzaniu w wymienniku kotła zasilanego biomasą na wlocie do parownika wynosiła 190°C , a na wylocie ok. 140°C . Po stronie czynnika HFE7100 średnia temperatura na wlocie do parownika wynosiła ok. 100°C , a na wylocie była w zakresie od 167°C do 177°C . Szeroki zakres zmian temperatury pary HFE7100 na wylocie z parownika wynika ze sposobu sterowania mikroturbiną. Podczas rozruchu, rozbiegu i wybiegu maszyny muszą być spełnione odpowiednie protokoły, które zabezpieczają przed stanem awarii lub uszkodzenia [12-14]. Przykładowo przy rozruchu ważne jest utrzymywanie ściśle określonego gradientu temperatury w mikroturbinie, co zapewnia jej równomierne i jednostajnie wygrzanie. Para czynnika HFE7100 musi mieć odpowiedni stopień przegrzania celem eliminacji erozji i brodzenia elementów wirujących, które mogą być spowodowane wykraplananiem się cieczy. Przykładową krzywą przedstawiającą stopień przegrzania czynnika HFE7100 na zasilaniu mikroturbiny w zależności od ciśnienia zaprezentowano na rys. 6. W początkowej fazie rozruchu, gdy zawór regulacyjny przed mikroturbiną jest zamknięty stopień przegrzania pary HFE7100 jest bardzo wysoki i może osiągać wartości do 110°C . Jednak wraz ze wzrostem stopnia otwarcia zaworu regulacyjnego rośnie ciśnienie czynnika robo-

czego w mikroturbinie czemu towarzyszy znaczny spadek stopnia przegrzania pary. Przykładowo przy ciśnieniu (absolutnym) na zasilaniu mikroturbiny na poziomie 9 bar stopień przegrzania wynosił 25°C .



Rys. 6. Stopień przegrzania w zależności od ciśnienia pary czynnika niskowrzącego (HFE7100)

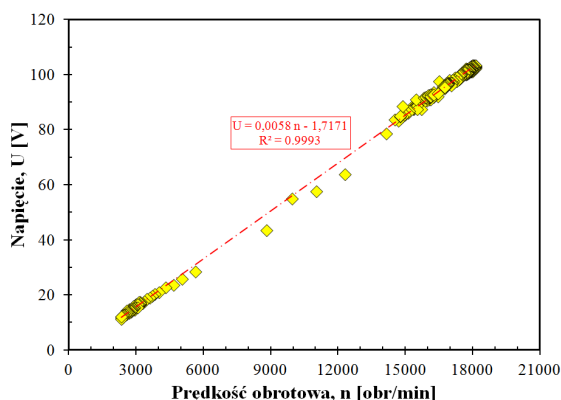
W praktyce, w oparciu o pomiar ciśnienia i temperatury pary HFE7100 analizuje się położenie punktów względem linii nasycenia czynnika roboczego ($x=1$, gdzie: x - stopień suchości pary [-]), co zobrazowano na rys. 7.



Rys. 7. Zmierzona temperatura od ciśnienia w odniesieniu do krzywej nasycenia dla HFE7100

Jak wcześniej wspomniano para na zasilaniu powinna być przegrzana, tj. punkty pomiarowe powinny być zlokalizowane powyżej krzywej nasycenia. Taki zabieg stosuje się w celu zabezpieczenia przed erozją łopatek oraz zapewnienia bezpieczeństwa pracy maszyny i personelu. Należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem stopnia przegrzania czynnika maleje sprawność obiegu. Ustalenie optymalnej wartości stopnia przegrzania pary czynnika jest bardzo ważnym czynnikiem ekonomicznym, konstrukcyjnym układów regulacji i sterowania obiegiem ORC. Gdy układ regulacji i sterowania stwierdzi prawidłowość parametrów termodynamicznych

pary czynnika roboczego uruchamia procedurę wygrzewania korpusu i zasilania łożysk. W przypadku zachowania odpowiednich parametrów rozpoczyna się procedura zasilania układu łopatkowego mikroturbiny. Należy wspomnieć, że do zacisków generatora mikroturbiny podłączony jest specjalnie zaprojektowany układ prostownika, a obciążenie zrealizowano za pomocą grzejnika oporowego o mocy 5 kW oraz zespołu 11 żarówek DC o mocy 100 W każda. Jak wynika z badań (rys. 8), wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika wprost proporcjonalnie rośnie napięcie.



Rys. 8. Zależność napięcia od prędkości obrotowej mikroturbiny

Równanie opisujące zależność napięcia od prędkości obrotowej mikroturbiny jest w postaci:

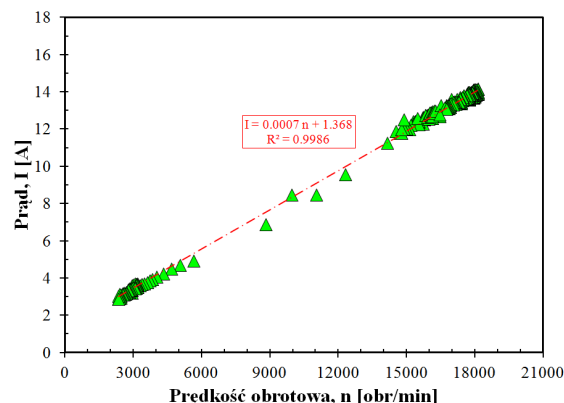
$$U(n) = 0,0058n - 1,7071 \quad (1)$$

gdzie: U - napięcie zmierzone za wyjściu prostownika [V], n - prędkość obrotowa wału mikroturbiny [obr/min]. Podobnie jak w przypadku napięcia prąd zmierzony za prostownikiem wykazuje liniową zależność od prędkości obrotowej maszyny ekspansyjnej, co zaprezentowano na rys. 9.

Równanie opisujące zależność prądu od prędkości obrotowej mikroturbiny jest w postaci:

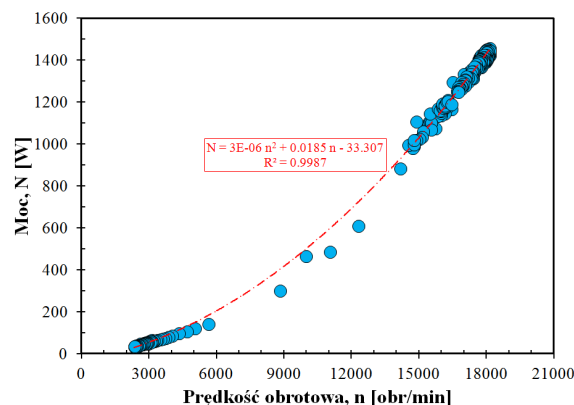
$$I(n) = 0,0007n - 1,368 \quad (2)$$

gdzie: I - prąd zmierzony za wyjściu prostownika [A].



Rys. 9. Zależność prądu od prędkości obrotowej mikroturbiny

Zależność mocy elektrycznej wygenerowanej przez mikroturbogenerator od prędkości obrotowej przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Zależność mocy elektrycznej wyprodukowanej przez mikroturbinę od prędkości obrotowej

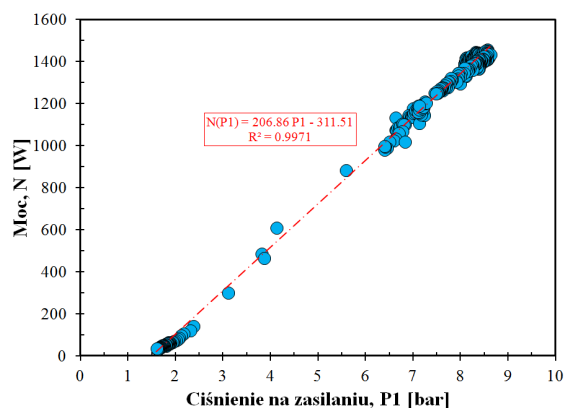
Do szacowania mocy elektrycznej wyprodukowanej przez mikroturbogenerator można zastosować poniższą zależność:

$$N(n) = 3 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0185n - 33,307 \quad (3)$$

gdzie: N - moc elektryczna za wyjściu prostownika [W]. Przykładowo przy prędkości obrotowej 18000 obr/min układ generuje moc 1272 W, co pokrywa się z wartością odczytaną z wykresu przedstawioną na rys. 10.

W systemie sterowania i regulacji ORC oprócz nadzoru nad prędkością obrotową monitorowane jest również ciśnienie na zasilaniu mikroturbiny (P1). W oparciu o pomiar ciśnienia pary na zasilaniu mikroturbogeneratora możliwe jest również oszacowanie mocy wyprodukowanej przez układ, co zaprezentowano na rys. 11. Ponadto pomiar ten stanowi dodatkowe zabezpieczenie układu mikroturbiny w przypa-

dku uszkodzenia lub awarii czujnika do pomiaru prędkości obrotowej wału maszyny. Mikroturbina posiada zabezpieczenie przed nadmiernym wzrostem prędkości obrotowej. W przypadku nadmiernego wzrostu prędkości obrotowej maszyna jest odstawiana (uruchamiana jest procedura wybiegu). Podobnie w przypadku nadmiernego przyrostu ciśnienia par czynnika na zasilaniu maszyna jest odstawiana.



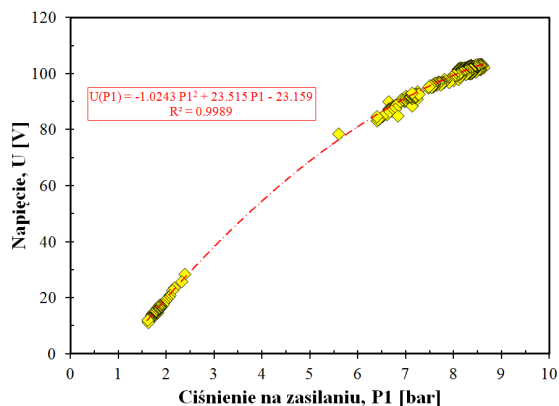
Rys. 11. Zależność mocy elektrycznej wyprodukowanej przez mikroturbinę od ciśnienia pary czynnika zmierzonej na zasilaniu

O ile zależność mocy od prędkości obrotowej jest nieliniowa, to w przypadku ciśnienia mamy liniową zależność, która jest w postaci:

$$N(P1) = 206,86 P1 - 311,51 \quad (4)$$

gdzie: P1 – ciśnienie par czynnika HFE7100 zmierzone za zasilaniu mikroturbiny [bar].

Na podstawie badań wyznaczono również charakterystyki napięcia i prądu w zależności od wartości ciśnienia par HFE7100 zmierzonych na zasilaniu mikroturbogeneratora, które odpowiednio pokazano na rys. 12 i rys. 13.



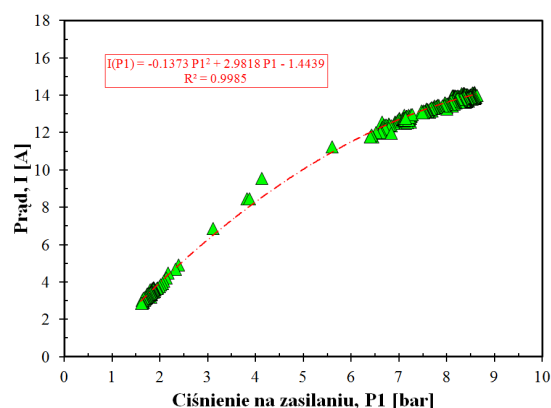
Rys. 12. Zależność napięcia od ciśnienia pary czynnika zmierzonej na zasilaniu mikroturbiny

Zależność opisująca wartość napięcia wygenerowanego przez mikroturbinę jest w postaci:

$$U(P1) = -1,0241P1^2 + 23,515P1 - 23,159 \quad (5)$$

Natomiast zależność prądu obciążenia generatora od ciśnienia czynnika roboczego na zasilaniu maszyny ekspansyjnej jest w postaci:

$$I(P1) = -0,1373P1^2 + 2,9818P1 - 1,4439 \quad (6)$$



Rys. 13. Zależność prądu od ciśnienia pary czynnika zmierzonej na zasilaniu mikroturbiny

Zależności opisujące napięcie (5) jak i prąd (6) od ciśnienia pary HFE7100 są nieliniowe. W związku z tym mogą być one zastosowane do szacowania wartości parametrów elektrycznych generatora i być użyte w układach zabezpieczających instalację elektryczną układu kogeneracyjnego ORC.

4. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono potencjał aplikacyjny układów kogeneracyjnych ORC małych mocy. Omówiono problematykę związaną z projektowaniem i doбором maszyn ekspansyjnych do układów ORC. Przedstawiono wymagania stawiane generatorom do budowy turbogeneratorów. W pracy zamieszczono charakterystyki cieplno-przepływowe instalacji ORC o mocy 2,5 kW. Przedstawiono problemy związane z zagadnieniami chłodzenia generatora elektrycznego oraz omówiono warunki termodynamiczne podczas pracy mikroturbiny. Zamieszczono charakterystyki prądowe i napięciowe wyznaczone w zależności od prędkości obrotowej i ciśnienia pary HFE7100 na zasilaniu mikroturbiny. Opisano procedury sterowania mikroturbiną oraz rodzaj zabezpieczeń zastosowanych w układzie ORC.

5. Literatura

- [1]. Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/we oraz 2003/30/WE.
- [2]. L. Janeiro, G. Resch "Prognoza realizacji celu OZE 2020 dla Polski – Raport końcowy", ECOFYS Germany GmbH, Albrechtstraße 10c, 10117 Berlin, str.0-34, 9 marca 2017.
- [3]. J. Bao, L. Zhao "A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, str. 325–342, 2013.
- [4]. G. Żywica, T. Z. Kaczmarczyk, E. Ihnatowicz, "A review of expanders for power generation in small-scale organic Rankine cycle systems: Performance and operational aspects", *Proc IMechE Part A: J Power and Energy*, vol. 230(7), str. 669-684, 2016.
- [5]. T. Z. Kaczmarczyk, G. Żywica, E. Ihnatowicz, "Vibroacoustic diagnostics of a radial microturbine and a scroll expander operating in the organic Rankine cycle installation", *Journal of Vibroengineering*, vol. 18, Issue 6, str. 4130-4147, 2016.
- [6]. A. Woźny, D. Dobosz, A. Pacana "Wpływ hałasu na jakość pracy", *Humanities and Social Sciences*, vol. XIX, 21, str. 251-258, 2014.
- [7]. J. Luomi, C. Zwyssig, A. Looser, J.W. Kolar, "Efficiency optimization of a 100-W, 500 000-rpm permanent-magnet machine including air friction losses", *Proc. IEEE Ind. Appl. Conf. 2007*, New Orleans, LA, str. 861–868, 2007.
- [8]. C. Zwyssig, J. W. Kolar, and S. D. Round, "Megasppeed drive systems: Pushing beyond: 1 million r/min," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 14, no. 5, str. 564-574, 2009.
- [9]. T. Z. Kaczmarczyk, G. Żywica, E. Ihnatowicz "The impact of changes in the geometry of a radial microturbine stage on the efficiency of the micro CHP plant based on ORC", *Energy*, vol. 137, str. 530-543, 2017.
- [10]. E. Król "Silniki z magnesami trwałymi oraz silniki indukcyjne – czynniki obniżające sprawność", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 80, str. 223-226, 2008.
- [11]. T. Z. Kaczmarczyk, G. Żywica, E. Ihnatowicz, M. Lubieniecki, J. Roemer, "Preliminary Investigation of the Energy Harvesting System Intended for use on an ORC Microturbine", VIII ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, SMART 2017, str. 674-685, 2017.
- [12]. A. Timofiejczuk, "Metoda badania maszyn wirnikowych w warunkach rozruchu, rozbiegu i wybiegu", *Zeszyty Naukowe. Mechanika/Politechnika Śląska*, z. 133, str. 1-145, 1999.
- [13]. J. Rybczyński, "Charakterystyki wybiegowe turbosespołu wyrażone kaskadowymi wykresami drgań w obecności defektu rozosiowania łożysk", *Diagnostyka*, vol. 35, str. 77-84, 2005.
- [14]. A. Ukłański, "Badania przebiegu zatrzymania turbin parowych", *Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej*, Nr 69, str. 49-59, 1986.
- [15]. T.Z. Kaczmarczyk, E. Ihnatowicz, S. Bykuć, Żywica G, Z. Kozanecki, "Initial experimental investigation of the ORC system in a cogenerative domestic power plant with a microturbine", *8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics*, June 16-20, 2013, Lisbon, Portugal.

Autorzy

dr inż. Tomasz Zygmunt Kaczmarczyk
tkaczmarczyk@imp.gda.pl
Instytut Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
Zakład Dynamiki i Diagnostyki Turbin
80-231 Gdańsk, ul. Fiszerza 14

dr inż. Grzegorz Żywica
gzywica@imp.gda.pl
Instytut Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
Zakład Dynamiki i Diagnostyki Turbin
80-231 Gdańsk, ul. Fiszerza 14

dr inż. Piotr Klonowicz
pklonowicz@imp.gda.pl
Instytut Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
Zakład Turbin
80-231 Gdańsk, ul. Fiszerza 14

Praca została wykonana w ramach prac statutowych Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku.