

Dr inż. Tomasz Z. KACZMARCZYK

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.248

Dr inż. Eugeniusz IHNATOWICZ

Dr inż. Grzegorz ŻYWICA

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN w Gdańsku

Zakład Dynamiki i Diagnostyki Turbin

## PROJEKT I BUDOWA STANOWISKA DO BADANIA EKSPANDERÓW SPIRALNYCH W OBIEGU ORC

*Streszczenie: W pracy przedstawiono etap projektowania i budowy stanowiska do badania ekspanderów spiralnych, które mogą być wykorzystane jako alternatywne urządzenia ekspansyjne w układach kogeneracyjnych małych mocy. Zamieszczono przykładowe wyniki badań rozruchowych ekspanderów spiralnych zasilanych sprężonym powietrzem dla różnych wariantów pracy, tj.: w układzie pracy równoległej, szeregowej lub w układzie pracy pojedynczego ekspandera. W pracy przedstawiono rysunki 3D instalacji ekspanderów spiralnych wraz układem obciążenia elektrycznego.*

## DESING AND CONSTRUCTION OF THE TEST BENCH FOR TESTING SCROLL EXPANDERS IN ORC SYSTEM

*Abstract: The paper covers the design and build phases of the test bench which is intended for testing scroll expanders that can be used as an alternative solution for expansion devices in low-power cogeneration systems. Example results of start-up tests were included during which scroll expanders were powered by compressed air for different operation variants, i.e.: parallel mode, serial mode or single expander mode. The work also presents 3D figures of the scroll expanders installation including the layout of electrical loads.*

*Słowa kluczowe: ekspander spiralny, kogeneracja*

*Keywords: scroll expander, cogeneration*

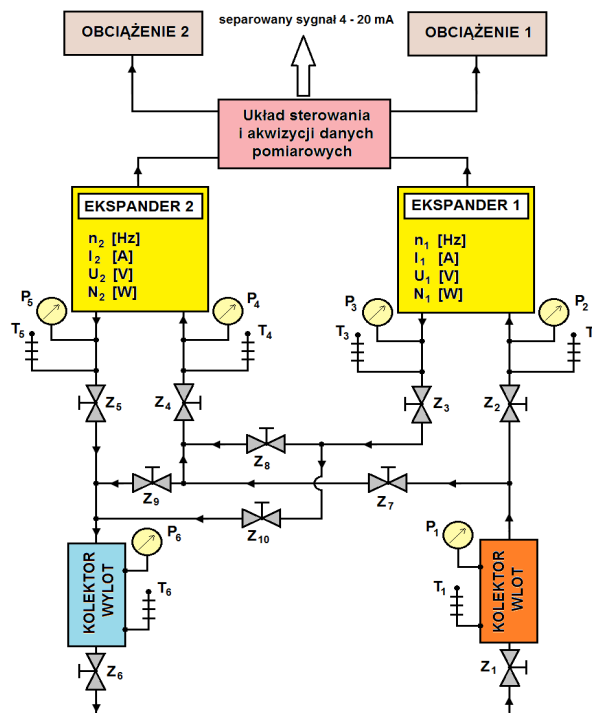
### 1. WPROWADZENIE

Nałożona przez Unię Europejską (UE) dyrektywa 2009/28/WE zobowiązuje do zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) do 20% (w Polsce do 15%). W roku 2020 ma za zadanie powstrzymanie globalnych zmian klimatycznych oraz ma być czynnikiem napędzającym rozwój nowoczesnych technologii oraz innowacyjnego myślenia na terenie Wspólnoty Europejskiej [1]. Stąd też, poszukiwania nowych technologii i oszczędzania energii przez zaimplementowanie nowych układów wykorzystujących OZE oraz modyfikację istniejących układów przez zastosowanie systemów kogeneracyjnych CHP (ang. *Combined Heat and Power*). Jako układy CHP wykorzystuje się ORC (ang. *Organic Rankine Cycle*). Skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej (CHP), np. w układach ORC, uznano za alternatywę dla tradycyjnych systemów energetyki cieplnej wykazującą się oszczędnością energii i ochroną środowiska naturalnego. Zastosowanie systemów mikro-CHP może

skutecznie zaspokoić zapotrzebowanie na energię (elektryczną i ciepłą) w domkach jednorodzinnych czy małych budynkach biurowych oraz zredukować emisję CO<sub>2</sub>. Szacuje się, że zaopatrzenie jednorodzinnych budynków mieszkalnych w ogrzewanie i energię elektryczną może być w pełni spełnione przez zastosowanie systemów CHP, których moc elektryczna nie przekracza 10 kW<sub>el</sub>. W przypadku budynków wielorodzinnych moc układów kogeneracyjnych winna zawierać się w przedziale 10-30 kW<sub>el</sub> [2-4]. Wychodząc naprzeciw dyrektywom i trendom głoszonym przez UE, dotyczący układów wykorzystujących OZE, w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku powstała koncepcja budowy mikrośilowni domowej w oparciu o obieg ORC z mikroturbiną parową na czynnik organiczny [5, 6]. Budowa stanowiska badawczego ekspanderów spiralnych ma posłużyć jako alternatywne urządzenie ekspansyjne dla układów mikrośilowni kogeneracyjnych małych mocy.

## 2. STANOWISKO BADAWCZE EKSPANDERÓW SPIRALNYCH

Zaprojektowano i zbudowano stanowisko, które umożliwi badania dwóch ekspanderów spiralnych pracujących niezależnie lub szeregowo/równoległe. Stanowisko eksperymentalne umożliwi prowadzenie badań ekspanderów z czynnikami organicznymi przy ciśnieniu par na poziomie 14 bar. Ekspandery wyposażone są w sprzęgła magnetyczne i wolnoobrotowe generatory elektryczne, których nominalna prędkość obrotowa wynosi 3600 obr/min. Bezolejowe ekspandery spiralne zostały wykonane przez firmę Air Squared. Schemat zaprojektowanego stanowiska badawczego ekspanderów spiralnych przedstawiono na rys. 1.



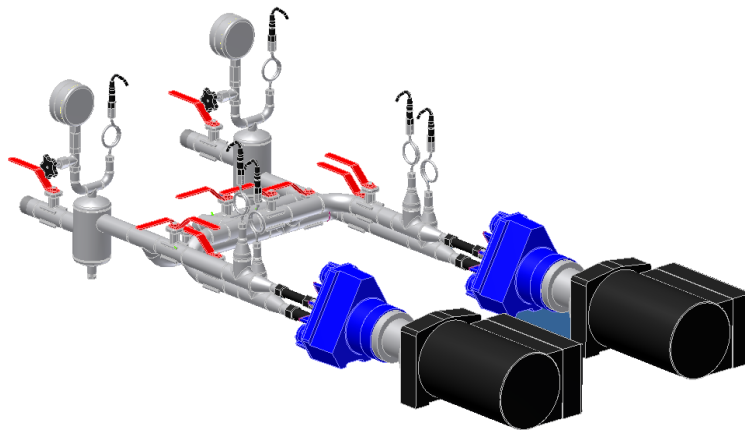
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego ekspanderów spiralnych: P – ciśnienie, T – temperatura, Z – zawór regulacyjno-odcinający, n – obroty ekspandera, I – prąd, U – napięcie, N – moc elektryczna

Instalacja z ekspanderami spiralnymi może pracować w następujących trybach:

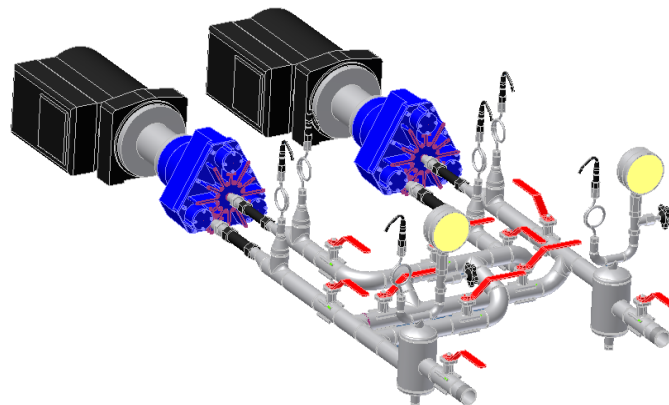
- tryb 1: praca bez ekspanderów (by-pass);
- tryb 2: praca ekspandera 1 (ekspander 2 wyłączony);

- tryb 3: praca ekspandera 2 (ekspander 1 wyłączony);
- tryb 4: praca ekspandera 1 i ekspandera 2 (szeregowo);
- tryb 5: praca ekspandera 1 i ekspandera 2 (równolegle);

Stanowisko badawcze (rys. 1) składa się z dwóch ekspanderów spiralnych połączonych sprzęgłami magnetycznymi z generatorami, instalacji rurowej, układu obciążenia elektrycznego, układu wizualizacyjno-archiwizującego dane pomiarowe. Na stanowisku mierzone są parametry termodynamiczne (temperatury i ciśnienia czynnika roboczego) oraz parametry mechaniczno-elektryczne (prąd, napięcie, moc elektryczna i prędkość obrotowa ekspanderów). Układ archiwizująco-pomiarowy składa się z systemu pomiarowego firmy National Instruments (NI) oraz aplikacji pomiarowej wykonanej w środowisku LabView. Jako obciążenie dla każdego generatora wykorzystano pięć żarówek o mocy 200 W każda. Stanowisko wyposażone jest w moduł, który umożliwia pomiar: obrotów wirnika ekspandera (0÷100 Hz), prądu obciążenia (0÷25 A) oraz napięcia w zakresie 0÷250 V. Ponadto, instalacja składa się z dwóch kolektorów (dolotowego i wylotowego) oraz zespołu zaworów regulacyjnych umożliwiających badanie ekspanderów w różnych trybach pracy. Projekt instalacji do badania ekspanderów wykonano za pomocą programu Inventor 2010 firmy Autodesk. Na rysunkach 2-3 pokazano konstrukcję instalacji rurowej wraz z zespołem ekspander-generator.

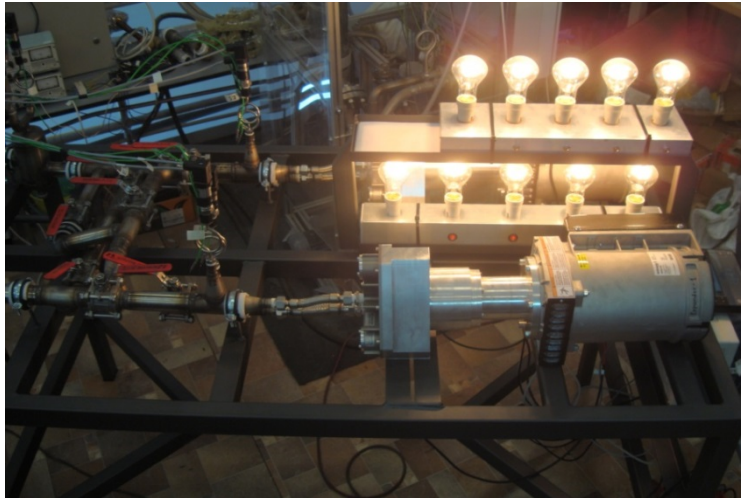


Rys. 2. Widok izometryczny stanowiska badawczego ekspanderów spiralnych od strony generatorów prądu



Rys. 3. Widok izometryczny stanowiska badawczego ekspanderów spiralnych od strony kolektorów: wlotowego i wylotowego

Dokumentację techniczną wykonano w 3D, a następnie zbudowano stanowisko badawcze ekspanderów spiralnych, którego widok zaprezentowano na rys. 4.

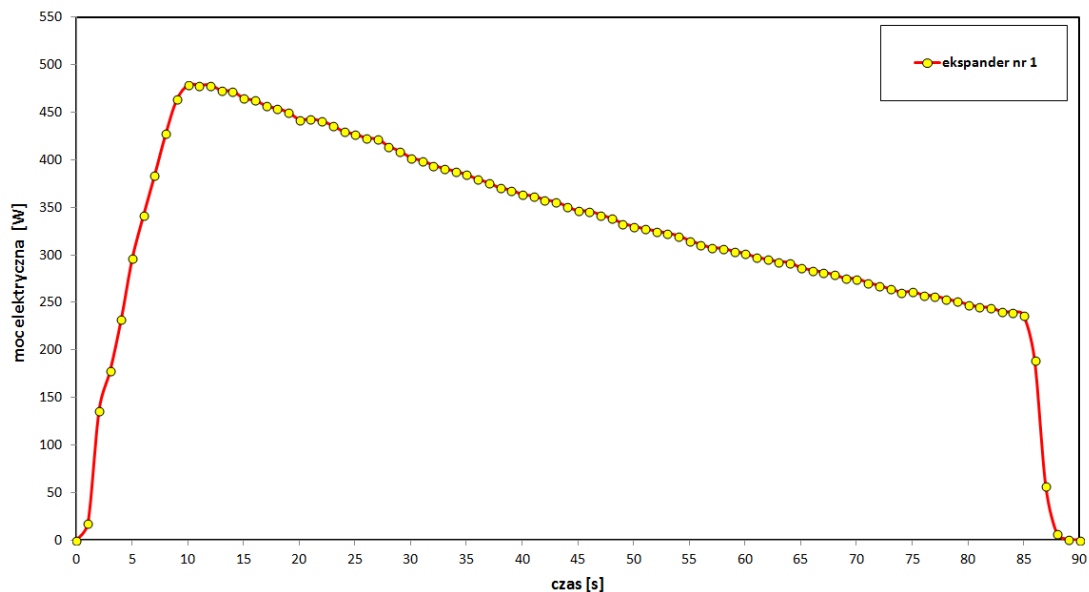


Rys. 4. Widok stanowiska badawczego z ekspanderami spiralnymi

### 3. WYNIKI BADAŃ ROZRUCHOWYCH EKSPANDERÓW SPIRALNYCH

Badania rozruchowe na stanowisku ekspanderów spiralnych wykonano ze sprężonym powietrzem jako medium roboczym o ciśnieniu roboczym 10 bar. Jako źródło powietrza wykorzystano bezolejową dwustopniową sprężarkę tłokową wyposażoną w zbiornik ciśnieniowy o pojemności 240 l. Badania były wykonane w różnych konfiguracjach pracy ekspanderów, tj.: pojedynczego ekspandera, pracy szeregowej i równoległej ekspanderów nr 1 i nr 2. Przed każdym badaniem uruchamiano sprężarkę i napełniano zbiornik ciśnieniowy powietrzem do ciśnienia 10 bar, a następnie przez odpowiednią regulację zaworami ustawiano badany wariant pracy ekspandera.

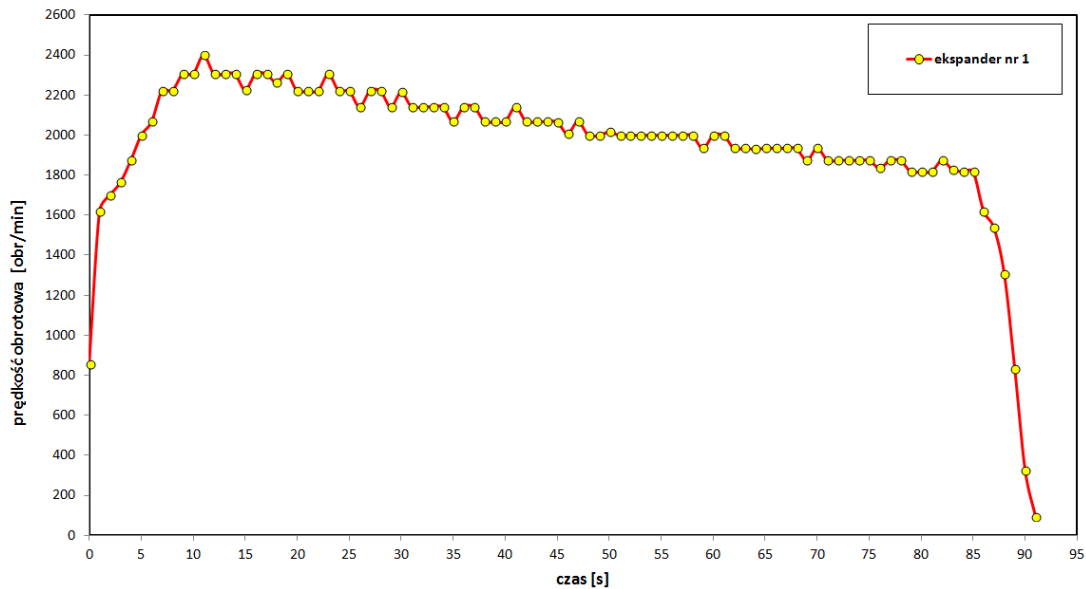
Na rysunku 5 pokazano przebieg mocy elektrycznej przez ekspander nr 1, w czasie pomiaru.



Rys. 5. Przebieg mocy elektrycznej generowanej przez ekspander nr 1, w czasie pomiaru

Z rysunku 5 wynika, że maksymalna moc elektryczna wygenerowana przez ekspander nr 1, przy zasilaniu sprężonym powietrzem o ciśnieniu 10 bar wynosiła ok. 480 W. Wraz ze spadkiem ciśnienia powietrza w zbiorniku, maleje moc elektryczna generowana przez ekspander.

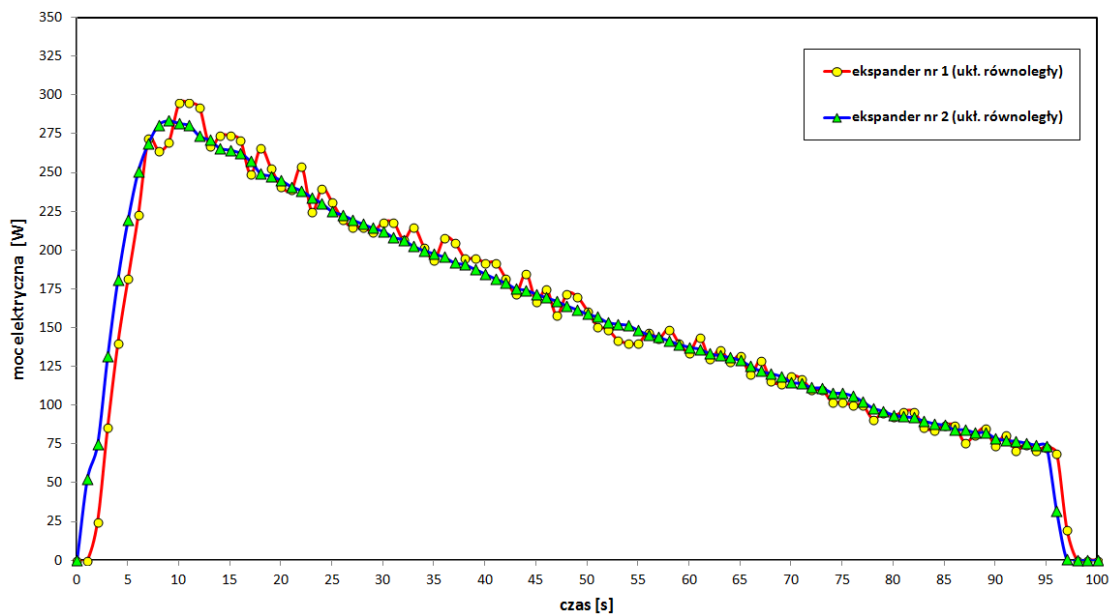
Przebieg prędkości obrotowej ekspandera spiralnego nr 1 w czasie pomiaru zaprezentowano na rys. 6.



Rys. 6. Przebieg prędkości obrotowej ekspandera nr 1, w czasie pomiaru

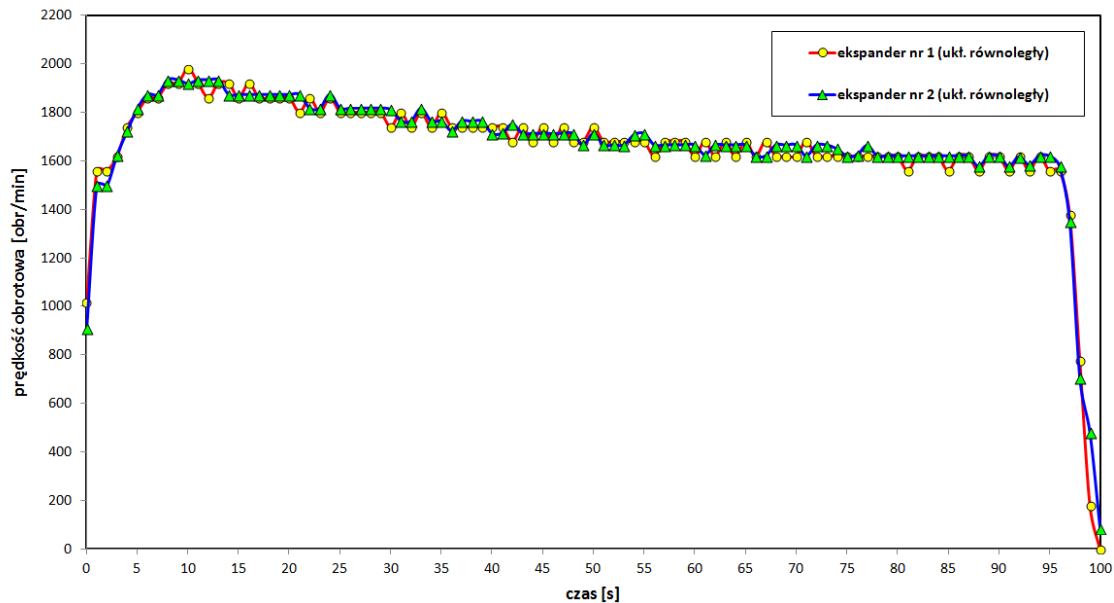
Z rysunku 6 wynika, że w przypadku pracy ekspandera spiralnego nr 1 maksymalna prędkość obrotowa ekspandera osiągnięta była po ok. 11 sekundach od chwili otwarcia zaworu zasilającego i wynosiła ok. 2400 obr/min (przy ciśnieniu ok. 10 bar).

Przebiegi mocy elektrycznych generowanych w czasie równoległej pracy ekspanderów spiralnych nr 1 i nr 2, w czasie pomiaru przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Przebiegi mocy elektrycznych generowanych przez ekspandery nr 1 i nr 2, w czasie pracy równoległej

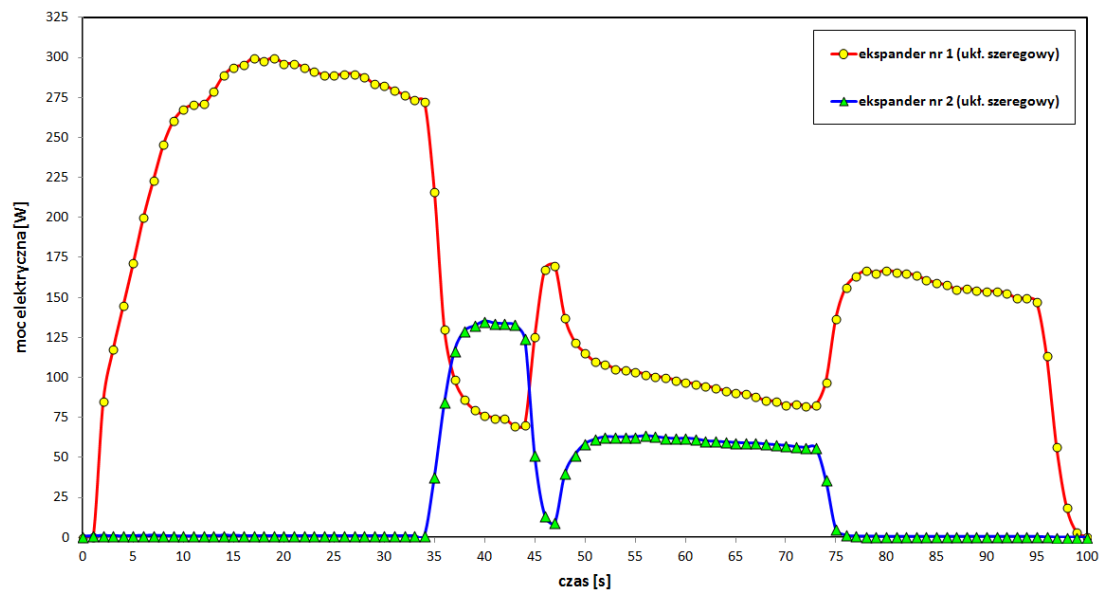
Z rysunku 7 wynika, że w czasie równoległej pracy ekspanderów nr 1 i nr 2 moc elektryczna generowana za zaciskach ekspandera nr 1 wynosiła ok. 290 W, a ekspandera nr 2 ok. 280 W. Przebiegi prędkości obrotowych ekspanderów spiralnych nr 1 i nr 2, pracujących w układzie równoległego zasilania sprężonym powietrzem pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Przebiegi prędkości obrotowych ekspanderów nr 1 i nr 2, w czasie pracy równoległej

Z rysunku 8 wynika, że w przypadku równoległej pracy ekspanderów nr 1 i nr 2 prędkości obrotowe obu jednostek są praktycznie takie same. Maksymalną prędkość obrotową ok. 2000 obr/min odnotowano w 10 sekundzie pomiaru.

Kolejnym badanym przypadkiem współpracy ekspanderów spiralnych była praca w układzie szeregowego zasilania sprężonym powietrzem. Przebiegi mocy elektrycznych wygenerowanych przez ekspandery nr 1 i nr 2 w układzie szeregowym pokazano na rys. 9.

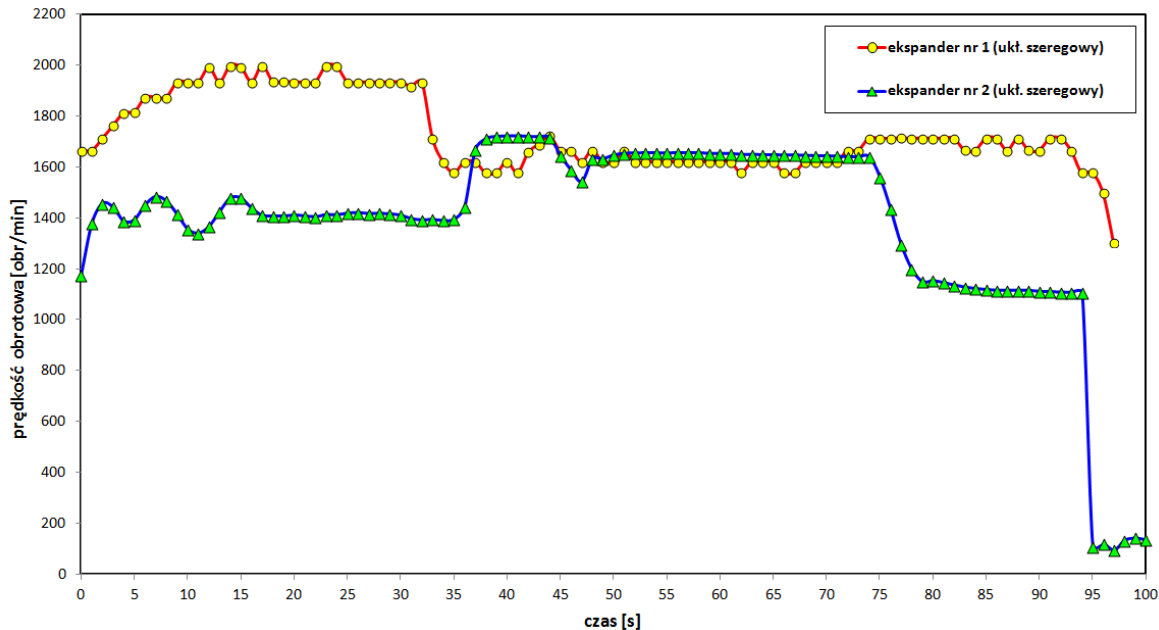


Rys. 9. Przebiegi mocy elektrycznych generowanych przez ekspandery nr 1 i nr 2, w czasie pracy szeregowej

W układzie szeregowej pracy ekspanderów sprężone powietrze w pierwszej kolejności zasila ekspander nr 1, a po ekspansji (w ekspanderze nr 1) powietrze kierowane jest do kanału wlotowego ekspandera nr 2, gdzie po ekspansji kierowane jest do kolektora wylotowego.

Maksymalna moc generowana przez ekspander nr 1 wynosiła ok. 300 W, a ekspandera nr 2 – ok. 130 W.

Przebiegi prędkości obrotowych ekspanderów spiralnych zmierzone podczas szeregowej pracy ekspanderów, zasilanych sprężonym powietrzem, zaprezentowano na rys. 10.



Rys. 10. Przebiegi prędkości obrotowych ekspanderów nr 1 i nr 2, w czasie pracy szeregowej

W przypadku szeregowej pracy ekspanderów nr 1 i nr 2 maksymalna prędkość obrotowa ekspandera nr 1 wynosiła ok. 2000 obr/min, a ekspandera nr 2 była na poziomie 1700 obr/min.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Stwierdzono poprawność działania układu odbioru energii elektrycznej oraz układu pomiarowego wykonanego w aplikacji LabView, zintegrowanych z systemem NI. Ustalono, że maksymalna moc elektryczna wygenerowana przez pojedynczy ekspander wynosi ok. 480 W, którą osiągnięto przy prędkości obrotowej wału generatora na poziomie 2400 obr/min i ciśnieniu powietrza na zasilaniu ok. 10 bar. W przypadku pracy równoległej ekspanderów maksymalna moc elektryczna generowana przez ekspander nr 1 wynosiła 290 W, a ekspandera nr 2 wynosiła ok. 280 W przy prędkości obrotowej wynoszącej ok. 2000 obr/min. Sumaryczna moc elektryczna wygenerowana przez ekspandery nr 1 i nr 2 podczas równoległej pracy wynosiła zatem 570 W. W układzie szeregowej pracy ekspanderów maksymalna moc elektryczna wygenerowana przez ekspander nr 1 wynosiła ok. 300 W, a ekspandera nr 2 – ok. 130 W. Maksymalna prędkość obrotowa uzyskana dla ekspandera nr 1 wynosiła ok. 2000 obr/min. W oparciu o przeprowadzone próby rozruchowe ekspanderów spiralnych można stwierdzić, że stanowisko badawcze ekspanderów umożliwia przeprowadzenie eksperymentów z czynnikiem organicznym w obiegu ORC.

\*\*\*

Prezentowane badania zostały sfinansowane ze środków projektu kluczowego nr POIG.01.01.02-00-016/08 pt. „Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii”.

## LITERATURA

- [1] Dziamski P., Michałkowska-Knap K., Regulski P., Wiśniewski G.: *Stan i perspektywy rozwoju rynku zielonej energii elektrycznej w Polsce*, (State and Perspectives of Green Electric Energy Development in Poland), Institute for Renewable Energy agreement No. UZP/DUEWM/30/9, Warsaw, December 2009.
- [2] Liu H., Shao Y., Li J.: *A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC) – Thermodynamic modelling studies*. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 35, 2011, pp. 3985-3994.
- [3] Onovwiona H.I., Ugursal V.I.: *Residential cogeneration systems: review of the current technology*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, 2006, pp. 389-431.
- [4] Lemort V., Guillaume L., Legros A., Declaye S., Quolin S., *A comparison of piston, screw and scroll expanders for small-scale Rankine cycle systems*, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Microgeneration and Related Technologies*, 15-17 April 2013, Napoli.
- [5] Kaczmarczyk T.Z., Ihnatowicz E., Żywica G., Bykuć S., Kozanecki Z.: *Initial experimental investigation of the ORC system in a cogenerative domestic power plant with a microturbine*, 8<sup>th</sup> World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, 16-20 June, 2013, Lisbon.
- [6] Kaczmarczyk T.Z., Ihnatowicz E., Bykuć S., Żywica G., Kozanecki Z.: *Experimental investigation of the ORC system in a cogenerative domestic power plant with a microturbine and a expansion valve*, *ASME ORC 2013, 2<sup>nd</sup> International Seminar on ORC Power System*, 7-8 October 2013, De Doelen, Rotterdam.