

Dr hab. inż. Joanna Wilk, prof. PRz  
Zakład Termodynamiki  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska  
al. Powstańców Warszawy 12  
35 – 959 Rzeszów

Rzeszów, 27.V. 2019r.

## RECENZJA rozprawy doktorskiej

**mgr. inż. Adama Ruziewicza pt. *Wpływ warunków akustycznych na parametry pracy termoakustycznego silnika Stirlinga,***  
w dyscyplinie ENERGETYKA,  
sporządzona na zlecenie Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki  
Wrocławskiej,  
z dnia 17 kwietnia 2019r.

### I. Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona praca dotyczy badań modelowych oraz eksperymentalnych jednosekcyjnego termoakustycznego silnika Stirlinga. W ramach pracy został zbudowany model matematyczny, na podstawie którego przeprowadzono analizę numeryczną umożliwiającą określenie wpływu warunków akustycznych w regeneratorze oraz falowodzie silnika, powiązanych z nimi parametrów geometrycznych, a także warunków termicznych na pracę silnika wyrażoną poprzez uzyskaną moc oraz sprawność. Wyniki symulacji numerycznych były walidowane na, zbudowanym również w ramach pracy, stanowisku eksperymentalnym. Szczegółowa analiza dotyczyła zbadania wpływu geometrii różnego rodzaju filtrów akustycznych oraz ich położenia w falowodzie na dopasowanie pola akustycznego niezbędnego dla osiągnięcia efektywnego procesu konwersji energii. Na podstawie uzyskanych wyników badań potwierdzono możliwość wykorzystania rozpatrywanego jednosekcyjnego termoakustycznego silnika Stirlinga do odzysku ciepła niskotemperaturowego.

Podjęta w rozprawie tematyka jest istotna i aktualna z punktu widzenia coraz większego zainteresowania efektywnym wykorzystaniem energii odpadowej stanowiącej często niskotemperaturowe źródła ciepła możliwe do zastosowania w obiegu z silnikiem Stirlinga. Podjęta w pracy problematyka jest interesująca również pod względem poznawczym. Przeprowadzone badania modelowe i eksperymentalne pozwalają na lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących w rozpatrywanym urządzeniu, a także rozpoznanie ich wzajemnych zależności.

Rozprawa liczy 198 stron łącznie ze spisem treści, wykazem oznaczeń, słownikiem pojęć, dodatkami oraz bibliografią, w której zamieszczono 110 pozycji literaturowych. Wszystkie

zostały zacytowane w pracy. Główną część rozprawy składającą się z siedmiu rozdziałów poprzedza streszczenie w języku polskim i angielskim oraz podziękowania Autora.

W rozdziale 1 stanowiącym wstęp do zasadniczej części pracy zawarto opis efektu termoakustycznego w oparciu o 42 pozycje literatury, możliwości aplikacyjne, również w oparciu o szeroki przegląd literatury (30 pozycji), oraz informacje dotyczące dopasowania pola akustycznego w zastosowaniu do silnika termoakustycznego. Rozdział 1 zawiera też postawione cele i tezę oraz krótką charakterystykę kolejnych rozdziałów.

W rozdziale 2 przedstawiono zagadnienia teoretyczne z zakresu termoakustyki, zaprezentowano podstawy termodynamiczne dotyczące obiegów teoretycznych oraz podział urządzeń termoakustycznych i ich zasadę działania.

Kolejne cztery rozdziały stanowią zasadniczą część pracy. Na rozdział 3 składa się opis zbudowanego modelu matematycznego oraz analiza parametrów pracy jednosekcyjnego termoakustycznego silnika Stirlinga. Przeprowadzona analiza bazuje na symulacjach numerycznych przedstawionego modelu. W rozdziale tym omówiono wpływ parametrów geometrycznych, warunków akustycznych oraz innych warunków zewnętrznych na pracę badanego jednosekcyjnego silnika termoakustycznego.

W rozdziale 4 Autor porównuje i analizuje uzyskane rozwiązania dotyczące dopasowania pola akustycznego.

W rozdziale 5 przedstawiono projekt i konstrukcję stanowiska do badań eksperymentalnych. Szczegółowo opisano system pomiarowy z uwzględnieniem wszystkich wielkości mierzonych. Przedstawiono również metodologię wyznaczania wielkości wynikowych.

W rozdziale 6 Autor zaprezentował i omówił uzyskane wyniki badań eksperymentalnych, ich analizę oraz wyniki symulacji numerycznych dla modelu silnika odpowiadającego rzeczywistemu obiektowi. Podano algorytm dopasowania modelu do warunków rzeczywistych oraz porównano wyniki eksperymentu oraz symulacji numerycznych.

Rozdział 7 stanowi zwięzłe podsumowanie przeprowadzonych prac oraz wynikające wnioski. Rozprawa zawiera również dodatki, na które składają się: kody źródłowe zastosowanych modeli numerycznych, opis metod wyznaczania mocy akustycznej, uzupełnienie rozdziału 6 poprzez prezentację dopasowania modelu numerycznego do wyników eksperymentu dla pozostałych punktów pomiarowych, oraz dokumentacja techniczna stanowiska badawczego. Na uwagę zasługuje wspomniany wcześniej, umieszczony na początku rozprawy, słownik stosowanych pojęć, który w znaczny sposób ułatwia czytanie pracy.

## **II. Uwagi merytoryczne**

Postawiona w rozdziale 1.4 teza pracy o następującej treści „Dopasowanie warunków akustycznych w rezonatorze jednosekcyjnego termoakustycznego silnika Stirlinga jest możliwe poprzez zmianę geometrii i usytuowania filtra akustycznego dołączonego do rezonatora i wpływa na poprawę parametrów pracy silnika” wydają się być raczej wnioskiem otrzymanym w wyniku przeprowadzonych badań. W żaden sposób nie umniejsza to wartości pracy. W mojej opinii postawienie tezy nie było konieczne. Według zapisu odpowiedniej ustawy, rozprawa doktorska „powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne,



technologiczne, .... oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej .... oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej”. Nie ma więc potrzeby stawiania tezy, a raczej „hipotezy” potrzebnej do jej udowodnienia.

Prowadzone przez Autora badania oraz analiza uzyskanych wyników pozwoliły na sformułowanie kilku uwag natury merytorycznej. Pierwsza uwaga odnosi się do rozdziału 5 dotyczącego stanowiska badawczego. Składają się na nią następujące szczegółowe pytania:

1. Strona 94 – obwód elektryczny grzałek był włączany poprzez przekaźniki półprzewodnikowe. Jakiego rzędu była częstotliwość załączania przekaźników i czy nie wpływała ona na pulsację temperatury grzałki? Co Autor sądzi o ewentualnym zastosowaniu programowalnego zasilacza o napięciu nominalnym 230V lub 300V zamiast przekaźników półprzewodnikowych?
2. Czy zaprezentowana budowa modułu nagrzewnicy i chłodnicy zapewniała jednorodność temperatury w przekroju prostopadłym do osi przepływu? Czy w przypadku szeregowego połączenia rur nie następowało zwiększenia niejednorodności temperatury w przekroju modułu? Pomiar kamerą termowizyjną określiłby rozkład temperatury.
3. Dokładność pomiaru temperatury przy pomocy termopar została podana jako  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ , co jest wartością bardzo dużą. Czy można było przekalibrować termopary aby osiągnąć lepszą dokładność?
4. Jaka jest pewność że odpowiedź przekaźnika półprzewodnikowego jest taka sama jak sygnału sterującego, z którym jest związany parametr  $K_{\%}$ , a tym samym, czy określana moc cieplna grzałki została poprawnie oszacowana?
5. Przeprowadzone badania eksperymentalne wymagają określenia niepewności pomiarowej przy wyznaczaniu poszczególnych parametrów. Jaka jest niepewność wyznaczenia mocy grzałki i chłodnicy?
6. W rozdziale 5.4.1 przedstawiono czas osiągnięcia stanu ustalonego dla przykładowego punktu pomiarowego. W jaki sposób ilościowo był określany stan ustalony, czy oznaczono pewien próg stabilności w określonym czasie?

Kolejne uwagi i spostrzeżenia jakie nasunęły się w trakcie czytania rozprawy są natury ogólnej. Uwagi ogólne to:

1. Uzyskana w badaniach sprawność silnika termoakustycznego wynosząca około 10% jest wartością zadawalającą zważając na fakt relatywnie małej różnicy temperatur. Jak na tym tle wyglądają sprawności innych typów silników cieplnych przy podobnej różnicy temperatur?
2. Czy rozpatrywany termoakustyczny silnik Stirlinga generuje hałas lub wibracje?
3. Zaprezentowane rozwiązanie silnika termoakustycznego zajmuje stosunkowo dużo miejsca (zrozumiałe jest to dla instalacji badawczej), czy istnieje możliwość bardziej kompaktowej zabudowy rezonatora? np. w formie helisy?

### **III. Uwagi redakcyjne i edytorskie**

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Adama Ruziewicza została napisana bardzo starannie, poprawnym, niebudzącym zastrzeżeń, językiem polskim. Również została zachowana poprawność pojęć naukowych i technicznych. Niemniej, w trakcie czytania pracy, nasunęło

się kilka ogólnych uwag związanych z zastosowaną terminologią, a także zauważono kilka błędów edytorskich. Do uwag ogólnych zaliczam:

1. Użyte przez Autora określenie przewodności cieplnej, tożsamej z odwrotnością oporu relaksacji termicznej, oznaczonej  $1/R_k$ , której jednostką jest  $m^3/(Pa \cdot s)$ , wprowadza pewną niecisłość. W zagadnieniach wymiany ciepła, w polskiej terminologii, pojęcie przewodności cieplnej jest używane zamiennie ze współczynnikiem przewodzenia ciepła ( $k$ ,  $W/(mK)$ ). W związku z tym, lepiej byłoby pozostać tylko przy pojęciu odwrotności oporu relaksacji termicznej, lub też, np. rozpatrywany parametr nazwać akustyczną przewodnością cieplną.
2. W opisie przemian termodynamicznych występujących w obiegu termoakustycznego silnika oraz pompy ciepła Autor używa symbolu  $dQ$  na określenie ciepła oddawanego bądź przyjmowanego przez cząstkę gazu. Jest to nieprawidłowy zapis, ponieważ elementarna ilość ciepła nie jest różniczką zupełną. Powinno być  $\delta Q$ .
3. Autor oznacza temperaturę symbolem  $T$  lub  $t$  w zależności od jednostki (K lub  $^{\circ}C$ ). Wydaje się to niekonieczne, jeżeli są podane wartości liczbowe, zawsze pojawia się jednostka temperatury, wystarczyłoby używać jednego symbolu  $T$ , który w przytaczanych zależnościach zawsze reprezentuje temperaturę bezwzględną. W przypadku często pojawiającej się różnicy temperatur, nie ma znaczenia jednostka, a w tekście pojawiły się zarówno oznaczenia różnicy jako  $t_{grz} - t_{ch}$  (str.59, 68), jak i  $T_{grz} - T_{ch}$  (str.106). W tabeli 5.5 symbol  $T_{grz}$  oznacza temperaturę w  $^{\circ}C$ . Ujednolicenie zapisu temperatury wydaje się więc wskazane, tym bardziej, że symbol  $t$  oznacza również czas.
4. Zastosowane w rozdziale 5.1.1 określenie „czarna stal” materiału rury, z której został wykonany rezonator silnika, jest określeniem niepoprawnym. Chodzi oczywiście o niskostopową stal konstrukcyjną.

Uwagi szczegółowe to:

1. W Wykazie oznaczeń przy opisie parametru  $n$  (jednostkowa liczba drutów siatki regeneratora) brakuje jednostki, nie jest to liczba bezwymiarowa,
2. Strona 8 – Plan pracy – praca składa się z siedmiu rozdziałów, nie z „ośmiu”,
3. Strona 59 – nie podano wartości różnicy temperatury  $\Delta T_{REG}$ , jest „ $\Delta T_{REG} = K$ ”,
4. Strona 71 – użyto sformułowania: warunek brzegowy pierwszego lub drugiego „rzędu”, powinno być – „rodzaju”,
5. Strona 101 – drugi rząd od góry, jest „Tab.5.14”, powinno być Tab.2,
6. Wzór 2.23 (promień hydrauliczny porów) – brak wyjaśnienia: czego dotyczy pole przekroju i obwód?
7. Błędy literowe: str.24, pod rys.2.10 – jest „dużą różnica” zamiast „dużą różnicą”, str.107, 6 wiersz od dołu – jest „falistą strzałką” zamiast „falistą strzałką”, str.115, pod rys.6.3 – jest „są strat ciepła” zamiast „są straty ciepła”,
8. Strona 93, trzeci wiersz od dołu – w jednostce współczynnika przewodzenia ciepła brakuje nawiasu – ( $mK$ ),
9. Strona 105, nad równaniem (5.10) – jest „częstotliwość włączeń grzałek elektrycznych grzałki”, chyba nagrzewnicy?
10. W Bibliografii, poz.[34] – brakuje tytułu czasopisma.



#### **IV. Ocena pracy**

Autor podjął w swojej pracy, istotny w zagadnieniach współczesnych problemów energetyki, temat dotyczący możliwości konwersji energii w sposób niekonwencjonalny – poprzez termoakustyczne zastosowanie obiegu Stirlinga, gdzie transport energii odbywa się za pomocą fali dźwiękowej. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim było określenie wpływu parametrów geometrycznych i procesowych na pracę rozpatrywanego silnika ze szczególnym uwzględnieniem różnych filtrów akustycznych. Autor rozwiązał postawiony problem poprzez budowę odpowiedniego modelu matematycznego jednoosekcyjnego silnika termoakustycznego, rozwiązanie numeryczne opracowanego modelu, budowę stanowiska eksperymentalnego i przeprowadzenie badań na rzeczywistym obiekcie oraz porównanie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych i numerycznych, którego rezultatem było odpowiednie dopasowanie modelu numerycznego.

Autor wykazał się adekwatną wiedzą na temat zarówno rozwoju termoakustyki jak i samej teorii opisującej zjawiska termoakustyczne, a także możliwości aplikacyjnych urządzeń termoakustycznych. Na wysoką ocenę zasługuje bardzo wysoki poziom merytoryczny pracy, przejawiający się m.in. w umiejętnym formułowaniu zagadnień teoretycznych związanych z termoakustyką, jasnym i czytelnym opisie zjawisk oraz prezentacji wyników. Autor wykazał się też bardzo dużymi umiejętnościami w zakresie konstrukcji stanowiska jak i samych badań eksperymentalnych. Przedstawione w recenzji uwagi merytoryczne i redakcyjne nie umniejszają jakości prezentowanej pracy, nie przesłaniają istotnych wartości pracy i znaczenia dla zastosowań praktycznych.

#### **V. Wniosek końcowy**

Praca doktorska Pana mgr. inż. Adama Ruziewicza spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim.

Opracowany model matematyczny jednoosekcyjnego termoakustycznego silnika Stirlinga oraz przedstawione badania eksperymentalne i numeryczne oparte na zaproponowanym modelu są oryginalne. Uzyskane wyniki mają znaczenie praktyczne, mogą znaleźć zastosowanie w projektowaniu i optymalizacji systemów energetycznych wykorzystujących urządzenia termoakustyczne.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Adama Ruziewicza do publicznej obrony swojej rozprawy doktorskiej.

Dodatkowo stawiam wniosek o wyróżnienie tejże pracy doktorskiej, mając na uwadze jej wysoki poziom merytoryczny, a także bardzo dużą staranność w samej redakcji rozprawy.

