

## OBLICZENIA NUMERYCZNE I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI SILNIKA STIRLINGA TYPU ALFA

Maciej PŁOŃSKI<sup>1</sup>, Rafał GRZEJDA<sup>2</sup>

1. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
tel.: 91 449 42 57 e-mail: plonski.mac@gmail.com
2. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
tel.: 91 449 42 57 e-mail: rafal.grzejda@zut.edu.pl

**Streszczenie:** Przedstawiono model bryłowy i obliczenia silnika Stirlinga typu alfa. Scharakteryzowano podstawowe typy silników Stirlinga. Zaprezentowano model I rzędu (model Schmidta) obiegu termodynamicznego dla wybranego silnika, na podstawie którego dobrano warunki obciążenia dla zbudowanego modelu bryłowego tego silnika. Przeprowadzono statyczną analizę wytrzymałości mechanizmu roboczego silnika z korpusem dla trzech położeń wału korbowego z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Przedstawiono wybrane wyniki badań numerycznych modelu mechanizmu roboczego silnika z korpusem w postaci mapy naprężeń zredukowanych wywołanych zadaniem ciśnieniem czynnika roboczego. Na ich podstawie wykazano poprawność konstrukcji mechanizmu roboczego silnika i jego korpusu według przyjętego kryterium wytrzymałościowego.

**Słowa kluczowe:** kogeneracja, obieg termodynamiczny, silnik Stirlinga, mechanizm korbowy.

### 1. WPROWADZENIE

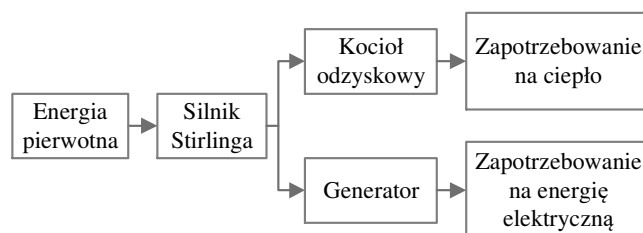
Rozwoju skojarzonej gospodarki energetycznej nie należy ograniczać wyłącznie do budowania układów kogeneracyjnych w instalacjach elektrociepłowniczych. Jednym z jego innych kierunków może być tworzenie małych układów kogeneracyjnych (w tym mikrokogeneracyjnych), do równoczesnego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej na potrzeby gospodarstw domowych czy małych przedsiębiorstw [1] lub trigeneracyjnych, do zintegrowanego wytwarzania ciepła, chłodu i energii elektrycznej w budynkach biurowo-usługowych czy magazynach [2].

Do technologii kogeneracyjnych umożliwiających osiągnięcie wysokiej sprawności, obok turbin gazowych i parowych, należą silniki Stirlinga [3]. Cechują się one wysoką wydajnością, zerową emisją związków toksycznych oraz cichą pracą [4]. Poza tym silniki Stirlinga mogą być zasilane energią cieplną pochodzącą z zewnętrznego procesu spalania dowolnego paliwa lub ze źródeł geotermalnych, jak też energią odpadową z innego urządzenia cieplnego lub energią słoneczną [5]. Wymienione zalety silników Stirlinga powodują, że w sposób szczególny nadają się one do wykorzystania w układach kogeneracyjnych w generacji rozproszonej [6]. Poglądowy schemat małego układu kogeneracyjnego z silnikiem Stirlinga pokazano na rysunku 1.

Zagadnieniem modelowania i badań doświadczalnych silników Stirlinga zajmowało się dotąd wielu badaczy. Ich

prace dotyczyły najczęściej trzech typowych wersji tych silników:

- alfa [7, 8],
- beta [9, 10],
- gamma [11, 12].



Rys. 1. Schemat działania małego układu kogeneracyjnego

Do literatury tematu należą również prace dotyczące silników Stirlinga dwustronnego działania [13, 14] oraz nowatorskich silników pracujących na zasadzie silnika Stirlinga, których przykładem jest silnik opisany w pracy [15].

Z przedstawionego wprowadzenia wynika, że działania podejmowane w celu wykorzystania silników Stirlinga w skojarzonej gospodarce energetycznej są ważne, potrzebne oraz wciąż kontynuowane. W działania te wpisuje się niniejsza praca, której tematem są obliczenia numeryczne wybranego silnika Stirlinga typu alfa. Analizę wytrzymałościową silnika zrealizowano przy użyciu metody elementów skończonych (MES).

### 2. CHARAKTERYSTYKA SILNIKÓW STIRLINGA

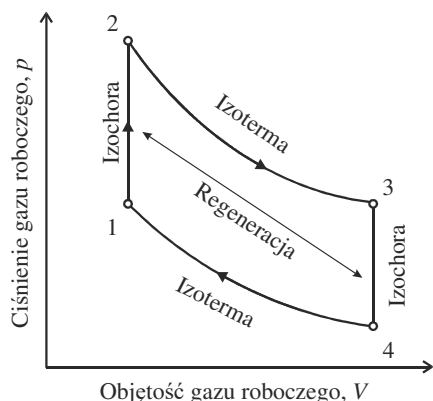
Silnik Stirlinga zbudowany jest z dwóch tłoków (lub tłoka i wypornika), regeneracyjnego wymiennika ciepła oraz wymienników ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym i zewnętrznymi źródłami. Czynnikiem roboczym w tym silniku może być: wodór, hel, powietrze lub azot [16].

Obieg teoretyczny silnika Stirlinga pokazano na rysunku 2. Wyróżnia się w nim cztery przemiany opisane charakterystykami znajdującymi się odpowiednio pomiędzy punktami: 1, 2, 3, 4 i tworzącymi układ zamknięty. Do przemian tych należą [17]:

- izotermiczne odwracalne sprężanie, podczas którego temperatura czynnika roboczego jest równa

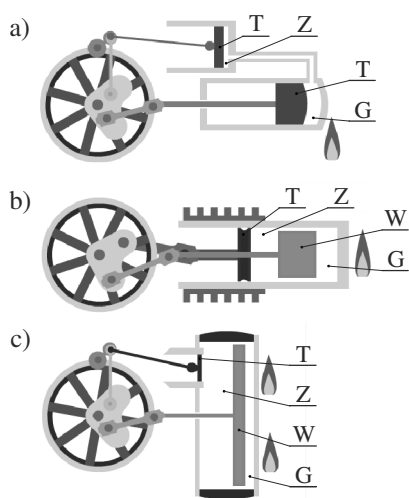
temperaturze dolnego źródła ciepła (chłodnicy) – krzywa (4-1),

- izochoryczne nieodwracalne ogrzewanie do temperatury górnego źródła ciepła (nagrzewnicy) – prosta (1-2),
- izotermiczne odwracalne rozprężanie, podczas którego temperatura czynnika roboczego jest równa temperaturze górnego źródła ciepła – krzywa (2-3),
- izochoryczne nieodwracalne ochładzanie czynnika roboczego do temperatury dolnego źródła ciepła (zamknięcie obiegu) – prosta (3-4).



Rys. 2. Teoretyczny obieg termodynamiczny silnika Stirlinga

Konstrukcyjne odmiany typowych wersji silnika Stirlinga jednostronnego działania (z pominięciem regeneratora) przedstawiono na rysunku 3. W silniku Stirlinga typu alfa czynnik roboczy przetłaczany jest cyklicznie za pomocą tłoków (T) z przestrzeni gorącej (G) do przestrzeni zimnej (Z) oraz w kierunku przeciwnym. W silniku typu beta tłok (T) oraz wypornik (W) znajdują się w jednym cylindrze. Za pomocą wypornika (W) objętość cylindra dzielona jest na przestrzeń gorącą (G) i zimną (Z). Podział taki występuje również w silniku typu gamma. W tym przypadku w układzie występuje jednak drugi cylinder, w którym przemieszczany jest tłok (T).



Rys. 3. Odmiany typowych konstrukcji silnika Stirlinga: a) alfa, b) beta, c) gamma (T – tłok, W – wypornik, G – przestrzeń gorąca, Z – przestrzeń zimna) [18]

Przemieszczenie czynnika roboczego pomiędzy przestrzeniami gorącą i zimną realizuje się przez zastosowanie w silniku pary tłoków poruszających się

cyklicznie, z zadaniem przesunięciem fazowym. Proces sprężania czynnika roboczego zachodzi wtedy, gdy cała masa czynnika znajduje się w przestrzeni zimnej. Proces rozprężania czynnika roboczego, natomiast, zachodzi gdy cała masa czynnika znajduje się w przestrzeni gorącej. Regenerację ciepła przemian izochorycznych zapewnia się przez zastosowanie materiału porowatego o dużej pojemności cieplnej (czyli regeneratora) w części silnika łączącej przestrzeń zimną z przestrzenią gorącą.

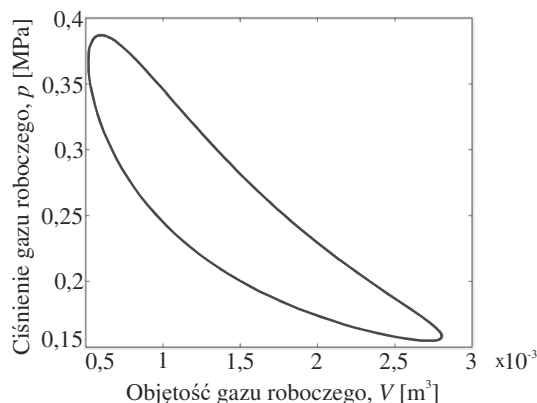
Najefektywniejszą metodą zwiększania mocy silnika Stirlinga jest budowanie silników podwójnego działania. Teoretycznie możliwa jest praca silników podwójnego działania do sześciu cylindrów w jednym układzie. Praktycznie jednak najbardziej optymalne jest rozwiązanie z czterema cylindrami. W takim układzie można zapewnić jednakowe przesunięcie fazowe ruchu tłoków oraz usytuowanie wszystkich czterech nagrzewnic na jednym poziomie w sposób umożliwiający wykorzystanie wspólnego źródła energii cieplnej o zwartej konstrukcji. Przykłady silników Stirlinga dwustronnego działania pokazano w pracy [19].

### 3. MODEL OBIĘGU TERMODYNAMICZNEGO

Znane są różne modele matematyczne obiegu termodynamicznego Stirlinga zbudowane przy odmiennych założeniach. Jednym z nich jest model I rzędu (model Schmidta). Szczegółowe założenia tego modelu oraz zależności go opisujące przedstawiono m.in. w publikacji [19]. Model I rzędu został wybrany do wykreślenia obiegu termodynamicznego silnika Stirlinga rozpatrywanego w niniejszej pracy.

Tablica 1. Zestawienie danych wejściowych do modelu silnika

Parametr	Wartość
Częstotliwość obrotowa	25 Hz
Średnica tłoka	150 mm
Skok tłoka	130 mm
Ciśnienie czynnika roboczego (helu)	0,2 MPa
Długość korbowodu	213 mm
Przesunięcie kątowe	90°
Objętość martwa	0,003 m <sup>3</sup>
Temperatura górnego źródła ciepła	773 K
Temperatura dolnego źródła ciepła	313 K

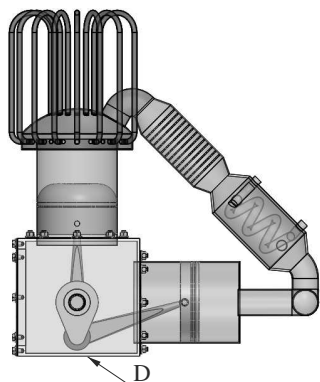


Rys. 4. Obieg termodynamiczny dla zaprojektowanego silnika Stirlinga

Dane wejściowe do modelu silnika zebrano w tabelicy 1, natomiast na rysunku 4 przedstawiono zależność ciśnienia ( $p$ ) od objętości ( $V$ ) uzyskaną dla modelu silnika na podstawie obliczeń z wykorzystaniem skryptu napisanego w programie MATLAB i załączonego do pracy [20].

#### 4. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI SILNIKA

Model bryłowy zaprojektowanego silnika Stirlinga pokazano na rysunku 5. Informacje o szczegółach konstrukcji silnika i jego dokumentację techniczną zawarto w pracy [20].



Rys. 5. Model bryłowy silnika Stirlinga typu alfa [20]

Utworzony model bryłowy silnika Stirlinga poddano analizie wytrzymałościowej z wykorzystaniem MES, przy użyciu programu SolidWorks. Badania ograniczono do analizy statycznej mechanizmu roboczego z korpusem dla następujących trzech położenia wału korbowego:

- położenia wału odpowiadającego górnej pozycji tłoka w zimnym cylindrze (przypadek A),
- odchylenia wału o kąt  $30^\circ$  od górnej pozycji tłoka (przypadek B),
- odchylenia wału o kąt  $90^\circ$  od górnej pozycji tłoka (przypadek C).

Badany układ utwierdzono na powierzchni D korpusu silnika (rys. 5) i obciążono w każdym położeniu korbowodu ciśnieniem o wartości  $p = 0,4$  MPa, przyjętej na podstawie wykreślonego powyżej obiegu termodynamicznego zaprojektowanego silnika (rys. 4). Ciśnienie przyłożono do tłoka znajdującego się w przestrzeni zimnej (w zimnym cylindrze).

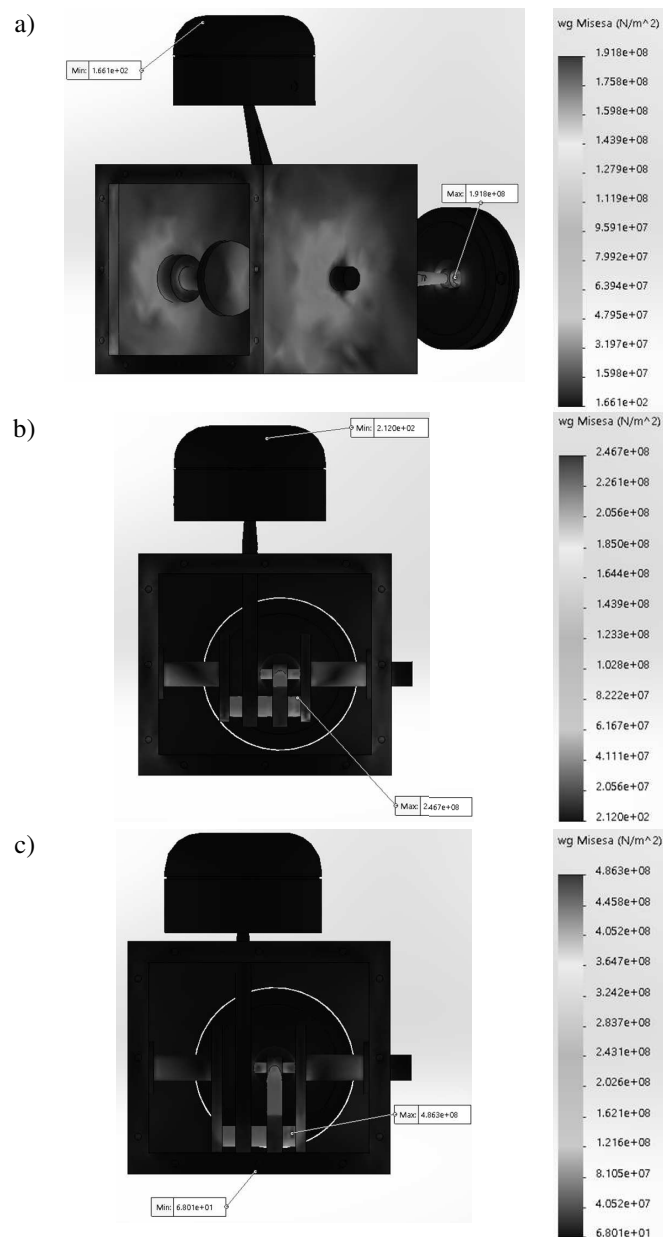
Model MES mechanizmu roboczego i korpusu silnika utworzono z elementów bryłowych wygenerowanych w sposób automatyczny, przy zadanych rozmiarach granicznych elementów skończonych. Najważniejsze szczegóły dotyczące siatki tego modelu podano w tabelicy 2.

Tabela 2. Zestawienie danych siatki modelu MES mechanizmu roboczego i korpusu silnika

Parametr	Wartość
Maksymalny rozmiar elementu	28,35 mm
Minimalny rozmiar elementu	5,67 mm
Całkowita liczba elementów	18722
Całkowita liczba węzłów	31888

Mapy naprężeń zredukowanych w modelu dla trzech położenia wału korbowego pokazano na rysunku 6.

Maksymalne naprężenia w modelu MES mechanizmu roboczego i korpusu nie przekroczyły granicy plastyczności materiałów przyjętych dla poszczególnych elementów silnika, wobec czego jego konstrukcję uznano za poprawną według kryterium wytrzymałościowego. Szczegółowe wyniki analizy wytrzymałościowej zestawiono w tabelicy 3.



Rys. 6. Mapy naprężeń zredukowanych dla modelu znajdującego się w położeniu: a) A, b) B, c) C [20]

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń modelu MES mechanizmu roboczego i korpusu silnika

Nazwa elementu	Materiał	Granica plastyczności [MPa]	Naprężenia maksymalne [MPa]
Wał korbowy	Stal stopowa	620	486
Korbowód			393
Sworzeń	Stal węglowa	220	192
Korpus			114
Wypornik	Stop 1060	27,5	0,003
Tłok			3,6

## 5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono obliczenia wybranego silnika Stirlinga typu alfa. Badania rozpoczęto od wykreślenia obiegu termodynamicznego dla przyjętych danych wejściowych do modelu silnika z czynnikiem roboczym w postaci helu. Wartości ciśnienia uzyskane z tego wykresu użyto w obliczeniach wytrzymałościowych modelu mechanizmu roboczego i korpusu silnika.

Jednym z wyników końcowych pracy jest model bryłowy silnika Stirlinga. Poprawność konstrukcji mechanizmu roboczego silnika i jego korpusu, według przyjętego kryterium wytrzymałościowego, wykazano na podstawie obliczeń i analiz z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Przedstawione obliczenia modelu silnika należy traktować jako badania wstępne. Zagadnienie może być kontynuowane w celu optymalizacji modelu bryłowego silnika, a także analizy jego wytrzymałości zmęczeniowej.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Janowski T., Nalewaj K., Holuk M.: Układ kogeneracyjny z silnikiem Stirlinga, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 2, 2014, s. 63-64.
2. Chmielewski A., Radkowski S., Szczerowski K.: Analiza rozplywu mocy w układzie kogeneracyjnym z silnikiem Stirlinga, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, Nr 2, 2014, s. 73-81.
3. Buriak J.: Mechanizmy wsparcia rozwoju wysoko-sprawnej kogeneracji i OZE oraz wykorzystania energii odpadowej w Polsce i UE, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Nr 29, 2011, s. 35-40.
4. Paul C. J., Engeda A.: Modeling a complete Stirling engine, *Energy*, Vol. 80, 2015, pp. 85-97.
5. Kropiwnicki J.: Konstrukcje i zastosowania współczesnych silników Stirlinga, *Combustion Engines*, Nr 3, 2013, s. 243-249.
6. Włas M.: Źródła generacji rozproszonej w systemie elektroenergetycznym, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Nr 27, 2010, s. 39-42.
7. Remiorz L., Chmielniak T.: Prototyp wirtualny silnika Stirlinga typu „alpha”. Wstępne wyniki badań, *Modelowanie Inżynierskie*, Z. 41, 2011, s. 347-352.
8. Bataineh K. M.: Numerical thermodynamic model of alpha-type Stirling engine, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 12, 2018, pp. 104-116.
9. Karabulut H., Yücesu H. S., Çınar C., Aksoy F.: An experimental study on the development of a  $\beta$ -type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 1, 2009, pp. 68-73.
10. Cheng C.-H., Yang H.-S., Keong L.: Theoretical and experimental study of a 300-W beta-type Stirling engine, *Energy*, Vol. 59, 2013, pp. 590-599.
11. Çınar C., Aksoy F., Erol D.: The effect of displacer material on the performance of a low temperature differential Stirling engine, *International Journal of Energy Research*, Vol. 36, No. 8, 2012, pp. 911-917.
12. Gheith R., Aloui F., Tazerout M., Nasrallah S. B.: Experimental investigations of a gamma Stirling engine, *International Journal of Energy Research*, Vol. 36, No. 12, 2012, pp. 1175-1182.
13. Formosa F., Badel A., Lottin J.: Equivalent electrical network model approach applied to a double acting low temperature differential Stirling engine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, 2014, pp. 753-764.
14. Fénies G., Formosa F., Ramousse J., Badel A.: Double acting Stirling engine: Modeling, experiments and optimization, *Applied Energy*, Vol. 159, 2015, pp. 350-361.
15. Jaśkiewicz M., Sadkowski W., Marciniowski M., Olejnik K., Stokłosa J.: Proposal of the new concept of the Stirling engine, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, Nr 35, 2013, s. 32-37.
16. Chmielewski A., Gumiński R., Radkowski S.: Wpływ własności gazów roboczych na sprawność i pracę teoretyczną obiegu Stirlinga, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, Nr 2, 2014, s. 53-62.
17. Lewandowski W. M., Klugmann-Radziemska E.: *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Kompendium, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2017.
18. [www.stirling.fc.pl](http://www.stirling.fc.pl), dostęp 2-10-2018 r.
19. Żmudzki S.: *Silniki Stirlinga*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
20. Płoński M.: Projekt i analiza wytrzymałości silnika Stirlinga typu „Alpha”, Praca magisterska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2018.

## NUMERICAL CALCULATIONS AND STRENGTH ANALYSIS OF THE STIRLING ENGINE OF ALPHA TYPE

The solid model and calculations of the Stirling engine of alpha type are presented. The basic types of single acting Stirling engines (called as: alpha, beta, gamma) are characterised. The first order model (Schmidt's model) of the thermodynamic cycle for the selected engine is shown. On its basis, the loading conditions for the constructed solid model of this engine are chosen. Static analysis of the strength of the working mechanism of the engine and its body is carried out for three positions of the crankshaft (for the upper position of the piston in the cold cylinder, aberration of the crankshaft by 30 degrees from the upper position of the piston and aberration of the crankshaft by 90 degrees from the upper position of the piston). The calculations are made using the finite element method (FEM). Selected results of simulation studies of the FEM-model of the working mechanism of the engine and its body in the form of reduced stress maps in the model under specified pressure of the working medium are presented. On their basis, the correctness of the structure of the modelled working mechanism of the engine and its body has been demonstrated according to the adopted strength criterion.

**Keywords:** cogeneration, thermodynamic cycle, Stirling engine, crank mechanism.