



Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Ryszarda Buchalika pt. „Experimental and simulation studies of steady- and transient-state operation of thermoelectric systems for cooling and electricity generation”

Podstawą niniejszej recenzji było zlecenie prof. Andrzeja Rusina, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Grzegorz Nowak, prof. PŚ.

Charakterystyka rozprawy

Wiele prac naukowych poświęcono już zagadnieniom termoelektryczności, o czym świadczy liczba dostępnych publikacji w tej dziedzinie. Niektóre z tych prac koncentrują się na wykorzystywanych do budowy termoelementów materiałach i fizyce ciała stałego, podczas gdy inne dotyczą rozwoju i optymalizacji geometrii i wymiarów modułu termoelektrycznego. Ostatnia kategoria obejmuje analizy złożonych systemów termoelektrycznych, które uwzględniają trójwymiarowy charakter przepływu ciepła w całym układzie, a także badania oceniające sensowność stosowania takich elementów i ich ocenę ekonomiczną. Autor przeprowadził przegląd literatury, na podstawie którego można dostrzec znaczny potencjał rozwoju termoelektryczności jako dziedziny wiedzy, zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i inżynierskiego, oraz pole do dalszego rozwoju badań w tej dziedzinie.

Na pracę składa się ciąg sześciu publikacji (ponumerowanych od A do F):

- A. Model matematyczny układu termoelektrycznego oparty na badaniach w stanach ustalonych i nieustalonych
- B. Zaawansowany model generatora termoelektrycznego
- C. Analiza porównawcza i optymalizacja jedno- i dwustopniowych układów chłodzenia opartych o ogniwa termoelektryczne ukierunkowane na otrzymanie niskich temperatur
- D. Analiza techniczno-ekonomiczna układu klimatyzacji opartego o układy termoelektryczne
- E. Analiza zastosowania układów termoelektrycznych do odzyskiwania energii w pojazdach z silnikami tłokowymi
- F. Model odzysku ciepła odpadowego z silnika spalinowego z wykorzystaniem modułów termoelektrycznych

**Warsaw University
of Technology**

prof. Jarosław Milewski
Institute of Heat Engineering
jaroslaw.milewski@pw.edu.pl
21/25 Nowowiejska Street
00-665 Warsaw
Poland



Publikacje te zostały wydane w bardzo dobrych i wysoko punktowanych periodykach naukowych (np. Applied Energy, 200 pkt; Energy Management i Conversion, 200 pkt.). We wszystkich mgr inż. Ryszard Buchalik jest pierwszym autorem.

Główne osiągnięcia naukowe

Głównym przedmiotem badań przedstawionych w recenzowanym cyklu publikacji jest analiza zjawisk zachodzących podczas pracy układów wyposażonych w moduły termoelektryczne. Dotyczy to układów dedykowanych do wytwarzania energii elektrycznej, jak również do pracy jako pompa ciepła. Na bazie przeprowadzonego przeglądu literaturowego tematu, Autor stwierdził, że w dostępnej literaturze naukowej brakowało pewnych zależności, a także biorąc pod uwagę obszary wymagające jeszcze dogłębnej analizy oraz pojęć, które nie zostały jeszcze przeanalizowane, podjęto badania mające na celu uzupełnienia i poszerzenia wiedzy w tym zakresie. W wielu pracach przytoczonych przez Autora dotyczących termoelektryczności pomija się występowanie oporu cieplnego przy przepływie ciepła między wymiennikami ciepła a węzłem termoelektrycznym, zakładając, że temperatury wymienników są temperaturami węzłów. Skutkuje to zbyt daleko idącymi uproszczeniami modeli obliczeniowych i w konsekwencji do niedokładności w szacowaniu rzeczywistych wskaźników pracy takich układów. Natomiast prace, które uwzględniają to zjawisko, dotyczą wybranych szczególnych przypadków i aspektów działania takich układów i nie pozwalają na generalizację ich wyników i stosowanie do innych rozwiązań. Zatem Autor podjął się uzupełnienia tej luki w metodologii i opisie zjawisk termoelektrycznych.

Głównym osiągnięciem naukowym jest opracowanie narzędzi symulacyjnych i metod doświadczalnych umożliwiających kompleksową symulację modułów termoelektrycznych oraz ich pracy w warunkach ustalonych i przejściowych. Autor osiągnął ten cel poprzez:

- opracowanie i budowę w pełni opomiarowanego stanowiska badawczego przeznaczonego do badania układów termoelektrycznych
- opracowanie metody pomiarów dedykowanych do oceny oporu cieplnego styków i podstawowych parametrów modułów termoelektrycznych
- opracowanie modelu układu termoelektrycznego z uwzględnieniem oporu cieplnego i pojemności cieplnej poszczególnych elementów układu
- opracowanie metody oceny oporu cieplnego styku w temperaturze zbliżonej do otoczenia
- opracowanie oprogramowania modelującego pracę w stanie ustalonym i przejściowym systemów z modułami termoelektrycznymi

**Warsaw University
of Technology**

prof. Jarosław Milewski
Institute of Heat Engineering
jaroslaw.milewski@pw.edu.pl
21/25 Nowowiejska Street
00-665 Warsaw
Poland



- opracowanie procedur numerycznych i przeprowadzenie badań doświadczalnych na jedno- i dwustopniowych układach termoelektrycznych
- przeprowadzenie symulacji numerycznych układów odzyskiwania ciepła odpadowego w układzie wydechowym silnika spalinowego (w tym symulacja jego działania)

Na szczególną uwagę zasługuje opracowanie własnych autorskich modeli analitycznych opisujących pracę układów termoelektrycznych, które uwzględniają między innymi opór cieplny na każdej warstwie kontaktowej. Co więcej, na tej podstawie Autor stworzył własne narzędzie symulacyjne w postaci programu komputerowego ThermoelectricCalc, umożliwiającego kompleksową analizę pracy układów jedno- i dwustopniowych, z uwzględnieniem przechłodzenia i optymalizacji zagadnień elektrycznych. Oprogramowanie zawiera możliwość optymalizacji pracy analizowanych układów dla szeregu zdefiniowanych zmiennych decyzyjnych i zostało wykorzystane do przeprowadzenia symulacji według oryginalnych, nowatorskich i specjalnie zaprojektowanych metodologii.

Należy także podkreślić, iż badania teoretyczne były prowadzone równoległe z pracami doświadczalnymi, dzięki opracowanej metodzie stanów nieustalonych wykorzystującej różnicę pola temperatury i bezwładności pola elektrycznego, sformułowano procedurę wyznaczania oporu cieplnego przepływu ciepła pomiędzy źródłem ciepła/radiatorem a złączami termoelektrycznymi.

Podsumowując, podstawie opracowanego modelu analitycznego i pomiarów przeprowadzonych w stanach ustalonych i nieustalonych, opracowano metodologię na określenie parametrów materiałowych modułu termoelektrycznego. Stworzono również własną metodę oceny rezystancji styku za pomocą pomiarów w temperaturze otoczenia.

Uwagi krytyczne

Uwagi merytoryczne do pracy

W obliczeniach symulacyjnych modułów termoelektrycznych przyjęto parametry modułów/materiałów termoelektrycznych jako wartości stałe, niezależne od temperatury. Dla wielu znanych materiałów termoelektrycznych zarówno współczynnik „ZT”, jak również poszczególne właściwości są silnie zależne od temperatury, zmiana temperatury w zakresie pracy może skutkować nawet kilkudziesięcioprocentową zmianą danego parametru.

Przyjęty model wyzwania ciepła (publikacje E i F) w komorze spalania podczas ruchu tłoka jest opisany w sposób niewyczerpujący. Przyjęty sposób modelowania wydaje się opierać na znaczących uproszczeniach.



W niektórych miejscach w tekście publikacji B przy wielkości „r” jest wartość liczbowa oraz jednostka [K/W], a w innych jednostki brak. Jednakże jest to pewna niekonsekwencja i błąd formalny.

W publikacji E na stronie 2, kolumna prawa, góra; zdanie: „The temperature of the heat source was determined based on the 0.5 W/K thermal conductivity of the thermoelectric modules. For 10 thermoelectric modules (one assembly unit) the thermal conductivity (reverse of thermal re-sistance) is about 10 W/K.” Podane liczby nie pasują do siebie.

W publikacji B na stronie 6 następuje zdanie: „Figure 8 shows the relative deviation of efficiency when constant external resistance of 2.05 Ω is applied. This case would give a vertical line (constant resistance) when imposed in Fig. 6.” Stała rezystancja i linia pozioma na Fig. 6 to nie to samo.

W publikacji C, rysunek 14 i jego opis, wydają się nieprawidłowe lub zniekształcenie na górze prawego rysunku. Podobnie, w publikacji D nie jest jasne skąd pochodzą zniekształcenia krzywych na rysunkach?

W publikacji C, Autor mógłby się pokusić o uogólnienie przedstawionych na przykładzie wyjściowym obliczeniach i optymalizacji.

Dlaczego opór termiczny, przedstawiony w publikacji D pomiędzy złączem termoelektrycznym a wymiennikiem ciepła (radiatorem zewnętrznym, wg. opisu będącym w kontakcie termicznym za pośrednictwem medium ciekłego) jest uwzględniony w jednostkach odpowiadających powierzchniowemu oporowi kontaktowemu (właściwemu)?

Wpływ zjawisk falowych w publikacji F na wymianę ciepła nie jest wyczerpująco wyjaśniony w funkcji najważniejszych dostępnych parametrów w sposób wielokryterialny.

Ogólnie

1. Publikacje E i F w znacznej części się pokrywają.
2. W autoreferacie/przewodniku po publikacjach są przedstawione opisy tych publikacji, co nie ma za sensu, skoro i tak publikacje są dołączone do pracy stanowiącej ocenianą rozprawę. Znacznie lepiej by było, gdyby przewodnik był ukierunkowany opis wkładu jaki w daną publikację wniósł sam Autor.

Uwagi redakcyjne

Publikacje A, B i D zawierają pozycje bibliograficzne które nie są podane w prawidłowym formacie. (np. A19, B3, D13).




W publikacji E w rozdziale Conclusions znajduje się błąd edytorski – myślnik w zdaniu „In the pro-posed configuration, the power of alternator changes.”

W publikacji A na stronie 6, lewa kolumna dół; jest „...and the contact resistance coefficient (17) and (18), respectively, based on measurable quantities only:”, powinno być: „...and the contact resistance coefficient (12) and (13), respectively, based on measurable quantities only:”

Wniosek końcowy

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiony cykl publikacji stanowią zwartą i szczegółową prezentację kompleksowych badań poświęconych ogniowom termoelektrycznym i z całą pewnością wpisuje się obszar aktualnych problemów konwersji energii. Opracowanie metodologii pomiaru właściwości takich ogniw w temperaturach pokojowych jest bardzo istotnym wkładem w tę dziedzinę nauki.

Uzyskane wyniki i wnioski mogą mieć istotny wpływ na dalszy rozwój technologii opartych o ogniwa termoelektryczne. Z całą pewnością stwierdzam również, że Autor osiągnął zamierzone cele, a cały cykl publikacji oceniam bardzo dobrze. Cykl publikacji mgr. inż. Ryszarda Buchalika spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie mgr. inż. Ryszarda Buchalika do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadaniu Mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Z uwagi na opracowanie autorskiego oprogramowania dedykowanego obliczeniom ogniw termoelektrycznych oraz przeprowadzenie nowatorskich badań eksperymentalnych proponuję wyróżnić rozprawę.


prof. dr hab. Inż. Jarosław Milewski

Instytut Techniki Ciepłej

Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

**Warsaw University
of Technology**

prof. Jarosław Milewski
Institute of Heat Engineering
jaroslaw.milewski@pw.edu.pl
21/25 Nowowiejska Street
00-665 Warsaw
Poland