

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. **Kamila Lubikowskiego** pt.

## **Zastosowanie generatorów termoelektrycznych w procesie odzyskiwania energii z układów napędowych pojazdów**

Promotorzy:  
dr hab. inż. **Jędrzej Mączak**, prof. PW  
dr inż. **Krzysztof Szczurowski**

### **1. Wstęp**

Recenzję rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem opracowano na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej z dn. 20.06.2018.

Rozprawa została napisana w języku polskim ze streszczeniem w języku angielskim. Praca liczy 155 stron, składa się z 7 rozdziałów i zawiera wykaz bibliograficzny liczący 148 pozycji. Zawiera też 5 załączników oraz wykaz rysunków i symboli.

Rozprawa dotyczy analizy możliwości wykorzystania generatorów termoelektrycznych do wykorzystania części ciepła traconego w układach napędowych pojazdów. Praca ma bardzo istotny wymiar praktyczny. Łączy ona podejście analityczne z dostrojeniem parametrów modelu do rzeczywistych parametrów generatorów TEG. Doktorant zmierzył doświadczalnie faktyczne parametry generatorów TEG. Następnie opracował szczegółowy model matematyczny, który uwzględnia nieliniowości parametrów rzeczywistych generatorów. Model ten został następnie wykorzystany do analizy pracy TEG w rzeczywistym układzie napędowym. Istotną częścią pracy jest algorytm doboru optymalnych parametrów pracy generatorów. Pracę zakończono zastosowaniem opracowanych metod w warunkach laboratoryjnych.

Praca została przeze mnie rozpatrywana jako osiągnięcie w dyscyplinie naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn.

### **2. Treść rozprawy**

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów oraz bibliografii, liczącej 148 pozycji. Praca zawiera też 5 załączników oraz wykaz rysunków i symboli.

**Rozdział 1** zawiera krótki wstęp do problematyki energooszczędności w nowoczesnej gospodarce ze szczególnym uwzględnieniem oszczędności paliw kopalnych i ograniczenia emisji szkodliwych związków. W kolejnej części Autor przedstawia podstawy działania generatorów termoelektrycznych oraz rozwiązania techniczne stosowane w ich konstrukcji. Wprowadzone są również podstawowe parametry charakteryzujące TEG oraz klasyfikacja na zasadnicze grupy tych urządzeń. Bardzo obszernie przedstawiono dotychczasowe rozwiązania w dziedzinie zastosowania TEG do odzyskiwania energii cieplnej. Ta część rozdziału 1 może służyć jako interesujący i bardzo bogaty przegląd literatury oraz rozwiązań zgłoszonych do ochrony patentowej. Oprócz samych rozwiązań technicznych przedstawiono również bogaty przegląd dziedziny modelowania TEG. W końcowej części rozdziału Doktorant formułuje zasadniczy problem badawczy, który będzie rozwiązywał w swojej pracy, a także opisuje dlaczego jest on szczególnie istotny w zastosowaniach do napędów pojazdów.

W **Rozdziale 2** Doktorant przedstawia badania laboratoryjne rzeczywistych generatorów termoelektrycznych. Wykazano w nim, że producenci podają jedynie uproszczone parametry generatorów, a ich rzeczywiste osiągi zależą nie tylko od różnicy temperatur, ale również od temperatur strony gorącej i zimnej. Przedstawiono budowę stanowiska laboratoryjnego oraz uzyskane wyniki. Najbardziej interesującymi wynikami są obserwacje bezwładności termicznej układu oraz nieliniowości współczynnika Seebecka.

**Rozdział 3** wykorzystuje dane pomiarowe z poprzedniego rozdziału w celu uzyskania zastępczego współczynnika Seebecka. Jest to istotne z uwagi na kluczową wartość tego współczynnika w generowaniu energii elektrycznej. Autor przedstawia uzyskane wyniki w formie graficznej i analitycznej oraz wskazuje na błędy popełniane przy nieuwzględnieniu błędów nieliniowości.

**Rozdział 4** opisuje opracowany przez Doktoranta model analityczny pojedynczego generatora TEG oraz kompletnego ogniwa. Autor zamodelował wszystkie istotne zjawiska zachodzące w TEG. Końcowa część rozdziału opisuje model symulacyjny ogniwa TEG, który wyznacza parametry ogniwa podczas pracy w układzie odzyskiwania energii.

W **Rozdziale 5** Doktorant przedstawia opracowany przez siebie algorytm doboru generatora TEG do odzyskiwania energii z konkretnej lokalizacji układu napędowego. W rozdziale zwrócono uwagę na ograniczenia technologiczne, które często odgrywają decydującą rolę, np. ze względu na istniejące uwarunkowania lokalizacyjne bądź temperaturowe.

**Rozdział 6** jest poświęcony przetestowaniu metod zaproponowanych w poprzednich rozdziałach. Autor opisał badania na trzech stanowiskach laboratoryjnych. Pierwsze z nich służyło zbadaniu zjawiska bezwładności temperaturowej w działaniu generatorów TEG, które – jak wykazały badania – ma znaczny wpływ na sprawność pracy ogniwa. Drugie ze stanowisk było zmodyfikowanym silnikiem benzynowym i opisywało zautomatyzowane pomiary optymalnego punktu pracy TEG. Na trzecim stanowisku Doktorant badał generator TEG zamontowany na zmodyfikowanym układzie wydechowym silnika spalinowego. Badania miały szeroki zakres, obejmujący różne warunki zewnętrzne.

**Rozdział 7** zawiera podsumowanie rozprawy. Zawarto w nim wnioski wynikające z wykonanych badań oraz propozycje kierunków dalszych badań.

Rozprawę uzupełnia spis literatury oznaczony jako rozdział 8 oraz 5 załączników, oznaczonych jako rozdział 9. Załączniki przedstawiają szczegóły uzyskanych wyników oraz charakterystykę silnika spalinowego badanego w rozdziale 6.

### 3. Analiza krytyczna

#### 3.1. Uwagi ogólne

Technologie energooszczędne z każdym rokiem zyskują na znaczeniu, tak dla ośrodków badawczych, jak i dla podmiotów gospodarczych. Z uwagi na unikalną zdolność zamiany różnicy temperatur bezpośrednio w energię elektryczną, wzrasta również znaczenie generatorów termoelektrycznych. Wg źródeł cytowanych przez Doktoranta, uzyskiwano już sprawności do 7%, co jest bardzo obiecującym wynikiem i dopinguje do dalszych prac badawczych. W literaturze przytoczono ogniwa o sprawności dochodzącej nawet do kilkunastu procent. Rozwój technologii TEG będzie miał duże znaczenie dla rozwoju konstrukcji pojazdów, jak również dla planowania ich eksploatacji. Możliwe stać się może np. pozbycie się alternatora z konstrukcji pojazdów, dzięki czemu uzyskany zostanie kolejny wzrost sprawności pojazdów oraz – w makroskali – zmniejszy się zużycie paliw.

Pomimo rozwoju technologii TEG, jej zastosowanie w pojazdach samochodowych nie jest zadaniem trywialnym. Obecne pojazdy nie były projektowane pod kątem ułatwienia montażu generatorów termoelektrycznych, a parametry np. układu chłodzenia czy wydechu nie brały pod uwagę maksymalizacji efektywności pracy TEG. Z uwagi na wrażliwość na maksymalną temperaturę pracy należy również poświęcić uwagę bezpieczeństwu eksploatacji i niezawodności pracy samego generatora. Tak więc wybrany przez Doktoranta problem badawczy jest istotny i aktualny. Doktorant dobrze zdaje sobie sprawę z opisanych powyżej uwarunkowań i poprawnie wskazuje na konieczność wzięcia ich pod uwagę w projektowaniu i eksploatacji rzeczywistego ogniwa TEG.

Autor przeprowadził wyczerpującą analizę literatury światowej w badanej dziedzinie. Znaczną część cytowanych przez Niego prac stanowią prace prowadzone przez inne ośrodki, publikowane w literaturze o zasięgu światowym. Zestawienie obejmuje zarówno pozycje klasyczne, jak i najnowsze artykuły w periodykach naukowych.

Bardzo wartościową częścią pracy jest przedstawienie rzeczywistych nieliniowości ogniwa TEG. Jest to zagadnienie bardzo interesujące, które potwierdza systematyczność w podejściu do badania problemu naukowego. Otrzymane wyniki zostały w przejrzysty sposób przedstawione w rozdziale 3 (patrz np. Rys. 3.6). Pewien niedosyt pozostawia jednak brak ilościowej analizy nieliniowości w układzie.

Atutem pracy jest model analityczny ogniwa TEG, który uwzględnia liczne zjawiska zachodzące podczas eksploatacji. Często wpływają one na obniżenie ogólnej sprawności ogniwa i należy pamiętać o ich wpływie na końcową ilość odzyskiwanej energii. Ważkim osiągnięciem jest również wykazanie nieliniowości parametrów pracy generatorów TEG, o czym nie informują producenci tych elementów, a co ma znaczny wpływ na efektywność ich pracy. Implementacja modelu wykazała dużą biegłość Doktoranta w środowisku Matlab, co będzie bardzo cenne dla jego dalszej kariery naukowej. Wartość zaproponowanych metod potwierdza ich weryfikacja na danych rzeczywistych. Doktorant wykazał duże umiejętności praktyczne i umiejętność rozwiązywania problemów nie tylko z zakresu mechaniki, ale również z zakresu technik pomiarowych oraz analizy danych.

Bardzo istotne są wyniki otrzymane podczas pomiarów rzeczywistych parametrów ogniwa TEG na stanowisku pomiarowym. Badania przedstawiają pełen obraz zespołu zjawisk wraz z ich złożonością. Oprócz istotności samych wyników, sposób ich przedstawienia pozwala na

dobrze zrozumienie istoty działania TEG w różnych warunkach pracy i sposobu uzyskania optymalnej sprawności.

Ważnym atutem pracy jest jej bardzo staranna redakcja. Dysertacja ma bardzo bogatą szatę graficzną i zawiera liczne kolorowe ilustracje, co ułatwia odbiór treści. Również układ typograficzny pracy jest bardzo przejrzysty i dodatkowo ułatwia lekturę.

Pomimo pozytywnej oceny całości pracy, mam jednak kilka uwag, zarówno ogólnych, jak i szczegółowych.

W rozdz. 1.4 od samego początku Autor pisze o konkurencji odnawialnych źródeł energii z systemami konwencjonalnymi, a zaraz potem że jednym z takich źródeł odnawialnych jest proces odzyskiwania energii cieplnej w oparciu o generatory termoelektryczne. Myślę, że byłoby wskazane opisanie np. jak istotna jest część odzyskiwana przez generatory TEG w odniesieniu do całości energetyki odnawialnej. Wydaje się, że jest to ciągle technologia o stosunkowo niewielkim zasięgu i dużych możliwościach rozwoju.

Na str. 31 opisany jest przypadek, gdy dzięki generatorom TEG możliwe jest ponowne zagospodarowanie części energii. Autor nie wspomina o jakiej części mówimy, a jest to kluczowe do oceny efektywności takiego działania.

W ramach problemów do dyskusji, proszę o wyjaśnienie następujących kwestii:

1. Na str. 35 Doktorant stwierdza, że „układy mikrogeneracyjne mogą (...) zasilać bezpośrednio czujniki w instalacjach bezpieczeństwa”. Układy bezpieczeństwa muszą mieć jak najwyższą pewność działania, a układy mikrogeneracyjne (w szczególności TEG) ze swojej istoty nie zapewniają niezawodności dostarczania energii, np. w przypadku braku różnicy temperatur pomiędzy stroną zimną i gorącą. Jak w takim razie można je wykorzystywać w zastosowaniach krytycznych?
2. Na str. 36 Autor przytacza opinię, że w silniku o mocy 180 kW możliwe jest zaoszczędzenie 3 kW. Nie są jednak podane żadne dane dotyczące kosztów takiego systemu, więc trudno jest ocenić opłacalność takiego rozwiązania. Ponadto, na str. 47 pojawia się stwierdzenie, że „... generatory termoelektryczne (...) mogą być źródłem energii i skutecznie zastąpić dotychczasowe źródła zasilania elektrycznego”. Czy Doktorant może przytoczyć choćby szacunkowe analizy opłacalności ekonomicznej zastosowania generatorów TEG? Czy można powiązać tę informację z danymi ze str. 39, gdzie podano że koszt odzyskania 1.1 kW wynosi 10 000 USD? Jak wpływa to na opłacalność stosowania generatorów TEG? Po jakim czasie użytkownik może oczekiwać zwrotu inwestycji w generator TEG?
3. Jaka jest żywotność badanych generatorów termoelektrycznych? Jak wpływa ona na opłacalność ich stosowania, szacowaną w poprzednim pytaniu?
4. W rozdziale drugim Autor przedstawia badania zależności współczynnika Seebacka od różnicy temperatur oraz od temperatury strony gorącej. W rozdziale 2.3 przedstawione są przede wszystkim wyniki jakościowe. Czy porównywano jakie są ilościowe odstępstwa od charakterystyki liniowej?
5. Na str. 67 Doktorant stwierdza, że aproksymacja generatora TEG (równanie (19)) stanowi cechę osobniczą serii generatorów i dla każdego ich typu współczynniki równania mogą przyjmować inne wartości. Konieczność estymacji współczynników równania dla każdej serii, a może wręcz dla każdego generatora, może spowodować

nieopłacalność ekonomiczną tak szczegółowych badań. Czy Autor prowadził badania porównawcze różnych serii generatorów tego samego typu i czy może stwierdzić, na ile podobne mogą być wyniki otrzymane dla różnych serii TEG?

6. W rozdziale 5 na str. 100 wymienione są parametry doboru generatorów TEG. Nie została przedyskutowana żywotność generatorów, podczas gdy jednocześnie Autor wspomina o wrażliwości TEG na wysokie temperatury pracy. Na ile parametr ten powinien być brany pod uwagę, szczególnie przy analizie efektywności ekonomicznej?
7. W rozdziale 7 Autor stwierdza, że model może „stać się podstawą algorytmu sterowania poborem prądu zestawu układu odzyskiwania energii pozwalającego uzyskać największą moc w danych warunkach termicznych.” W wielu układach, np. panelach fotowoltaicznych, stosuje się algorytmy śledzenia optymalnego punktu pracy, które na bieżąco dostosowują parametry zasilania do obciążenia, tzw. algorytmy MPPT. Na ile proponowane rozwiązanie może wykorzystać doświadczenia z eksploatacji takich algorytmów?

### 3.2. Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe odnoszą się do zauważonych w rozprawie drobnych błędów merytorycznych i edycyjnych. Do błędów tych należą:

- str. 11: podawane są procenty udziału paliw w globalnym zużyciu energii. W pracy pojawia się zdanie: „Pozostałe 1% można w dużej części przypisać alternatywnym źródłom energii”. Z poprzedniego zdania wynika jednak, że pozostała część to 3%, a nie 1%
- str. 14: „... możliwy jest spadek ceny do 1000 Euro za ogniwo fotowoltaiczne...”; Autor nie wspomina jakie ogniwo ma na myśli (typ, moc, rozmiar, cena, ...)
- na str. 93 na Rys. 4.15 przedstawiono liniowy wzrost rezystancji w czasie; liniowość nie jest tu istotna, ponieważ model nie jest modelem dynamicznym i czas nie wpływa na jego działanie
- str. 110: w opisie układu pomiarowego nie podano podstawowych parametrów metrologicznych, np. karty NI 9219.
- str. 115: w tabeli 6.12 wartości oznaczone żółtym tłem uzyskano z zastosowania wzorów analitycznych, a nie pomiarów. Są one oznaczone jako wartości aproksymowane, podczas gdy faktycznie są one ekstrapolowane.

W pracy znalazły się też drobne błędy natury stylistycznej i językowej, jak np.:

- str. 3: „... zaś Rozdział 9 kończy *rozprawę załączniki do rozprawy.*”
- str. 12: „transformację gospodarki energetycznej Niemiec z *generacji źródeł energii ...*”
- str. 13: „... w kierunku *ziemi...*”
- str. 14: „Równoległe, w innych gałęziach *przemysłowych, ...*”
- str. 20: akapit zaczynający się od słów: „Właściwości metali...” jest powtórzony słowo w słowo po akapicie go poprzedzającym
- str. 39: niepoprawnie użyte są wielkie litery w sformułowaniu „*Słowaccy Autorzy ...*”

- str. 74: nazwy związków chemicznych pisane są z dużych liter, np. „*Tellurek Ołowiu*” albo „*Trójtymonek Kobaltu*”
- str. 76: „... *zostanie wykorzystane to oznaczenie...*”
- str. 82: „... różnicą *moc* cieplnej i mocy elektrycznej”
- str. 100: „... odprowadzenia ciepła czynnikami *chodzącymi*”
- str. 100: „... odprowadzania ciepła resztkowego *emitowanej* przez generator.”
- str. 106: Rys. 6.2 jest estetyczny, ale mało czytelny w przyjętej perspektywie; dużo łatwiej byłoby odczytać wartości na wykresie przy prostym wykresie XY
- str. 108: Rys. 6.4 jest mało czytelny z uwagi na zbyt dużą liczbę zdjęć. Zamieszczenie tylko symboli przyrządów pomiarowych uprościłoby czytelność rysunku
- str. 109: „... obciążenie układu odzyskiwania energii rezystancją *wewnętrzna*”
- str.124: „... układ TEG w warunkach rzeczywistych pracuje w stanie ustalonym lub poza nim” – to stwierdzenie jest tautologią
- str. 127: „... *bez* podłączenia do hamowni silnikowej”

Szkoda, że Autor nie znalazł więcej czasu na korektę tych drobnych błędów, których można było łatwo uniknąć, a które poprawiłyby odbiór całości pracy. Są to błędy nieliczne i bardzo łatwe do usunięcia. Mam nadzieję, że wskazanie ich pozwoli na ich uniknięcie przy publikacji pracy w formie artykułów, do czego zachęcam biorąc pod uwagę ciekawe i wartościowe wyniki otrzymane przez Doktoranta.

#### **4. Główne osiągnięcia rozprawy**

Uważam, że najważniejszymi osiągnięciami rozprawy jest zaproponowanie poprawy bilansu energetycznego pojazdu poprzez odzyskiwanie energii z ciepła odpadowego przy użyciu generatorów termoelektrycznych. Na osiągnięcie to składają się następujące elementy:

- zbadanie komercyjnych ogniw TEG, szczególnie pod kątem zależności współczynnika Seebecka od różnicy temperatur oraz od temperatury strony gorącej i zimnej
- opracowanie i dostrojenie modelu matematycznego generatora TEG
- opracowanie modelu generatora TEG umożliwiającego badanie dla określonych warunków pracy
- opracowanie algorytmu doboru generatora TEG oraz optymalnego punktu jego pracy
- weryfikacja eksperymentalna uzyskanych wyników

#### **5. Wniosek końcowy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Lubikowskiego poświęcona analizie możliwości wykorzystania generatorów termoelektrycznych w procesie odzyskiwania energii z układów napędowych pojazdów stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Uważam, że rozprawa zasługuje na ocenę bardzo pozytywną, a opisany sposób rozwiązania problemu naukowego jest poprawny. Rozprawa prezentuje wysoki poziom, a wyniki zostały prawidłowo zweryfikowane. Na szczególne podkreślenie zasługuje bardzo owocne połączenie podejścia analitycznego z eksperymentalnym. Potwierdzeniem wartości wyników

otrzymanych przez Doktoranta jest lista publikacji i wystąpień konferencyjnych, gdzie były one prezentowane.

Po zapoznaniu się z rozprawą stwierdzam, że Autor wykazał się dobrą znajomością dziedziny wiedzy z zakresu budowy silników spalinowych wraz z ich układami towarzyszącymi, modelowania matematycznego, przetwarzania sygnałów oraz przeprowadzania i analizy eksperymentów. Rozprawa dotyczy więc dyscypliny naukowej budowa i eksploatacja maszyn, chociaż konieczne było też wykazanie się przez Doktoranta wiedzą z innych dziedzin.

Uważam, że zalety merytoryczne rozprawy zdecydowanie przeważają nad nielicznymi występującymi w niej błędami edytorskimi. Uważam także, że Autor prawidłowo sformułował zadanie naukowe i rozwiązał je.

W związku tym stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Kamila Lubikowskiego pt. „**Zastosowanie generatorów termoelektrycznych w procesie odzyskiwania energii z układów napędowych pojazdów**” spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Dodatkowo, z uwagi na bardzo szeroki zakres pracy oraz na bardzo dobrą jakość osiągniętych wyników wnioskuję o wyróżnienie pracy.



dr hab. inż. Tomasz Barszcz, prof. nadzw. AGH

Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademia Górniczo Hutnicza im. St. Staszica  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków