MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X
41, s. 347-352, Gliwice 2011

PROTOTYP WIRTUALNY SILNIKA STIRLINGA TYPU „ALPHA". WSTĘPNE WYNIKI BADAŃ

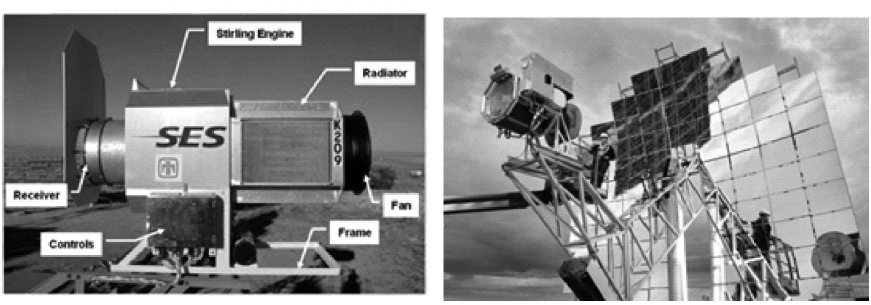
LESZEK REMIORZ, TADEUSZ CHMIELNIAK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska
e-mail: leszek.remiorz@polsl.pl

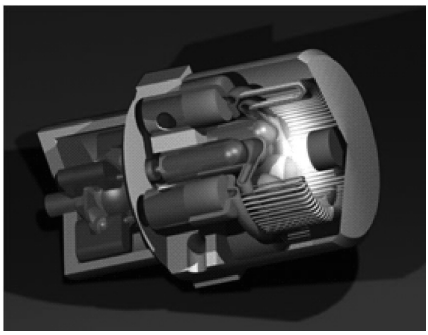
Streszczenie. Praca zawiera opis budowy i wyniki symulacji wirtualnego prototypu silnika Stirlinga typu „alpha". Silniki te znajdują się ponownie w kręgu zainteresowań środowisk badawczych ze względu na ich korzystne cechy eksploatacyjne pozwalające na budowę instalacji zasilanych z odnawialnych źródeł energii. Wirtualny prototyp silnika pozwolił na uzyskanie charakterystyk pracy silnika takich jak wykres indykatorowy, przebieg momentu obrotowego, itp.

1. WSTĘP

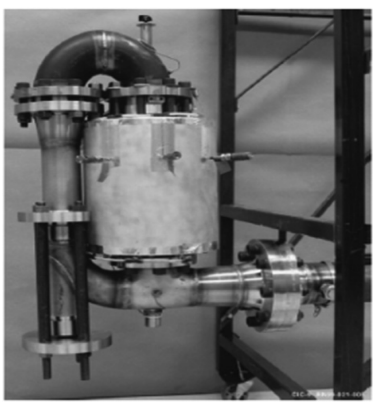
Silnik „na ogrzane powietrze", bo taka nazwa początkowo była używana, został wynaleziony przez Roberta Stirlinga w 1816 r. Pomimo wielu korzystnych cech eksploatacyjnych, takich jak np. wysoka sprawność, cicha praca, wielopaliwowość, nie znalazł on w przeszłości szerszego zastosowania, głównie ze względu na konieczność stosowania wymienników ciepła o znacznych rozmiarach. Obecnie powraca się do tego rozwiązania zarówno w formie tradycyjnej konstrukcji, np. silnik napędzany energią słoneczną (rys.1), [6], silnik NS30A (rys.2), [8], jak również w postaci silników termoakustycznych realizujących ten sam obieg Stirlinga. W ostatnim przypadku wymuszenia mechaniczne związane ze zmianą objętości czynnika roboczego są realizowane poprzez oddziaływanie fali akustycznej, np. silnik opracowany w Los Alamos National Laboratory o mocy 1kW (rys.3), [7].



Rys. 1. Silnik Stirlinga o mocy 25kW napędzany energią słoneczną, Stirling Energy Systems, Inc. (SES)[6]



Rys. 2. Silnik Stirlinga NS30A - Aisin Seiki Corporation, 4 cylindry o pojemności V=148cm^3 każdy, P=30kW, n=1500 1/min [8]



Rys. 3. Silnik termoakustyczny realizujący obieg Stirlinga opracowany w Los Alamos National Laboratory, moc P=1kW, sprawność 30%[7].

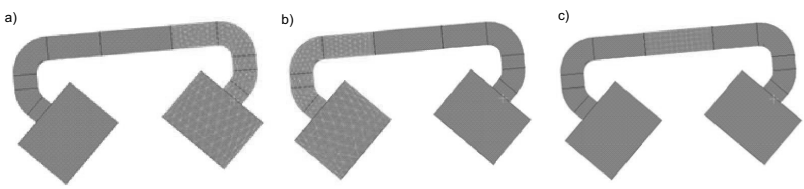
2. WIRTUALNY PROTOTYP SILNIKA STIRLINGA

2.1. Wprowadzenie

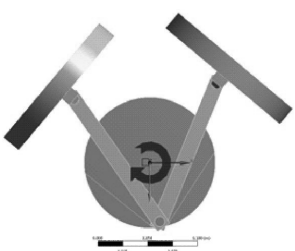
Ponowny wzrost zainteresowania środowisk badawczych silnikami Stirlinga jest związany z ich małą uciążliwością dla środowiska naturalnego oraz możliwością zasilania z odnawialnych źródeł enerii. Do badań została przyjęta konstrukcja silnika Stirlinga w układzie „alpha" o kącie rozwidlenia 90° (rys.4). Główne wymiary silnika to: średnica cylindra 150mm, skok tłoka 120mm, gazem roboczym jest powietrze (gaz doskonały). Ciśnienie spoczynkowe, dla zwrotu wewnętrznego, jest równe ciśnieniu otoczenia. Założono, że silnik będzie hamowany do prędkości obrotowej równej 600obr/min. Przyjęte parametry nie odpowiadają żadnej rzeczywistej konstrukcji silnika i nie zostały również wybrane jako parametry optymalne. Zostały one założone jako wartości początkowe, pozwalające na uruchomienie systemu obliczeniowego.

Rys. 4. Schemat silnika przyjętego do modelowania: silnik typu „alpha”, średnica cylindra 150mm, skok tłoka 120mm

Założono, że wymiennikiem górnym jest ścianka cylindra „gorącego” wraz z doprowadzającym rurociągiem a wymiennikiem dolnym odpowiednio ścianka cylindra „zimnego” wraz z rurociągiem (rys.5). W tej wersji silnika nie była stosowana regeneracja (regenerator został zastąpiony adiabatycznym rurociągiem). Przyjęto temperaturę źródła górnego na poziomie 1100K a dolnego 300K. Konstrukcja układu korbowego została pokazana na rys. 6 .



Rys. 5. Widok wymiennika górnego (a), dolnego (b) oraz regeneratora (c), poszczególne obszary oznaczono kolorem zielonym



Rys. 6. Szkic układu mechanicznego silnika, średnica cylindra 150mm, skok tłoka 120mm

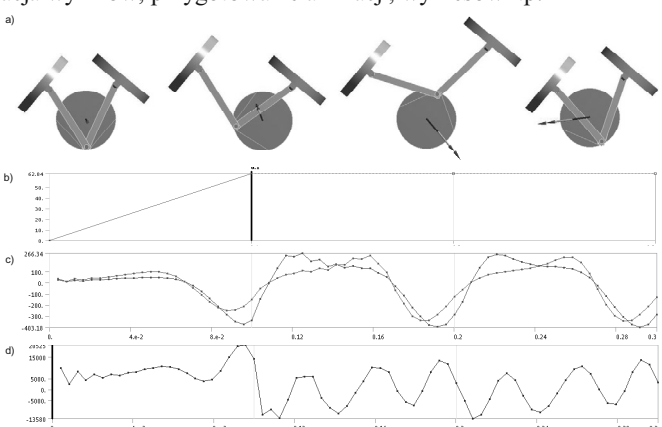
2.2. Ogólny algorytm budowy modelu

Wirtualne prototypowanie to obszar badań zajmujący się symulacjami numerycznymi obiektów fizycznych obejmujący obiekt w taki sposób, w jaki zwykle badany jest dopiero jego fizyczny prototyp. Pozwala to na analizowanie poszczególnych cykli życia produktu w wirtualnej rzeczywistości i zebranie pierwszych doświadczeń jeszcze przed fizycznym wykonaniem urządzenia. Środowiska obliczeniowe umożliwiające wirtualne prototypowanie

zawierają narzędzia do tworzenia geometrii trójwymiarowej zintegrowane z rozbudowanymi programami obliczeniowymi opartymi na metodach elementów i objętości skończonych oraz ze wsparciem modelowania wirtualnej rzeczywistości (animacja).

Kolejne kroki prowadzące do uruchomienia wirtualnego prototypu silnika to:

1. Koncepcja modelu, założenie głównych wymiarów geometrycznych.
2. Budowa modelu 3D w systemie CAD.
3. Przeniesienie modelu do systemu obliczeniowego, w tym przypadku ANSYS 12.1.
4. Wykonanie siatek obliczeniowych.
5. Zdefiniowanie połączeń ruchowych dla poszczególnych elementów mechanicznych, określenie zakresów zmian położenia, parametrów ruchu itp.
6. Zdefiniowanie parametrów materiałowych.
7. Zdefiniowanie rodzaju symulacji, podział na kroki czasowe, założenie parametrów pracy (ruchu) poszczególnych elementów mechanicznych w kolejnych krokach czasowych.
8. Zdefiniowanie interfejsów pomiędzy modelem (FSI) mechanicznym i modelem gazu roboczego, określenie wynikowych parametrów obliczeń modelu mechanicznego.
9. Wstępne obliczenia modelu mechanicznego
10. Zdefiniowanie domen gazu roboczego, warunków początkowych i brzegowych
11. Zdefiniowanie parametrów przekazywanych do modelu mechanicznego (FSI)
12. Ustawienie parametrów symulacji, kroków czasowych, granicznej liczby cykli iteracyjnych itp.
13. Uruchomienie symulacji.
14. Wizualizacja wyników, przygotowanie animacji, wykresów itp.

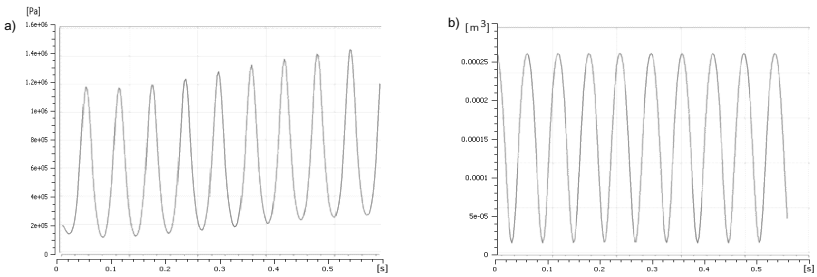


Rys. 7. Kolejne fazy ruchu silnika (a), na wykresach prędkość obrotowa (b), siły wzdłuż osi X i Y w główce korbowodu (c) oraz moment obrotowy na wale silnika przy hamowaniu do prędkości obrotowej 62,84 rad/s (d).

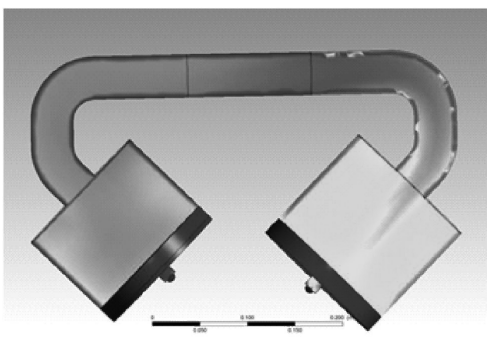
2.3. Wstępne wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano bogaty materiał badawczy dotyczący pracy silnika, zarówno od strony jego konstrukcji mechanicznej, jak również dotyczący parametrów eksploatacyjnych. Rys. 7 przedstawia kolejne fazy ruchu silnika wraz z przebiegiem momentu obrotowego oraz przebiegiem sił w główce korbowodu. Na rys. 8 pokazano przebieg zmian ciśnienia i objętości gazu roboczego. Wzrastające ciśnienie świadczy o braku stabilizacji temperaturowej, silnik jest w fazie nagrzewania. Szczególnie

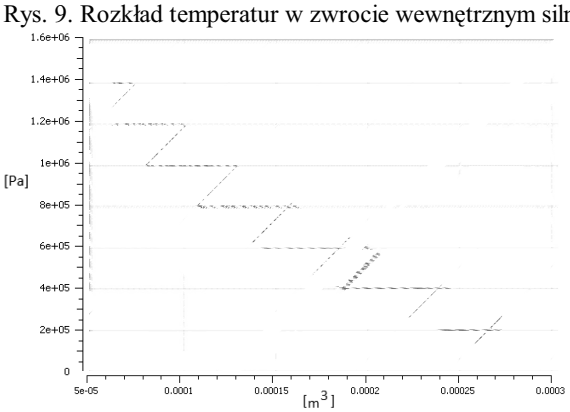
jest to widoczne na rys. 10, gdzie kolejne pętle zamkniętego wykresu indykatorowego przesuwają się w kierunku wyższych ciśnień. Rys. 9 przedstawia rozkład temperatur gazu roboczego w zwrocie wewnętrznym silnika. Widoczny jest strumień gazu o niższej temperaturze tłoczony od regeneratora, w środkowej części rurociągu łączącego cylindry silnika.



Rys. 8. Przebieg zmian ciśnienia (a) i objętości gazu roboczego (b) w kolejnych cyklach roboczych.



Rys. 9. Rozkład temperatur w zwrocie wewnętrznym silnika.



Rys. 10. Zamknięty wykres indykatorowy silnika.

3. PODSUMOWANIE

Wirtualne prototypowanie silników, w tym przypadku silnika Stirlinga, pozwala na uzyskanie bogatej wiedzy dotyczącej ich pracy już na etapie projektowania konstrukcji. Uzyskane wyniki umożliwiają korektę projektu jeszcze przed fazą badań stanowiskowych, co zdecydowanie skraca czas optymalizacji konstrukcji, a tym samym obniża jego koszty wytwórcze. W świetle poszukiwań nowych rozwiązań, a w szczególności dla tzw. małej energetyki i spalania biomasy, może się to okazać bardzo wydajną metodą badawczą, pozwalającą na szybkie zoptymalizowanie konstrukcji silnika i przystosowanie go do nowych źródeł zasilania.

Prototyp wirtualny silnika umożliwia uzyskanie charakterystyk typowych dla badań stanowiskowych, głównie wykresu indykatorowego, który w dalszej kolejności pozwala na uzyskanie charakterystyk mocy i momentu, bardzo istotnych z aplikacyjnego punktu widzenia.

Prototyp wirtualny silnika obejmuje go w sposób kompleksowy i pozwala na uzyskanie zarówno danych badawczych związanych z jego obiegiem cieplnym jak również parametrów dotyczących jego konstrukcji mechanicznej takich jak naprężenia, odkształcenia, obciążenia cieplne, przebiegi sił i momentów itd.

LITERATURA

1. www.ansys.com
2. www.ls-dyna.com
3. Żmudziński S.: Silniki Stirlinga. Warszawa: WNT, 1993.
4. en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine
5. www.cleanergyindustries.com
6. www.stirlingenergy.com
7. www.lanl.gov/thermoacoustics/Pubs/ICSV9.pdf
8. William B.: A compendium of solar dish/Stirling technology (www.scribd.com)
9. Allan J Organ: The air engine. Stirling cycle power for a sustainable future. Pub Woodhead Publishing Ltd 2007

VIRTUAL PROTOTYPE OF STIRLING ENGINE TYPE ALPHA

Summary. This work contains description of the construction of the Stirling engine type "alpha" virtual prototype. These engines are still subject of interest of the research community because of their traits allows the construction of a power systems powered by renewable energy sources. Virtual prototype of the engine allowed to obtain the engine characteristics such as the indicator diagram, torque diagram, etc.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy.