

Kraków, 08.09.2023 r.

prof. dr hab. inż. Paweł Ocioń
Katedra Energetyki,
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
Politechnika Krakowska

Recenzja pracy doktorskiej:

Experimental and mathematical investigation into the heat-transfer processes within the heat exchangers of an α type Stirling engine

Autor rozprawy

mgr inż. Bartłomiej Rutczyk

Promotor

prof. dr hab. inż. Ireneusz Szczygiel

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Praca jest napisana w języku angielskim. Liczy 150 stron. Praca składa się z sześciu rozdziałów. Modelowanie matematyczne silników Stirlinga było szeroko badanym tematem na przestrzeni ostatnich kilku dekad. Wśród różnych podejść, wielu autorów zaproponowało zero-wymiarowe modele oparte na rozwiązywaniu różniczkowych bilansów masy i energii. Ponieważ niektóre z tych modeli wymagają zastosowania współczynników wnikania ciepła charakteryzujących procesy konwekcyjne w wymiennikach ciepła, metoda ich obliczania wymaga szczególnej uwagi. Celem pracy doktorskiej było zbadanie, w jaki sposób korelacje na współczynniki wnikania ciepła wpływają na jakość zero-wymiarowych matematycznych modeli silnika Stirlinga. Dokonano tego poprzez walidację różnych korelacji w ramach zero-wymiarowego modelu, który opracował doktorant. Praca przedstawia kompleksowy przegląd korelacji na współczynniki wymiany ciepła odpowiednich do obliczeń silnika Stirlinga.

Wyniki badań eksperymentalnych uzyskano dla platformy opartej na silniku Genoastirling ML3000. Rezultaty pomiarów porównano z wynikami modelowymi wykorzystującymi różne modele wymiany ciepła, zawiązując wybór do korelacji współczynników wnikania ciepła

opracowanych przez następujących naukowców: Anand i Pinfold (1980), Toda (1994) oraz Kanzaka i Iwabuchi (1992), Iwabuchi (1992). Dla najlepiej działających modeli zaproponowano dalsze udoskonalenie równań i wykazując poprawę jakości przewidywania modelu pod względem wskazywanej mocy silnika.

Poniżej przedstawiono charakterystykę poszczególnych rozdziałów pracy:

Rozdział pierwszy jest wstępem do pracy. Przedstawia dwie tezy pracy:

- Modelowanie silnika Stirlinga można z powodzeniem przeprowadzić przy użyciu prostych modeli, pod warunkiem, że korelacje wymiany ciepła w nich są odpowiednie.
- Gęstość mocy silnika Stirlinga można w niektórych przypadkach znacznie poprawić poprzez umiarkowaną intensyfikację wewnętrznego transferu ciepła

A następnie historię konstrukcji silników Stirlinga (podrozdział 1.1), podejście do ich modelowania (podrozdział 1.2) w tym: przemiany termodynamiczne, definicję liczb Beale'a i Westa, oraz założenia różnych modeli stosowanych w obliczeniach cieplnych silników Stirlinga:

- Modele silników Stirlinga rozwiązują te problemy na różne sposoby. Izotermiczny model Schmidta uwzględnia zagadnienia związane z kinematyką, poprzez uwzględnienie równań ruchu, jednak problem wymiany ciepła może być uwzględniony jedynie poprzez podnoszenie i obniżanie stałych temperatur w objętościach rozprężania i sprężania powyżej i poniżej temperatury ścianki, tak aby gradient temperatury odpowiadał współczynnikowi wnikania ciepła
- Klasa modeli adiabatycznych opiera się na idei modeli izotermicznych poprzez dodanie dodatkowych objętości kontrolnych dla wymienników ciepła nagrzewnicy i chłodnicy. Najbardziej podstawowy model adiabatyczny zakłada, że gazy opuszczające wymienniki ciepła mają stałą temperaturę
- Model Urieli "SIMPLE" uwzględnia wewnętrzną wymianę ciepła i zmiany temperatury w przestrzeniach nagrzewnicy i chłodnicy, chociaż wykorzystuje korelacje, powołując się na brak innych opcji. Podobną metodę zastosował Finkelstein, który wykorzystuje metodę NTU do analizy wymiany ciepła, chociaż źródła nie podają, w jaki sposób obliczono wartości NTU

- Inną klasą modeli są modele "politropowe", które łączą wymienniki ciepła wraz z cylindrami, przy jednoczesnym zapewnieniu zmiennych temperatury, szybkości wymiany ciepła i obszarów wymiany ciepła. Taki model został zaproponowany przez pracach których współautorem jest doktorant i zweryfikowany przez porównanie z danymi uzyskanymi z symulacji CFD.

Rozdział drugi przedstawia równania wykorzystywane w modelowaniu Silnika Stirlinga w tym: tworzenie zerowymiarowego modelu gazu rzeczywistego, kinematyka ruchu tłoka, bilans masy i energii, straty ciśnienia, straty wynikające z wycieków, straty ciepła przez ścianki cylindra.

Następnie omówiono korelację dla wyznaczania współczynnika wnikania ciepła: korelację Nusselta, Korelację Eichelberg'a, Korelację Elser'a, Korelację Woschni, Korelację Annand'a, Korelację Adair'a, Korelację LeFeuvre'a, Korelację Hohenberg'a, Korelację Disconzi'ego, Korelację Aigner'a, Korelację Lawton'a, Korelację Kornhauser'a i Smith'a, Korelację Lekic'a i Kok'a, Korelację Tody, Korelację Liu, Korelację Fagottie'go, Korelację Kanzaki i Iwabuchiego, Korelacja Zhao i Cheng'a, Korelacja Xiao, Korelacja Organ'a. Następnie podano urządzenia i warunki dla których uzyskane zostały wyżej wymienione korelacje. Kolejno podano wyznaczania temperatury dla modelu silnika Stirlinga, uproszczony model regeneratora, wraz z modelem wymiany ciepła oraz schematem numerycznym rozwiązania równania zachowania energii.

W podrozdziale 2.1.12 porównano obliczenia metoda NTU z modelem różnicowym regeneratora Wykazano różnice efektywności regeneratora, największe przy porowatości wynoszącej 0.6. Metoda NTU przewiduje wyższe wartości efektywności regeneratora. Również różnice w wartościach efektywności regeneratora zaobserwowano dla pojemności cieplnej matrycy regeneratora, oraz długości cyklu pracy. Zazwyczaj metoda NTU przewidywała wyższe wartości sprawności regeneratora niż model różnicowy.

W podrozdziale 2.2 omówiono testy walidacyjne. Obejmowały one porównanie wyników modelu z wynikami CFD i danymi eksperymentalnymi uzyskanymi z innych źródeł. Pierwsze porównania zostały przeprowadzone z wynikami modelu stworzonego przez Bulińskiego i współautorów. Doktorant wykazał, że jego model przewiduje podobne trendy i wartości jak model CFD, pomimo znacznie krótszego czasu obliczeń. Po drugie, model regeneratora został zweryfikowany z danymi z tego samego modelu CFD, wykazując dobrą zgodność. Wreszcie,

model silnika został porównany z danymi pomiarowymi uzyskanymi na Uniwersytecie w Żylinie, podczas stażu doktoranta na Wydziale Mechanicznym.

Co ciekawe, prosty model adiabatyczny bardzo dobrze przewiduje wartość mocy. Jednak znacząco przeszacowuje sprawność silnika.

Model politropowy jest dość dobry pod względem przewidywania mocy silnika i znacznie lepszy niż model adiabatyczny pod względem sprawności. Doktorant zauważył, że prawdopodobnie wybór korelacji wymiany ciepła jest tutaj jedną z głównych kwestii, ponieważ model adiabatyczny całkowicie pomija tę kwestię.

Hipoteza, że znacznie lepszą jakość wyników można osiągnąć poprzez zmianę korelacji na współczynnik wnikania ciepła, jest badana w późniejszym rozdziale na podstawie pomiarów silnika Genoastirling ML3000.

W celu pozyskania danych doktorant przygotował stanowisko eksperymentalne, które przedstawił w rozdziale 3. Stanowisko składa się z silnika Stirlinga (Genoastirling ML3000), niezbędnego sprzętu pomocniczego, takiego jak komora spalania i układ chłodzenia. Zostało ono również wyposażone w sprzęt pomiarowy do wskazań silnika i pomiaru temperatury. Silnik, o którym mowa został wybrany ze względu na jego dostępność i prostą konstrukcję, która umożliwia modyfikacje i dobrze nadaje się do pomiarów.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki pomiarów silnika Genoastirling ML3000. Aby pokazać, jak moc silnika zależy od wewnętrznego współczynnika wnikania ciepła, przeprowadzono analizę parametryczną. Współczynniki przenikania ciepła zmieniano od 0 do 1000 W/m²K. Wymiary silnika odpowiadały wymiarom silnika Genoastirling ML3000 dla pojedynczego zestawu cylindrów. Temperaturę nagrzewnicy przyjęto jako 980.94 K, a temperaturę chłodnicy na 295.83 K. Średnie ciśnienie ustawiono na 5.44 bara. Założono, że silnik obraca się z prędkością obrotową 501.4 obr./min. Założono, że współczynnik przenikania ciepła jest taki sam dla całego silnika, czyli zarówno w chłodnicy jak i nagrzewnicy.

Zależność mocy indykowanej silnika od tej wartości przedstawiono na rysunku 4.1. Jak widać, aż do osiągnięcia wartości około 200 W/m²K wrażliwość na ten parametr jest niezwykle wysoka. Po przekroczeniu tej wartości moc silnika osiąga porównywalne wartości, choć nadal istnieje pewien stopień zależności.

Następnie zweryfikowano zastosowanie korelacji na współczynnik wnikania ciepła, porównując dane pomiarowe z modelem matematycznym (moc silnika wyznaczona przy zastosowaniu różnych korelacji).

Doktorant zauważył, że liczba Westa jest charakterystycznym parametrem silnika oraz powinna być stała we wszystkich punktach pomiarowych. Wyniki przedstawione w Tabelach 4.2, 4.3, 4.4 pokazują, że w eksperymencie tak właśnie jest. Dla argonu odchylenie standardowe liczby Westa wynosi 0.011, dla azotu 0.017 i nie wykazuje widocznej korelacji z żadnymi parametrami roboczymi. W przeciwieństwie do wyników pomiarów, w których liczba W_e jest stała, wartości dla wyników modelu wykazują wahania. W szczególności wydają się one w punktach charakteryzujących się wyższą mocą wyjściową i wyższym ciśnieniem ładowania. Na tej podstawie można sformułować hipotezę, że rozbieżności korelują z ciśnieniem. Aby to zweryfikować, wartości liczby Westa (obliczone na podstawie modelu) można przedstawić jako funkcję ciśnienia. Można również obliczyć ich kowariancję z ciśnieniem. Na podstawie rysunków 4.7 i 4.8 można zauważyć, że dla modeli Kanzaki i Annand'a liczba Westa wydaje się odwrotnie skorelowana z ciśnieniem. W przypadku korelacji Tody jest odwrotnie. Dla zestawu pomiarów z argonem, korelacje zawodzą, co jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ ten zestaw pomiarów został przeprowadzony w węższym zakresie wyższych ciśnień. Wartości kowariancji obliczone na podstawie tych danych przedstawiono w tabeli 4.7. Wartości te są zgodne z wykresami. Wyciągnięto wnioski że dla niższych ciśnień korelacje Kanzaki i Annand'a dają najlepszą zgodność z pomiarami.

W rozdziale piątym w odniesieniu do ważności korelacji wymiany ciepła z wykorzystaniem danych eksperymentalnych. Stwierdzono, że korelacje Kanzaki i Iwabuchiego, Annanda i Pinfeldla oraz Tody prowadzą do najdokładniejszych wyników. Ponadto wykazano, że uwzględnienie współczynnika korekcji opartego na ciśnieniu może poprawić dokładność wyników w odniesieniu do charakterystyki mocy wyjściowej. Hipoteza, która doprowadziła do tego odkrycia, została sformułowana w oparciu o liczbę Westa zastosowanej do wyników modelu i pomiarów, co jest nowatorskim podejściem.

Rozdział szósty jest podsumowaniem dokonań pracy. Na końcu pracy podano rozeznanie literaturowe które liczy 95 pozycji. Kolejno podano spis rysunków i tabel.

2. Uwagi szczegółowe

1. Prosiłbym o omówienie zależności mocy silnika Stirlinga od współczynnika wnikania ciepła (rys. 1.1). Czy prawidłowe jest założenie że współczynnik wnikania ciepła przyjmuje wartość stałą?
2. W pracy podano dwie tezy, natomiast nie podano bezpośrednio celów pracy. Prosiłbym o ich przedstawienie np. Cel 1. Opracowanie i walidacja eksperymentalna zerowymiarowego modelu silnika Stirlinga, Cel 2. walidacja korelacji na współczynnik wnikania ciepła zastosowanych w zerowymiarowym modelu, Cel 3. opracowanie metody modyfikacji korelacji na współczynnik wnikania ciepła.
3. Prosiłbym o podanie dokładności czujników którymi wykonywano pomiary.
4. Dlaczego różnice w wynikach obliczeń regeneratora metodą NTU oraz przy wykorzystaniu modelu różnicowego są duże dla niskiej wartości porowatości matrycy (sprawność regeneratora).
5. Dlaczego na rysunku 2.7 przyjęto aż tak duży zakres zmian pojemności cieplnej wypełnienia?
6. Prosiłbym o więcej informacji na temat modelu CFD przyjętego do walidacji modelu silnika. Jak wyglądała siatka obliczeniowa, warunki brzegowe?

Powyższe uwagi szczegółowe są dyskusyjne i nie umniejszają bardzo wysokiej wartości merytorycznej rozprawy doktorskiej.

3. Ocena rozprawy

Doktorant opracował zero-wymiarowy model matematyczny silnika Stirlinga. Wykonał jego walidację. Opracował stanowisko pomiarowe na którym wykonał badania. Zauważył, że liczne korelacje na współczynnik wnikania ciepła nie dają wystarczająco dobrej dokładności, dlatego zaproponował ich modyfikację w celu poprawy modelu, co udało się uzyskać. Praca jest napisana w języku angielskim, jest przygotowana bardzo starannie, jej wartość naukową oceniam bardzo wysoko. Należy podkreślić że opracowany zerowymiarowy model Silnika Stirlinga z zastosowanymi zmodyfikowanymi korelacjami na współczynnik wnikania ciepła, może być bardzo efektywnym narzędziem do projektowania tego typu urządzeń. Zapewnia on krótki czas obliczeniowy, przy dobrej dokładności obliczanej mocy silnika. Należy również podkreślić fakt, że doktorant bardzo dokładnie przedstawił aktualny stan wiedzy związany z modelowaniem silników Stirlinga, oraz korelacje wykorzystywane w modelu. Opracował

procedurę dostrajania korelacji, która pozwoliła na jeszcze dokładniejsze modelowanie pracy silnika Stirlinga.

Warto podkreślić, że doktorant jest autorem 9 artykułów indeksowanych w bazie Scopus, w takich czasopismach jak Energy Conversion and Management, Energy, Combustion Engines, czy International Journal of Thermal Sciences. Jego prace zyskały 54 cytowania, co jest bardzo dobrym wynikiem na tym etapie kariery naukowej.

Uważam, że praca doktorska spełnia wymagania stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668, późn. zm.) dlatego też rekomenduję ją do publicznej obrony.

Z uwagi na dużą nowatorskość pracy, oraz bardzo staranne oraz bardzo dobry dorobek publikacyjny doktoranta wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o wyróżnienie rozprawy.

Podpisał Paweł Ocioń