Wykorzystanie silnika Stirlinga w pojazdach samochodowych

Agnieszka Zdanowicz, Jerzy Chojnacki

Przedstawiono konstrukcje silnika Stirlinga i sposoby dotyczące wykorzystania ich w pojazdach samochodowych. Opisane zostały badania nad wykorzystaniem silnika Stirlinga do bezpośredniego napędu samochodów oraz jako jednostki napędowej w pojazdzie hybrydowym. Omówiono podstawowe zalety i wady wykorzystania silnika Stirlinga w pojazdach oraz jego możliwości do przetwarzania ciepła odpadowego pochodzącego z silników z wewnętrznym spalaniem na energię elektryczną.

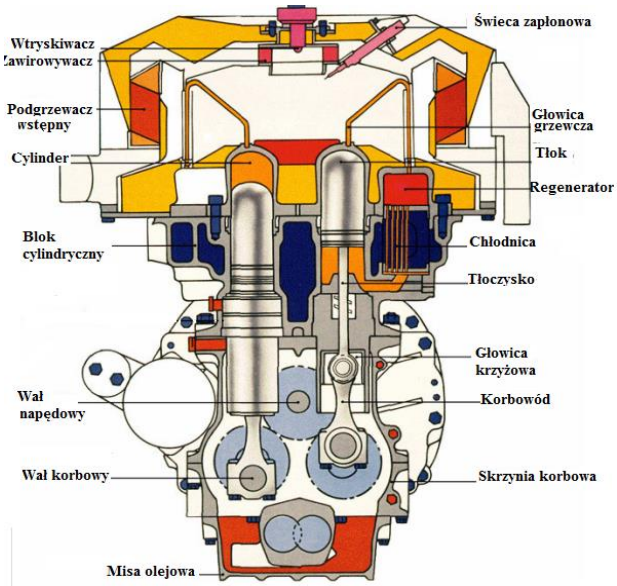
Słowa kluczowe: silnik Stirlinga, pojazdy samochodowe

Wstęp

Silnik Stirlinga jest to silnik cieplny, który przetwarza energię cieplną w energię mechaniczną, bez procesu wewnętrznego spalania paliwa [1]. W porównaniu z silnikami spalinowymi, silnik Stirlinga różni sie od nich budową i zasadą działania. Ponieważ nie korzysta ze spalania wybuchowego nie ma w nim podstawowego źródła hałasu, co powoduję, że jest niemal bezgłośny. Energia cieplna służąca do napędu silnika Stirlinga może pochodzić ze spalania dowolnego paliwa. Może również być zasilane energią odpadową. Prosta konstrukcja, brak układu rozrządu, brak kontaktu elementów ruchomych silnika ze spalinami, mniejsze różnice temperatur, wpływają na dużą trwałość silników Stirlinga [2]. Zaletami są: niski poziom emitowanego hałasu, oraz niski poziom emisji szkodliwych składników spalin [3]. Wadą silnika Stirlinga są: stosunkowo duże gabaryty w relacji do uzyskiwanej mocy, konieczność używania dużych powierzchni wymiany ciepła. Problem ten częściowo łagodzi zastosowanie wysokich ciśnień gazu roboczego.

1. Przegląd konstrukcji pojazdów z wykorzystaniem silnika Stirlinga jako głównej jednostki napędowej

W latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku rozpoczęto badania nad zastosowaniem niekonwencjonalnych silników do napędu pojazdów. Testowano również silniki Stirlinga, które montowano eksperymentalnie w produkowanych aktualnie modelach pojazdów. Na potrzeby pojazdów należało stworzyć silniki, które nadawały się do napędu pojazdów. Poza firmami produkujący samochody prace nad konstrukcjami użytecznymi silników, na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, podejmowały się również takie instytucje i firmy jak NASA z nadzieją wykorzystania tych silników w kosmosie i Philips, który zamierzał produkować te silniki do napędu łodzi podwodnych [3]. Jedną z prototypowych wersji silników wyprodukowana do napedu pojazdów przedstawia rysunek 1. Silnik ten charakteryzował się dwoma wałami korbowymi, tłoczyskami połączonymi przegubowo z korbowodami. Komora spalania zasilana była paliwem i tlenem.



Rys. 1. *Prototypowa wersja silnika Stirlinga V4-95S do napędu pojazdów [4]*

Badania nad zastosowaniem silników Stirlinga w pojazdach prowadzono w dwóch kierunkach, stosując je jako napęd bezpośredni i jako jednostkę napędową w wersjach hybrydowych.

2. Napęd bezpośredni pojazdów

Jednym z pierwszych samochodów, w którym zastosowano napęd silnikiem Stirlinga był wyprodukowany przez firmę General Motors model Colvar z roku 1964, który po zmodyfikowaniu przez wstawienie silnika Stirlinga otrzymał nazwę Calvair (rys. 2) [5]. Paliwem używanym jako medium w silniku Stirlinga był wodór. Podjęte badania nad silnikami Stirlinga były ukierunkowane nie tylko na produkcję silników samochodowych ale również silników do napędu okrętów podwodnych, gdyż ich ważną zaletą była miedzy innymi cicha praca i możliwość wykorzystania wodoru jako paliwa głównego.
Firma American Motors Corporation w produkowanym w latach 1979-1983 modelu samochodu osobowego Spirit GM zamontowała do celów doświadczalnych silnik Stirlinga (rys. 3 i 4). Samochód z jednostką napędową o mocy 53 kW, pod nazwą "P-40" (rys. 5) został przetestowany przejeżdżając trasę o długości 80467 km ze średnim zużyciem paliwa 8,0 l/100 km [6].

Badany był również pod kątem emisji spalin przy różnych paliwach: benzyna, olej napędowy i etanol.

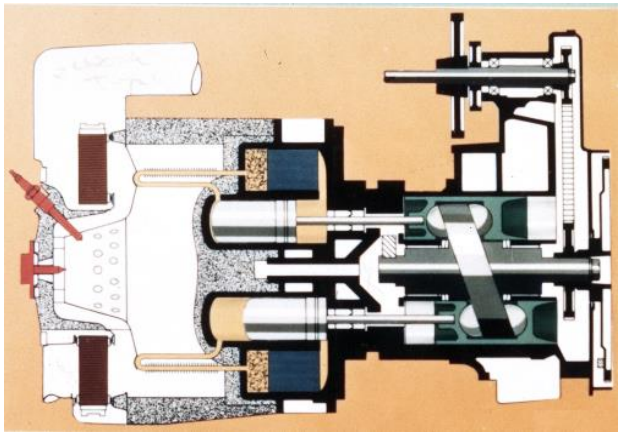
Rys. 2. *Model GM Calvair - samochód napędzany silnikiem Stirlinga [5]*

Rys. 3. *Produkowany w 1979 roku AMC Spirit [6]*

Rys. 4. *Widok silnika Stirlinga zamontowanego w modelu AMC Spirit [7]*

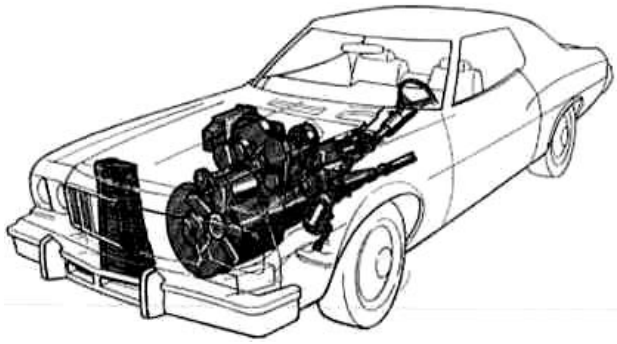
Badania wykazały podstawowe wady użycia tego typu silnika do bezpośredniego napędu takie jak długi czas potrzebny na rozgrzanie silnika przed rozpoczęciem jazdy oraz trudność w zmianie prędkości silnika (co ograniczało elastyczność podczas jazdy).

Silnik Stirlinga wymaga dobrego chłodzenia co objawiało się w pojazdach, w których był stosowany albo pokaźnych rozmiarów chłodnicą (Calvair) lub dmuchawą (AMC Spirit). W tym samym okresie również Ford podjął badania nad zastosowaniem silnika Stirlinga do samochodów osobowych. Do modelu Ford Torino opracowano model Philips A-215 (Rys. 5).



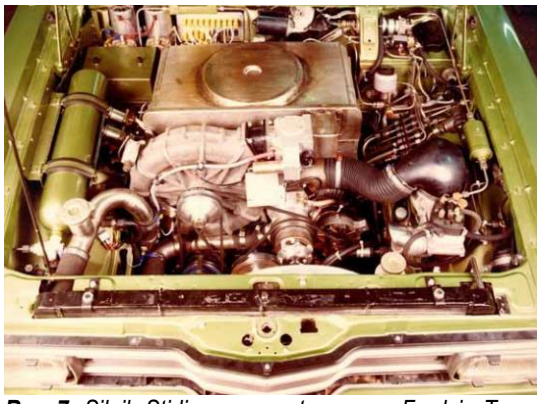
Rys. 5. *Schemat budowy silnika Stirlinga A-215. [8]*

Pojemność poszczególnych cylindrów w silniku A - 215 wynosiła 215 cm^3, waga 324 kg. Dedykowana prędkość obrotowa wynosiła 4500 obr/min. Charakteryzował sie oryginalnym przekazywaniem siły z tłoczysk na wał silnika za pomocą "mechanizmu talerzowego". Ford Torino z silnikiem Stirlinga przedstawiony jest na rysunku 6. Planowano uruchomienie seryjnej produkcji samochodu na koniec 1975 roku. Planowano że samochód ten napędzany będzie silnikiem Stirlinga w zakresie mocy od 60 do 73 kW (a więc do 100 KM).



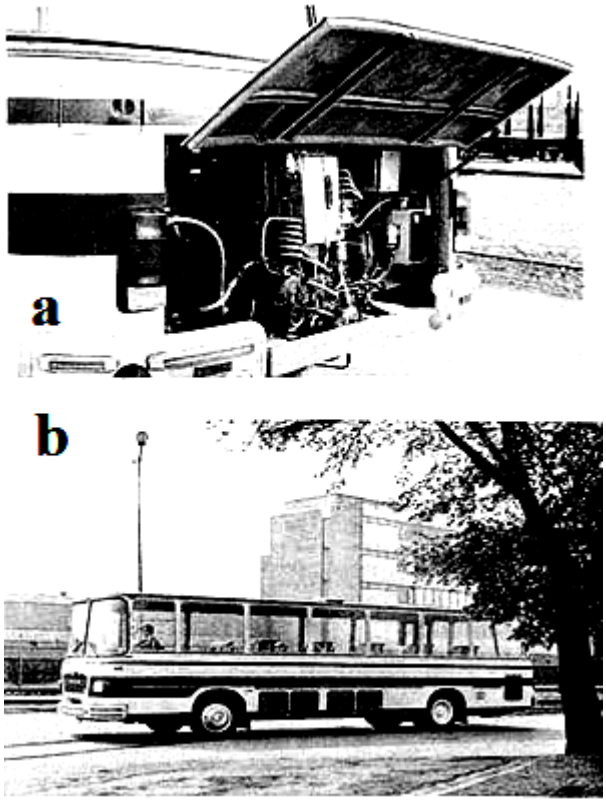
Rys. 6. *Schemat umieszczenia silnika Philips 4-215 w samochodzie Ford Torino (1973) [9]*

W 1976 roku w Szwecji również przeprowadzano badania nad zastosowanie jednej z wersji silnika Stirlinga w Fordzie Taunus kombi. Instalacja zamontowana w tym samochodzie przedstawiona jest na rysunku 7. Widoczne są tam butle z wodorem stosowanym jako medium do silnika Stirlinga.. Głównym paliwem, którym zamierzano napędzać pojazd była benzyna. W testach wytrzymałościowych samochód przejechał 10 000 km bez poważnej awarii, co dowodzi, że konstrukcja była solidna. Silnik z zamontowanego samochodu znajduje się obecnie w posiadaniu Muzeum Malmö [9]



Rys. 7. *Silnik Stirlinga zamontowany w Fordzie Taunus (1976) [9]*

Firma DAF postanowiła wykorzystać silnik A - 235 w jednym ze swoich modeli autobusów. Autobus przedstawiony został na rysunku 8.

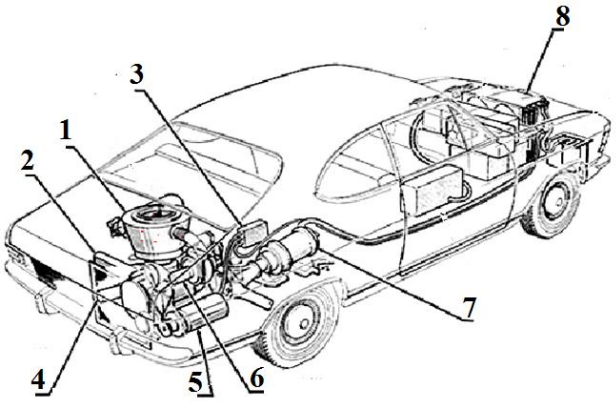


Rys. 8. *Autobus DAF z silnikiem Stirlinga - Philips Typ 4-235 [10]*

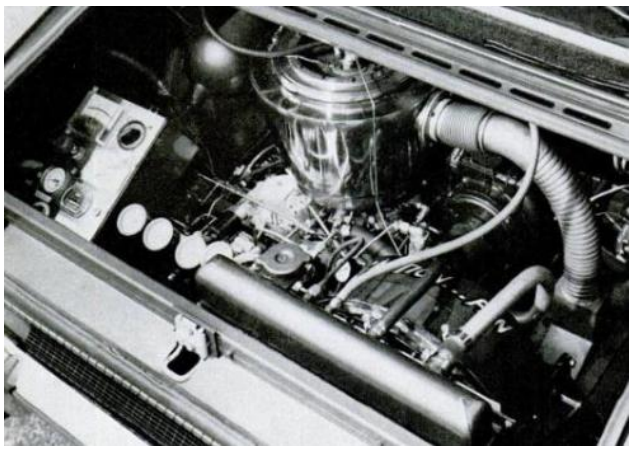
Silnik został zainstalowany z tyłu, w tym samym miejscu, w którym znajdował sie konwencjonalny silnik wysokoprężny i został dopasowany do automatycznej skrzyni biegów typu Split. System chłodzenia został zainstalowany w podłogowych lukach bagażowych. Kraty dla tego dużego systemu chłodzenia można zobaczyć na rys.8 b. Nawet z tym konieczne było zwiększenie temperatury wody chłodzącej, a tym samym zmniejszyć moc silnika w autobusie od 75 kW (100 KM) do 65 kW (KM) SO [11]. Chłodzenie uzyskano poprzez hydraulicznie napędzanego wentylatora chłodnicy. Niestety nie zostały opublikowane dane o wykonaniu tego w autobusie, ale nie ma wątpliwości, zarówno pod kątem instalacji jest to cenne doświadczenie operacyjne [11]. Niestety, mimo dużych nakładów finansowych na badanie nad zastosowaniem silnika Stirlinga jego wady jako bezpośredniej jednostki napędowej pojazdów takie jak zbyt długi czas reakcji silnika na przyspieszenie, trudności w jego rozruchu, przesądziły o zaniechaniu dalszych prac.

3. Napęd hybrydowy pojazdów

Wady silnika Stirlinga, które uniemożliwiały mu zastosowanie jako bezpośredniej jednostki napędowej nie stanowiły aż tak dużego problemu w przypadku wykorzystania go do instalacji pojazdów hybrydowych. Najbardziej znanymi przykładam jest wersja hybrydowa Opla Kadetta wyprodukowana przez General Motors (rys. 9).



Rys. 9 *Widok układu napędowego z silnikiem Stirlinga wersji hybrydowej Opla Kadetta: 1 - silnik Stirlinga, 2 - chłodnica,3- moduł sterowania ładowaniem akumulatorów, 4 - rozrusznik, 5 - alternator, 6 - dmuchawa układu spalania, 7 - silnik elektryczny, 8 - zespół akumulatorów wraz z falownikiem [12]*



Rys. 10. Widok na układ napędowy z silnikiem Stirlinga - Opel Kadett [13]

Samochód ten z 1968 roku był jedną z pierwszych hybryd. Zamontowany w nim silnik napędzał alternator, a ten ładował akumulatory. Energia z akumulatorów zasiłała silnik elektryczny, który napedzał tylne koła. Samochód mógł poruszać sie z prędkości do 100 km/h. Istotna zaletą konstrukcji tego pojazdu

była jego możliwość pracy na szerokiej gamie paliw. Prędkość obrotów silnika elektrycznego regulowano za pomocą falownika. Wykorzystanie silnika Stirlinga w układzie napędowym samochodu hybrydowego okazało sie rozwiązaniem nieudanym. Wadami były zbyt duża waga silnika w stosunku do uzyskiwanej mocy i mała elastyczność silnika.

4. Współczesne rozwiązania wykorzystujące silnik Stirlinga w pojazdach.

Mimo dotychczasowych niepowodzeń z zastosowaniem silnika Stirlinga do napedu pojazdów silnik ten nadal znajduje swoich zwolenników. Są to albo ludzie młodzi, którzy konstrują oryginalne pojazdy. Zespół młodych ludzi z Uniwersytetu Rolniczego w Offenburgu w Niemczech zaprojektował pojazd w ramach konkursu na pojazdy ekologiczne wykorzystując do jego napędu silnik Stirlinga. Do jego napędu użyto etanolu. Niestety pojazd zespołu nie zdał testów kwalifikacyjnych na konkurs, który zakończył się w Rotterdamie. Samochód był zbyt ciężki i zbyt wysoki, ze względu na system zwojów na dachu.

Rys. 11. *Zespół młodych konstruktorów Z Uniwersytetu Rolniczego w Offenburgu ze swoim pojazdem [14]*

Największe nadzieje na wykorzystanie silnika Stirlinga w pojazdach rokują próby wykorzystania go do wytwarzania energii elektrycznej z ciepła odpadowego. Silniki Stirlinga połączonego bezpośrednio z prądnicą te można wykorzystać w układach kogeneracyjnych do zamiany energii cielnej z gazów wychodzących przez rury wydechowe pojazdów. Prowadzone są już takie badania [4, 15]

Wnioski

Dokonana analiza możliwości zastosowania Silnika Stirlinga do napędu pojazdów wykazała dość dużo jego wad. Jego podstawową zaletą jaką jest możliwość uzyskania czystych spalin ze względu na możliwość użycia różnych paliw przegrywa z silnikiem o wewnętrznym spalaniu z zastosowaną sondą lambda i mikroprocesorem sterującym dawka paliwa. Być może w przyszłości zastosowanie nowych materiałów do jego produkcji oraz wzrost cen paliw kopalnych uczyni go na tyle atrakcyjnym, że znajdzie swoje miejsce jako silnik napędzający pojazdy.

Bibliografia

1. Bernd Th.: Benchmark testing of Micro-CHP units. Applied Thermal Engineering 28, 2008, s.. 2049–2054.
2. Cieśliński J., Kropiwnicki J., Kneba Z., Woronkin S., Witanowski Ł., Zalewski K.: Investigation of a Stirling engine as a microCHP system. 3rd International Conference, Low Temperature and Waste Heat Use in Energy Supply Systems theory and Practice, Bremen, 25-26 October 2012.
3. Kropiwnicki, J. Design and applications of modern Stirling engines. Combustion Engines. 2013, 154(3), 243-249. ISSN 0138-0346
4. http://www.heat2power.net/en__benchmark.php
5. http://www.corvairforum.com/forum/viewtopic.php?t=8659
6. https://en.wikipedia.org/]
7. http://www.moteurstirling.com/applications-motorisation.php
8. https://archive.org/details/C-1978-4997
9. https://www.civilengineeringhandbook.tk/stirling-engines/dli-witf121.html#download
10. https://www.civilengineeringhandbook.tk/stirling-engines/15-united-stirling-engines.html
11. Hallare B. and Rosenqvist K. (1977) The development of 40-150 kW Stirling engines in Sweden and their application in mining equipment, total energy systems and road vehicles. Proc. 4th Int. Symp. Auto. Prop. Syst., vol.3, sess. 8/9, Washington D.C., March/April, s.1-19
12. http://econogics.com/ev/stirlec1.jpg
13. *http://www.stirlingengineforum.com/viewtopic.php?t=1618*
14. *http://energyblog.nationalgeographic.com/2012/05/23/stirling-engine-external-combustion-efficiency/*
15. Chmielewski A., Lubikowski K., Radkowski S. Sposoby zwiększania sprawności silnika spalinowego z zastosowaniem układów kogeneracyjnych. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 2(98)/2014.

Autorzy:
mgr Agnieszka Zdanowicz- Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Racławicka 15, 75-001 Koszalin, e-mail:agnieszka.zdanowicz1990@wp.pl
Prof. nadzw. dr hab. inż. Jerzy Chojnacki- Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Racławicka 15, 75-001 Koszalin, e-mail:jerzy.chojnacki@tu.koszalin.pl

Using Stirling engine in a car vehicles

In the paper the Stirling engine constructions and methods for use them in car vehicles are presented. There were described research on the use of the Stirling engine for direct drive of cars and the hybrid drive. The main advantages and disadvantages of the Stirling engine use in vehicles and their ability to convert waste heat from internal combustion engines into electricity are discussed.

Key words: Stirling engine, motor vehicles