



Silesian University  
of Technology



Ryszard Buchalik

---

***Experimental and simulation studies of steady- and transient-state operation of thermoelectric systems for cooling and electricity generation***

---

*PhD Thesis*

Supervisor: dr hab. inż. Grzegorz Nowak, prof. PŚ

*Scientific discipline:*

*Environmental Engineering, Mining and Energy*

Gliwice, 2022

Author:

***mgr inż. Ryszard Buchalik***

Department of Power Engineering and Turbomachinery,  
Faculty of Energy and Environmental Engineering,  
Silesian University of Technology, Gliwice, Poland  
ryszard.buchalik@polsl.pl

Supervisor:

***dr hab. inż. Grzegorz Nowak, prof. PŚ***

Department of Power Engineering and Turbomachinery,  
Faculty of Energy and Environmental Engineering,  
Silesian University of Technology, Gliwice, Poland  
grzegorz.nowak@polsl.pl

Reviewers:

***prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielewicz***

Institute of Energy,  
Faculty of Mechanical Engineering,  
Gdańsk University of Technology, Gdańsk, Poland  
dariusz.mikielewicz@pg.edu.pl

***prof. dr hab. inż. Jarosław Milewski***

Institute of Heat Engineering,  
Faculty of Power and Aeronautical Engineering,  
Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland  
milewski@itc.pw.edu.pl

Polish title:

*Eksperymentalne i symulacyjne badania pracy układów termoelektrycznych w układach pompy ciepła oraz generatora elektryczności w stanach ustalonych i nieustalonych*

Department of Power Engineering and Turbomachinery,  
Faculty of Energy and Environmental Engineering,  
Silesian University of Technology, Gliwice, July 2022

## STRESZCZENIE

Dysertacja podejmuje zagadnienie symulacji pracy układów wyposażonych w moduły termoelektryczne. Cechą przeprowadzonych badań było uwzględnienie oporu termicznego pomiędzy złączem termoelektrycznym, a wymiennikiem ciepła. Pokazano podstawy teoretyczne zjawisk termoelektrycznych, umówiono ich cechy oraz wzajemne implikacje. Przedstawiono również ich możliwe zastosowania. Omówiono budowę modułu termoelektrycznego wraz z opisem wpływu jego cech geometrycznych i materiałowych. Zaprezentowano przykładowe symulacje zarówno modułów termoelektrycznych pracujących w trybie pompy ciepła, jak również generatora energii elektrycznej z wykorzystaniem przyłożonego gradientu temperatury i wynikającego z tego przepływu ciepła.

W ramach badań opracowano sposób wyznaczania parametrów modułu termoelektrycznego oraz oporu termicznego w układzie z użyciem pomiarów stanów przejściowych, wykorzystujących znaczne różnice w bezwładności pól: termicznego i elektrycznego. Opracowana metodologia pozwala na wyznaczenie teoretycznych maksimów parametrów pracy układu oraz odpowiada na pytanie o zasadność działań zmierzających do poprawy kontaktu termicznego w układzie. Można także ocenić degradację tego kontaktu w czasie. Przedstawiono również wykonane stanowisko badawcze, które umożliwi kompleksową ocenę modułów termoelektrycznych w dowolnych stanach pracy i bardzo szerokim zakresie parametrów. Jest ono w pełni zautomatyzowane, bogato opomiarowane i sterowane komputerowo z wykorzystaniem regulatorów.

Do prowadzenia symulacji numerycznych pracy układów wykorzystujących moduły termoelektryczne przygotowano wielofunkcyjne oprogramowanie bazujące na opracowanych modelach analitycznych. Umożliwia ono symulacje pracy układów w warunkach nieustalonych dla układów jedno- i wielostopniowych. Oprogramowanie wyposażono w procedury analizy i projektowania cech geometrycznych układu, jak i optymalizacji warunków jego pracy. Za jego pomocą przeprowadzono szereg symulacji układów termoelektrycznych pracujących zarówno w trybie generacji elektryczności, jak i pompy ciepła. Oprogramowanie zostało również zwalidowane eksperymentalnie na opisanym stanowisku badawczym.

W pierwszej kolejności, przeprowadzono analizy pracy układu generatora termoelektrycznego dla szerokiego spektrum kontaktowych oporów termicznych. Określono wpływ wielkości oporu na temperatury złączy termoelektrycznych, maksymalne wartości mocy i sprawności oraz optymalne wartości prądu w obwodzie i oporu elektrycznego odbiornika mocy.

Następnie zasymulowano układ dwustopniowej chłodziarki termoelektrycznej. Zbadano jej charakterystyki pracy oraz zdolność do osiągania temperatur niższych niż osiągalna w stanie ustalonym – supercooling. Przeprowadzono optymalizację układu polegającą na doborze liczby słupków termoelektrycznych dla każdego stopnia ze względu na minimalizację temperatury oraz kształtowaniem przebiegów prądu. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch różnych wartości kontaktowego oporu termicznego oraz porównano wskaźniki pracy zoptymalizowanych układów jedno- i dwustopniowego.

Dalej, zaprezentowano także koncepcję klimatyzatora termoelektrycznego zbudowanego w oparciu o dostępne na rynku moduły. Parametry modułów wyznaczono samodzielnie na

zbudowanym stanowisku badawczym, a wyniki symulacji numerycznych zwalidowano eksperymentalnie. Przeprowadzono również analizy ekonomiczne zaproponowanego układu uwzględniające koszty inwestycyjne w postaci zakupu modułów i wymienników ciepła oraz koszt eksploatacyjny związany ze zużyciem energii elektrycznej w założonym okresie życia urządzenia. Przeprowadzone w tym zakresie symulacje obejmowały zmienną liczbę modułów termoelektrycznych, wymiary wymienników ciepła oraz wartość mocy zasilającej tak, aby uzyskać maksymalny wskaźnik efektywności chłodniczej. Oceny efektywności odniesionej do kosztów całkowitych dokonywano za pomocą wprowadzonego wskaźnika *ETCC*. Obliczenia prowadzone były w szerokim zakresie kosztów energii elektrycznej oraz zadanej różnicy temperatury zewnętrznej i klimatyzowanego pomieszczenia. Ponadto, wykonano niezależne obliczenia przy założeniu możliwości modyfikacji geometrii wewnętrznych elementów modułu. Zbadano możliwość zwiększenia mocy chłodzącej kosztem zmniejszenia wartości wskaźnika ekonomicznej efektywności chłodniczej.

Symulacje urządzenia termoelektrycznego służącego do odzysku ciepła odpadowego poprzez produkcję elektryczności przeprowadzono dla urządzenia zabudowanego w układzie wylotowym silnika spalinowego. Obliczenia prowadzono za pomocą specjalistycznego oprogramowania służącego do modelowania pracy silników spalinowych - AVL Boost, w którym zaimplementowano własny skrypt służący do analizy pracy termoelektrycznego układu odzysku ciepła. Badania te przeprowadzono dla silnika motocyklowego, gdzie sprawdzono jak liczba zaproponowanych segmentów odzysku ciepła wpływa na ilość produkowanej energii elektrycznej w funkcji parametrów pracy silnika spalinowego. Następnie, obliczenia przeprowadzono dla silnika samochodu osobowego w znormalizowanych cyklach jazdy. Uwzględniono w takim wypadku także pojemność cieplną wymiennika znajdującego się pomiędzy modułami termoelektrycznymi a przepływającymi spalinami. Zbadano wpływ tej pojemności cieplnej na ilość odzyskiwanej energii oraz określono jej optymalną wartość przy założonych kryteriach.