

## Phenomenological model of a Wankel engine

*Abstract: This paper presents the model of a Wankel engine developed with the AVL BOOST software. The programme AVL BOOST is a multilevel system that enables real-time processing and is dedicated to simulate variable engine operating conditions. The standard modules available in the system were used during the research. The test object was a normally aspirated, 4-stroke XR50 Wankel engine. The torque-speed characteristics was determined. The calibration of the model was carried out by comparing the calculated torque with the experimental external characteristics of the engine. The error value for the calculated torque for most research points did not exceed 6 %. Satisfactory compliance was not achieved only at the highest speed. Such a model of a Wankel engine will be later used to build a model of this engine powered by hydrogen injection.*

Key words: a Wankel engine, a phenomenological model, simulation tests

## Fenomenologiczny model silnika Wankla

*Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono model silnika Wankla opracowany w programie AVL BOOST. Oprogramowanie AVL BOOST jest wielopoziomowym systemem umożliwiającym pracę w czasie rzeczywistym i dedykowane jest do symulacji zmiennych warunków pracy silnika. W czasie realizacji pracy zastosowano standardowe moduły dostępne w systemie. Obiektem badań był wolnossący, 4-suwowy silnik Wankla o oznaczeniu XR50. Wyznaczono charakterystykę momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej. Kalibrację modelu przeprowadzono poprzez porównanie obliczonego momentu obrotowego z otrzymaną doświadczalnie zewnętrzną charakterystyką silnika. Wartość błędu obliczonego momentu obrotowego w większości punktów badawczych nie przekraczała 6%. Jedyne w warunkach największej prędkości obrotowej nie uzyskano zadawalającej zgodności. Opracowany model silnika Wankla posłuży do budowy modelu tego silnika zasilanego wtryskiem wodoru.*

Słowa kluczowe: silnik Wankla, model fenomenologiczny, badania symulacyjne

### 1. Wprowadzenie

Modelowanie fizyczne jest szeroko opisywane w silnikowej literaturze naukowej [1, 6, 9]. Zaletą przy zastosowaniu modeli zerowymiarowych jest krótki czas obliczeń w porównaniu z modelami trójwymiarowymi. Metoda ta oparta jest o zasadę zachowania masy i zasadę zachowania energii w całym modelowanym elemencie (np. przewodzie dolotowym lub cylindrze).

Odwzorowanie modelowe procesów zachodzących w silniku spalinywym umożliwia m.in. analizę dynamiki układu korbowego lub wyznaczenie parametrów czynnika w cylindrze dla zdefiniowanych warunków pracy [4, 7, 8]. W pracy [2] przedstawiono model silnika opracowany w środowisku Modelica. Określono szczegółowo strukturę wymieniając wszystkie zjawiska, których odwzorowanie matematyczne niezbędne jest do prawidłowego opracowania modelu silnika. Według autorów modelowanie jest niezbędne podczas prac projektowych zarówno samego silnika jak i układów zasilania.

Jeden z przykładów zastosowania oprogramowania symulacyjnego do prac rozwojowych przed-

stawiono w artykule [10]. Autorzy opracowali model jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym. Otrzymane wyniki umożliwiły wstępną analizę osiągnięć silnika.

W literaturze naukowej występuje niewiele prac opisujących modelowanie procesu roboczego silnika Wankla. O popularności tego typu silnika świadczą również prace rozwojowe prowadzone przez takie firmy jak AVL czy FEV [3,11]. Firmy niezależnie od siebie opracowały generator ładujący akumulatory napędzany silnikiem Wankla. Autor rozprawy doktorskiej [5] na podstawie wykonanych badań określił silnik Wankla jako konstrukcję bardzo przydatną do zasilania paliwami gazowymi.

W niniejszym artykule przedstawiono model zerowymiarowego tego typu silnika w programie AVL BOOST. Ze względu na brak w bibliotekach programu modelu przestrzeni roboczej silnika Wankla modelowanie wykonano za pomocą dostępnych komponentów. Analiza pracy silnika umożliwiła odwzorowanie jego procesu roboczego za pomocą klasycznego układu tłokowego.

## 2. Program AVL BOOST

AVL BOOST jest wielomodulowym systemem z możliwością pracy w czasie rzeczywistym. Dedykowany jest do symulacji zmiennych warunków pracy silnika. Oprogramowanie jest pakietem służącym do symulacji pracy silnika w dziedzinie czasu, wykorzystującym chwilowe i stałe zero-wymiarowe oraz quasi-wymiarowe komponenty modelu.

BOOST zawiera dedykowane, podstawowe komponenty silnikowe zapewniające możliwie elastyczność w modelowaniu silników. Komponenty te podzielone są na pięć głównych grup:

- właściwości gazu i cieczy, kolektor dolotowy, filtr powietrza, cylinder, sprężarka, zbiornik paliwa, film paliwowy, turbina,
- otoczenie termiczne: wymiana ciepła z otoczeniem,
- otoczenie mechaniczne: bezwładność układu napędowego, opory ruchu pojazdu,
- otoczenie sterujące: charakterystyki/mapy wtrysku, regulator PID,
- interfejsy: C-Interfejs, Matlab DLL, Matlab API.

Każdy z komponentów zawiera dedykowane modele obliczeniowe. Komponenty opisujące strumień gazu, otoczenie termiczne oraz mechaniczne zawierają modele pozwalające na wykonanie symulacji:

- przepływu z uwzględnieniem właściwości gazu i odpowiednich równań równowagi,
- wymiany ciepła w komorze spalania oraz przewodach,
- procesu spalania,
- wtrysku paliwa,
- oporów tarcia w silniku,
- zjawiska filmu paliwowego,
- map wtrysku oraz charakterystyk wzniosów zaworów,
- turbin o zmiennej geometrii,
- kompresora mechanicznego,
- przepływu przez filtr powietrza,
- wymienników ciepła.

Interfejs programu AVL BOOST pozwala natomiast na uruchomienie modelu w połączeniu z pozostałymi narzędziami systemu np. AVL FIRE, AVL CRUISE.

## 3. Obiekt badań

Obiektem badań modelowych jest wolnossący, 4-suwowy silnik Wankla o oznaczeniu XR50 produkowany przez firmę Aixro GmbH. Parametry silnika przedstawia tabela 1.

Silnik bazuje na patencie Feliksa Wankla. Główne elementy silnika to:

- stalowy rotor z uszczelnieniami (analogiczne do tłoka z pierścieniami w silniku tłokowym),
- stalowy wał mimośrodowy,
- aluminiowy korpus pokryty niklem na powierzchni wewnętrznej, o kształcie epitrochoidy,
- aluminiowe pokrywy boczne.

Tab. 1. Specyfikacja silnika XR50  
Tab. 1. XR50 engine specification

Moc	33 kW przy 8750 obr/min
Moment	39 Nm przy 7500 obr/min
Masa	17 kg
Pojemność	294 cm <sup>3</sup>
Maks. pręđ. obr.	10400 obr/min
Układ zapłonowy	Magnetoindukcyjny
Sprzęgło	odśrodkowe, suche,
Przeniesienie napędu	Łańcuch typ 428
Świeca zapłonowa	Denso U22ETR
Rozrusznik	12 V/ 0,4 kW



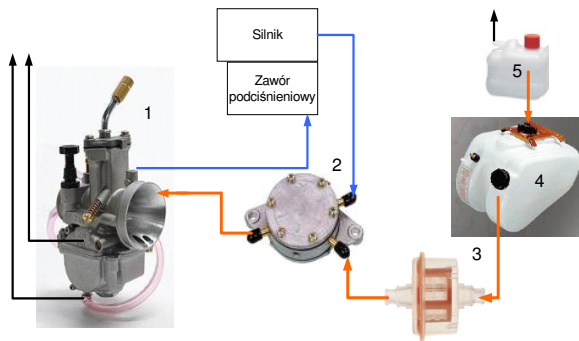
Rys. 1. Obiekt badań  
Fig. 1. Research object

Krawędzie rotora stykają się stale z epitrochoidą poprzez uszczelnienia wierzchołkowe. Tworzą się w ten sposób trzy oddzielne komory spalania, z każdej powierzchni rotora. Pozwala to realizować jednocześnie trzy cykle pracy. Rotor obraca się trzy razy wolniej niż mimośrodowy wał, a więc podczas każdego obrotu wału następuje zapłon w jednej komorze spalania.

Silnik XR50 jest smarowany systemem mieszankowym. Mieszanka paliwowo-powietrzna przepływa do komory spalania przez wnętrze rotora chłodząc i smarując łożyska wału mimośrodowego. Powyżej prędkości obrotowej równej 5500 obr/min otwiera się przepustnica umieszczona w drugim kanale przewodu dolotowego. Dodatkowy przepływ mieszanki paliwowo-powietrznej sterowany jest zaworem podciśnieniowym połączonym z króćcem w gaźniku (linia niebieska rys. 2). Mie-

szanina paliwowo-powietrzna, która nie odbiera ciepła od łożysk i rotora dostarczana jest bezpośrednio do komory spalania. Powoduje to zwiększenie sprawności napełniania silnika.

Rysunek 2 przedstawia układ paliwowy silnika XR50. Kolorem szarym oznaczono tor paliwowy. Paliwo ze zbiornika zasysane jest poprzez filtr przez membranową pompę paliwa do gaźnika YSN PWK30. Kolorem czarnym oznaczono przewody odpowietrzające.



Rys. 2. Schemat układu paliwowego silnika Aixro XR50, 1-gaźnik, 2-pompa paliwowa, 3- filtr paliwa, 4-zbiornik paliwa, 5-zbiornik przelewowo-paliwowy

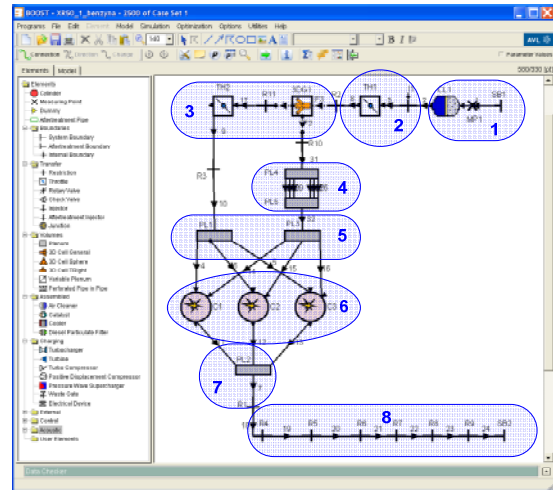
Fig. 2. Scheme of fuel system of the Aixro XR50 engine, 1-carburator, 2-fuel pump, 3- fuel filter, 4-fuel tank, 5-overflow tank

#### 4. Model silnik XR50

Model silnika XR50 wykonano za pomocą narzędzia do symulacji pracy silników spalinowych jakim jest program BOOST firmy AVL. Opracowano modele elementów silnika przedstawione na rysunku 3.

Uproszczenia modelu dotyczące przepływu czynnika przez układ dolotowy i wylotowy obejmowały głównie zastąpienie przewodów o skomplikowanym kształcie przewodami o przekroju okrągłym. Tam gdzie było to konieczne zastosowano przewody o zmiennej średnicy (stożkowe) oraz przewody o osi krzywoliniowej (łuki o określonym promieniu). Gaźnik silnika Wankla został zamodelowany za pomocą przewodu, do którego podłączono wtryskiwacz podający paliwo w sposób ciągły. Wydatek wtryskiwacza uzależniony jest od wartości masowego natężenia przepływu i jest dobierany automatycznie w celu utrzymania stechiometrycznego składu mieszanki.

Model silnika został zbudowany w przy użyciu standardowych elementów dostępnych w oprogramowaniu (rysunek 3, lewa część okna programu). Z tego względu konieczne było dokonanie uproszczeń konstrukcji elementów składowych. Przedstawiono to w tabeli 2.



Rys. 3. Widok modelu silnika w oknie programu AVL BOOST. 1-wlot powietrza wraz z filtrem, 2-gaźnik, 3-przewód rozdzielający mieszankę paliwowo-powietrzną, 4-rotor, 5-kanady dolotowe w korpusie silnika, 6-przestrzeń robocza silnika, 7-kanady wylotowe w korpusie silnika, 8-układ wylotowy

Fig. 3. Engine model in AVL BOOST software, 1-air inlet, 2-carburator, 3- air-fuel mixture line separation, 4-rotor, 5-inlet pipes in engine body, 6-engien workspace, 7-outlet pipes in engine body, 7-exhaust system

Tab. 2. Elementy wykorzystane przy budowie modelu  
Tab. 2. Model components

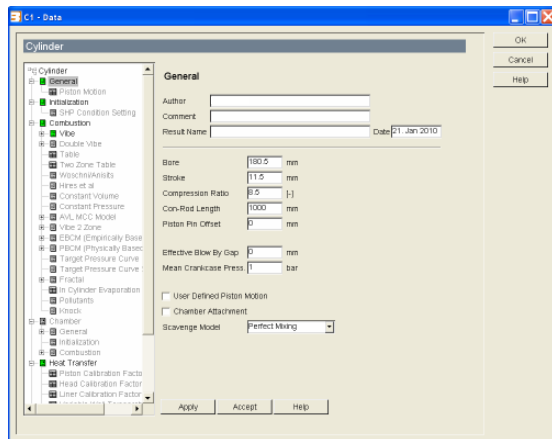
Nazwa	Funkcja	Oznaczenie	Ilość
System Boundary	Warunki brzegowe	SB	2
Restriction	Połączenie przewodów	R	14
Injector	Wtryskiwacz	I	1
Measuring Point	Punkt pomiarowy	MP	3
Air Cleaner	Filtr powietrza	AC	1
Cylinder	Cylinder	C	3
Plenum	Objętość	P	4
Connection	Przewód	-	29

Największe uproszczenie zastosowane w modelu dotyczy przestrzeni roboczej silnika. W silniku Wankla zmiana objętości dokonywana jest na skutek ruchu rotora w specjalnie ukształtowanej przestrzeni o kształcie epitrochoidy. W programie BOOST przestrzeń roboczą zamodelowano przy użyciu trzech elementów typu *Cylinder*. Takie uproszczenie jest konieczne ze względu na to, że program BOOST nie posiada specjalnego elementu do modelowania silnika Wankla. Założono, że kształt komory spalania nie ma znaczenia ponieważ wykonany model jest modelem zero-wymiarowym. Dla-

tego model silnika Wankla można zastąpić modelem trzycylindrowego silnika tłokowego.

Kolejne uproszczenie dotyczy połączenia przestrzeni roboczych (C1, C2, C3) z kanałami dolotowymi (12, 29) i kanałem wylotowym (8). Ładunek dopływa do cylindrów silnika trzycylindrowego przez kanały w głowicy silnika (indywidualne kanały dla każdego cylindra), natomiast przestrzenie robocze w rotorze silnika Wankla korzystają ze wspólnych kanałów wykonanych w korpusie silnika. Z tego względu konieczne było zastosowanie w modelu elementów typu *Plenum* o niewielkiej objętości ( $0,005 \text{ dm}^3$ ) oraz połączenia ich z przestrzeniami roboczymi przewodami o długości (3 mm). Dzięki temu uproszczeniu zapewniono ciągły przepływ czynnika przez główny kanał dolotowy i kanał wylotowy.

Cykl pracy silnika Wankla nie różni się od cyklu pracy silnika czterosurowego. Składa się on z tych samych faz (napełnianie, sprężanie, rozprężanie, wylot). Objętość przestrzeni roboczej zmienia się sinusoidalnie. Aby to zapewnić, w modelu założono długość korbowa równą 1000 mm. Konieczne było też założenie średnicy cylindra równej 180,5 mm. Wartość ta w połączeniu z promieniem wykorbienia 11,5 mm (wartość mimośrodowości wału) zapewnia odpowiedni przebieg zmian przestrzeni roboczej silnika ( $0,294 \text{ dm}^3$ ). Widok okna głównych parametrów modelu cylindra przedstawia rysunek 4, natomiast ich wartości tabela 3.



Rys. 4. Widok okna modelu cylindra  
Rys.4. Cylinder model

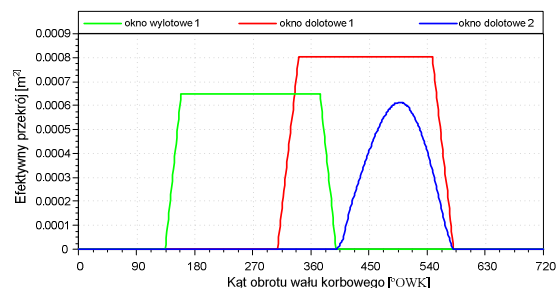
Tab. 3. Wartości głównych parametrów modelu cylindra

Tab .3. The values of cylinder model mean parameters

Parametr	Wartość	Jednostka
Średnica cylindra	180,5	mm
Skok tłoka	11,5	mm
Stopień sprężania	8,5	-
Długość korbowa	1000	mm
Model przepływania	Perfect Mixing	-

Pełny cykl pracy silnika Wankla realizowany jest podczas jednego obrotu rotora. Rotor obraca się z prędkością trzy razy mniejszą niż prędkość obrotowa wału korbowego. Wynika z tego, że podczas cyklu pracy następują trzy obroty wału korbowego ( $1080^\circ$  OWK), a nie dwa ( $720^\circ$  OWK) jak w przypadku tłokowych silników czterosurowych. Z tego względu dane wprowadzane do modelu (np. fazy rozrządu) należy odpowiednio przeskalować. Także wyniki obliczeń powinny zostać przeskalowane. Przykładowo, aby zapewnić warunki pracy silnika przy prędkości obrotowej 9000 obr/min należy przeprowadzić symulację dla prędkości 6000 obr/min. Przeliczeniu powinny podlegać także wartości wielkości zależnych od prędkości obrotowej takich jak moc efektywna silnika.

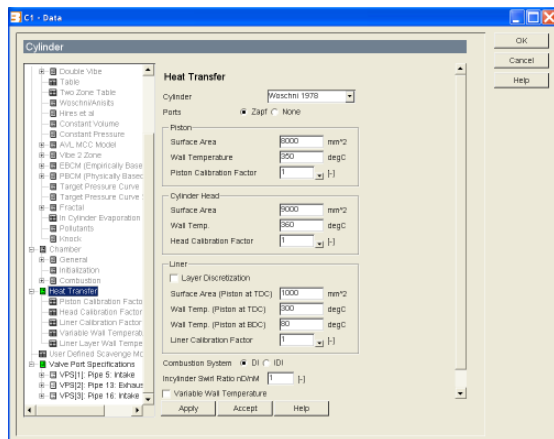
Wymiana ładunku w silniku Wankla odbywa się dzięki odślanianiu i zasłanianiu kanałów za pomocą krawędzi rotora. Aby zamodelować zmianę przekroju okien dolotowych i okna wylotowego, wykorzystano funkcję sterowania wymianą ładunku za pomocą krawędzi tłoka. W tym celu wprowadzono charakterystykę przekroju okien w funkcji kąta obrotu wału korbowego badanego silnika (rysunek 5).



Rys. 5. Charakterystyka przekroju okien w funkcji kąta obrotu wału korbowego  
Fig. 5. Engine timing as a function of crank angle

Kolejnym krokiem budowy modelu było zdefiniowanie ustawień procesu wymiany ciepła czynnika roboczego z elementami przestrzeni roboczej silnika. Widok okna wymiany ciepła modelu cylin-

dra przedstawia rysunek 6, natomiast wartości parametrów tabela 4.



Rys. 6. Widok okna wymiany ciepła modelu cylindra

Fig. 6. View of cylinder heat exchange model

Tab. 4. Wartości parametrów wymiany ciepła modelu cylindra

Tab. 4. The values of the parameters of heat exchange cylinder model

Nazwa	Funkcja	Oznaczenie	Ilość
System Boundary	Warunki brzegowe	SB	2
Restriction	Połączenie przewodów	R	11
Injector	Wtryskiwacz	I	1
Measuring Point	Punkt pomiarowy	MP	3
Air Cleaner	Filtr powietrza	AC	1
Cylinder	Cylinder	C	3
Plenum	Objętość	P	5
3D Cell General	Rozgałęzienie	3DG	1
Throttle	Przepustnica	TH	2
Connection	Przewód	-	35

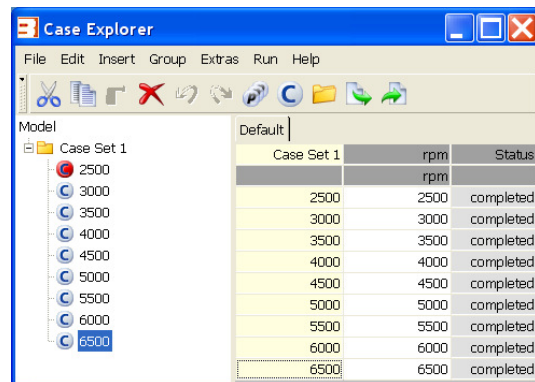
Ostatnim krokiem było zdefiniowanie oporów tarcia silnika. W programie BOOST są one określane przez wartość średniego ciśnienia tarcia. Założono, że jego wartość dla ciśnienia efektywnego równego 1 MPa oraz dla prędkości obrotowej 2000 obr/min wynosi 0,21 MPa natomiast przy prędkości 7000 obr/min wynosi 0,24 MPa.

## 5. Kalibracja modelu

Kalibrację modelu przeprowadzono poprzez porównanie obliczonego momentu obrotowego z zewnętrzną charakterystyką silnika otrzymaną doświadczalnie. W tym celu ustawiono główne

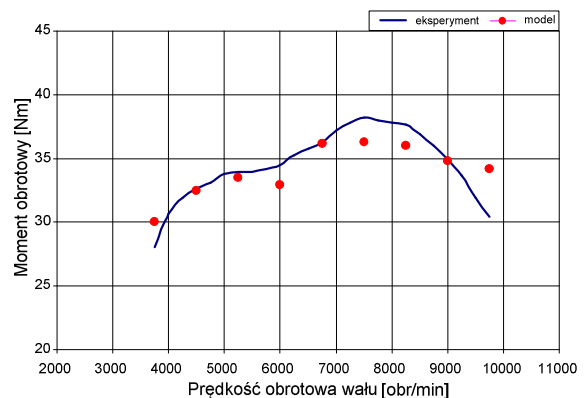
parametry symulacji w oknie Simulation Control. Założono, że mieszanka palna wytwarzana w przewodzie dolotowym ma skład stechiometryczny. Zdefiniowano także rodzaj paliwa (benzyna). Obliczenia wykonano dla dziewięciu wartości prędkości obrotowej (rys. 7, funkcja Case Explorer). W celu ustalenia się wartości ciśnienia efektywnego, założono czas symulacji obejmujący piętnaście cykli pracy silnika.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano charakterystykę momentu silnika. Wyniki symulacji i badań eksperymentalnych porównano na wspólnym wykresie (rysunek 8). Z przebiegu momentu silnika wynika, że model dobrze odwzorowuje rzeczywisty silnik. Maksymalny błąd obliczenia momentu obrotowego wynosi 11%, lecz w większości punktów nie przekracza on 5% (rysunek 9). Zbliżony jest też kształt krzywej momentu.



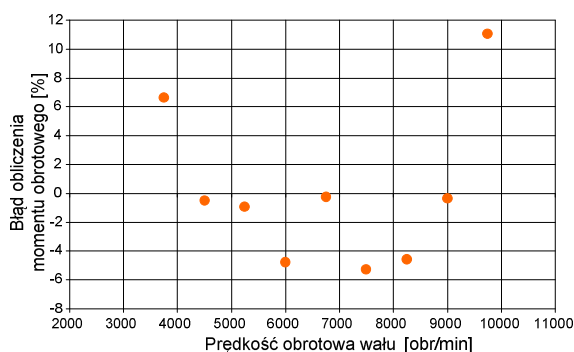
Rys. 7. Okno Case Explorer

Fig. 8. Case Explorer window



Rys. 8. Charakterystyka momentu obrotowego silnika XR50. Weryfikacja modelu.

Fig. 8. Characteristics of torque XR50. Verification of the model.



Rys. 9. Błąd obliczenia momentu obrotowego  
Fig. 9. Torque calculation error

## 5. Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdzają celowość zastosowania programu AVL BOOST do symulacji silnika Wankla. Pomimo zastosowania wyłącznie dostępnych w oprogramowaniu komponentów otrzymano wyniki na zadawalającym poziomie. Dowodem tego jest wyznaczony błąd na poziomie 5%. Niemniej jednak planowane jest dalsza kalibracja w celu zmniejszenia błędu. Kolejnym etapem badań będzie zastosowanie do opracowanego modelu wtrysku paliwa wodorowego. Umożliwi to wstępne określenie osiągnięć silnika po zmianie paliwa.

## Bibliography/Literatura

- [1] Anderson P.: *Intake Air Dynamics on a Turbocharged SI-Engine with Wastegate*. Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping 2002.
- [2] Batteh J., Tiller M., Newman Ch.: *Simulation of Engine Systems in Modelica*. 3<sup>rd</sup> International Modelica Conference, November 3-4, 2003, Simulation of Engine Systems in Modelica, pp. 139-148
- [3] Fischer R., Fraidl G., Hubmann Ch., Kapus P., Kunyeman R., Sifferlinger B., Beste F.: *Range Extender Module Enabled for Electric Mobility*. ATZ auto technology, October 2009, vol. 9, p. 40-47.
- [4] Fontana G., Galloni E., Palmaccio R., Strazzullo L., Vittorioso G.: *Development of a New Intake System for a Small Spark-Ignition Engine. Modeling the Flow Through the Inlet Valve*. SAE Technical Paper nr 2003-01-0369, 2003.
- [5] Izweik H. T.: *CFD Investigations of Mixture Formation, Flow and Combustion for Multi-Fuel Rotary Engine*. Technischen Universität Cottbus, 2009.
- [6] Jerrelind J.: *A Study in Model Based Control of an Evaporative Emission Management System*. Techniska Högskolan in Linköping 1998.
- [7] Jeż M., Świder A.: *Analiza drgań nieliniowych jednocylindrowego silnika tłokowego*. Journal of Kones. Combustion Engines, VoIB, No 3-4, 2001, str. 98-105.
- [8] Kopeć S. Witek A.: *Modelowanie i analiza dynamiki zespołu wału korbowego silnika spalinowego*. Komisja Budowy Maszyn PAN – Oddział w Poznaniu, Vol. 26 nr 2 Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji 2006
- [9] Leo D. J., Nelson D. J., Ellis W. M.: *Model of the Air System Transients in a Fuel Cell Vehicle*. Master of Science in Mechanical Engineering, Blackburg, Virginia 2002.
- [10] Semin, Bakar R. A., A. Ismail R.: *Investigation of Diesel Engine Performance Based on Simulation*. American Journal of Applied Sciences 5 (6): p. 610-617, 2008.
- [11] www.fev.com

Mr Miroslaw Wendeker, Prof. DSc., Ph.DEng. – head of the Department of Thermodynamics, Fluid Mechanics and Aviation Propulsion Systems, in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



Prof. dr hab. inż. Miroslaw Wendeker – kierownik Katedry Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

Mr Łukasz Grabowski, doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



Dr inż. Łukasz Grabowski – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej

Mr Konrad Pietrykowski, doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



Dr inż. Konrad Pietrykowski – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej

Mr Paweł Magryta, MEng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



mgr inż. Paweł Magryta – doktorant na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej