

**Konrad Pietrykowski\*, Michał Gęca\*, Mirosław Wendeker\***

## **KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE MODERNIZACJI UKŁADU PALIWOWEGO SILNIKA SAMOLOTOWEGO**

### **WPROWADZENIE**

Komputerowe modelowanie jest nieodłącznym etapem procesu tworzenia nowych produktów i doskonalenia już istniejących. Szczególnie wtedy, gdy projektant ma do czynienia z obiektem tak złożonym jakim jest silnik spalinowy. Proces modelowania znacznie skraca czas projektowania, a co za tym idzie zmniejsza koszty opracowania konstrukcji. Oczywiście modelowanie nie eliminuje całkowicie badań eksperymentalnych, jednak dzięki niemu zawęża się zakres tych prób. W zależności od posiadanej wiedzy o obiekcie i zastosowanych uproszczeń pozwala ono na znaczne zbliżenie się do optymalnego rozwiązania.

Większość współczesnych programów do modelowania silników spalinowych obejmuje tylko fragmenty cyklu roboczego. Jednak istnieją także bardziej zaawansowane narzędzia, pozwalające na symulację pracy całego silnika. Zawierają one szereg podmodeli poszczególnych elementów i procesów zachodzących w silniku spalinowym. Użytkownik może sam zdecydować jakie podmodele wykorzysta podczas symulacji. Może też wprowadzić napisany przez siebie opis przebiegu konkretnego zjawiska. Jednym z takich narzędzi jest produkt firmy Ricardo o nazwie WAVE.

Ważnym aspektem modelowania, o którym należy wspomnieć, jest stopień przybliżenia modelu do zjawisk zachodzących w rzeczywistości. Decyduje on o jakości stworzonego modelu. Jednak nie jest sensowne dążenie za wszelką cenę do wiernego odwzorowania modelowanego obiektu. Takie podejście może być bardzo czasochłonne a uzyskane efekty niewspółmierne. Dobry model uwzględni więc zjawiska, które mają znaczący wpływ na interesujące nas badania, a pomija te, których wpływ jest niewielki.

### **OBIEKT MODERNIZACJI**

Badana jednostka napędowa jest silnikiem czterosuwowym, benzynowym, chłodzonym powietrzem. Silniki posiada 9 cylindrów rozmieszczonych w układzie gwiazdowym. Powietrze trafiające do cylindrów jest sprężane przez sprężarkę promieniową napędzaną z wału korbowego silnika. Łączna pojemność skokowa cylindrów wynosi  $29,87 \text{ dm}^3$ ,

---

\* Konrad PIETRYKOWSKI, Michał GĘCA, Mirosław WENDEKER – Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.



**Rys. 1.** Widok silnika ASz-62IR produkowanego przez Wytwórnę Sprzętu Komunikacyjnego „PZL – Kalisz”

a stopień sprężania 6,4:1. Silnik rozwija maksymalna moc podczas startu – 1200 KM przy 2300 obr/min. Wtedy też uzyskuje on maksymalne zużycie paliwa – 400 kg/h.

## **OPIS PROGRAMU RICARDO WAVE v7**

Program WAVE v7 jest jednym z najbardziej zaawansowanych komercyjnych programów do modelowania i symulacji osiągow silników spalinowych, wykorzystywanym na szeroką skalę przez cały sektor przemysłowy ze szczególnym uwzględnieniem przemysłu samochodowego, rolniczego, okrętowego i energetycznego.

WAVE jest programem opartym na sieciach neuronowych, w którym każde zjawisko fizyczne i chemiczne występujące w silniku może być opisane za pomocą znanych wzorów czy hipotez. Stanowią one podstawę bardzo rozbudowanych bibliotek programu. Program posiada możliwości projektowania procesów dolotu, spalania i wydechu. Program umożliwia generowanie całościowych modeli silników spalinowych. Typowe aplikacje programu WAVE to:

- generowanie modeli osiągow silnika (zawiera także możliwość uwzględnienia w modelach turbodoładowania),
- projektowanie systemów dolotowych i wylotowych, określanie składników toksycznych spalin i emisji hałasu,
- sterowanie procesami silnikowymi,
- zaawansowane modelowanie procesu spalania dla silników ZS i ZI obejmujące także spalanie stukowe,
- możliwość przeprowadzenia analizy termicznej komory spalania i systemu wylotowego.

Program posiada bardzo prosty interfejs graficzny, który nowym użytkownikom pozwala bardzo szybko zrozumieć zasadę działania tego narzędzia symulacyjnego. Może być wykorzystywany na platformach systemowych PC/NT i UNIX.

Tworzenie modeli odbywa się przy pomocy wbudowanej w WAVE aplikacji WAVEBUILD, która za pomocą prostych bloków umożliwia wybór i łączenie interesujących nas elementów. Program WAVE posiada dużą liczbę dobrze opracowanych bibliotek podzespołów i zespołów silnikowych.

Wyniki symulacji mogą być generowane w postaci: plików tekstowych, tabel i wykresów. Etapy symulacji mogą być przedstawione także w formie animacji komputerowej.

Program WAVE współpracuje również z innymi programami inżynierskimi tj. Matlab, Vectis-3D, StarCD-3D, EASY5. Kompatybilność z innymi programami poszerza możliwości analizy a także umożliwia zweryfikowanie czasami kontrowersyjnych wyników badań.

## **MODEL SILNIKA ASz-62IR**

Badania symulacyjne modelu silnika ASz-62IR/M-24 przeprowadzono w maju 2005 roku na Uniwersytecie w Trieście (Włochy). Celem badań było stworzenie modelu silnika, weryfikacja uzyskanych wyników symulacji z wynikami badań eksperymentalnych oraz analiza możliwości poprawienia osiągnięć silnika poprzez zastosowanie wielopunktowego wtrysku paliwa. Model silnika zbudowano na podstawie danych udostępnionych przez Wytwórnię Sprzętu Komunikacyjnego „PZL – Kalisz”.

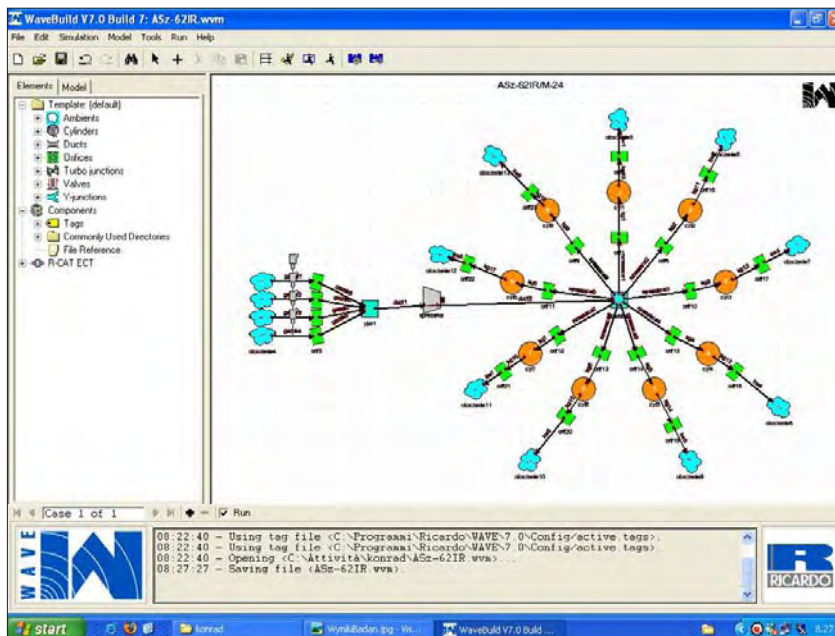
W programie WAVE został wykonany jednowymiarowy model wyżej wspomnianego silnika. Stworzenie modelu wymagało dokonania szeregu założeń upraszczających, zarówno w konstrukcji części silnika, jak i w przebiegu procesów w nim zachodzących. Rysunek 2 przedstawia widok ogólny modelu w oknie programu WAVE v7.

Aby symulacja przebiegała prawidłowo, na samym początku należy odpowiednio przyjąć główne parametry modelu. Należą do nich:

- liczba cykli symulacji = 5, zmniejszenie tej wartości prowadzi do zmniejszenia dokładności analizy, zwiększenie do wydłużenia czasu obliczeń,
- rodzaj paliwa – OCTANE jest to model paliwa opowiadający typowemu paliwu do zasilania silników o zapłonie iskrowym,
- model gazu – Real Gas (Fast) – model ten zapewnia dobre przybliżenie właściwości powietrza przy krótkim czasie obliczeń.

Następnym krokiem przy budowie modelu jest zdefiniowanie wymiarów konstrukcyjnych silnika. Najważniejsze z nich podano w tabeli 1.

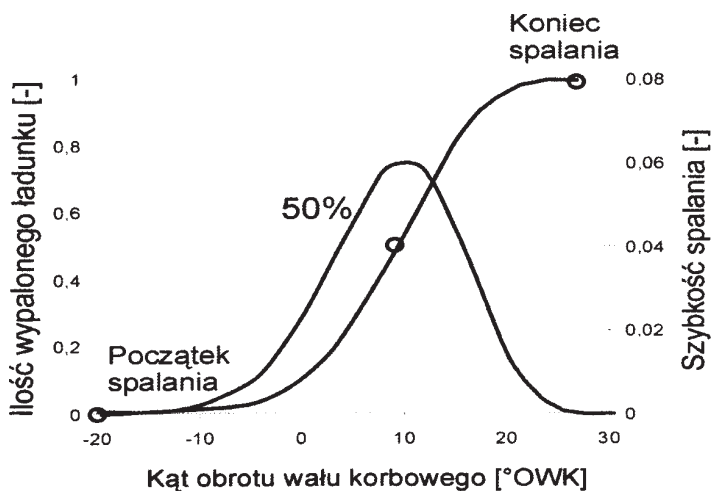
W kolejnej fazie przyjęto model wymiany ciepła Woshni oraz model przebiegu spalania SI Wiebe. Kąt wyprzedzenia zapłonu ( $20^\circ$  przed GMP) został uzyskany poprzez odpowiednie przesunięcie charakterystyki prędkości wywiązywania ciepła względem GMP (rysunek 3).



Rys. 2. Widok modelu w programie WAVE v7

Tabela 1. Wymiary konstrukcyjne silnika

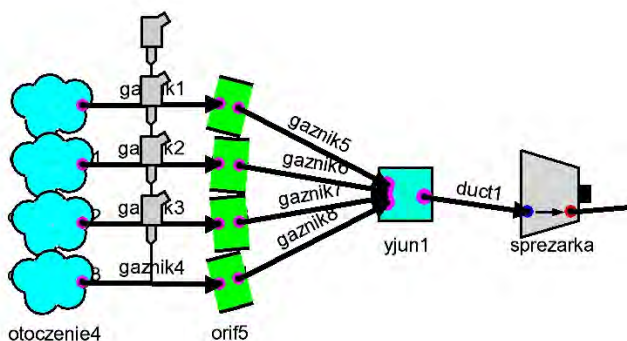
Liczba cylindrów	Liczba suwów	Rodzaj zapłonu	Średnica cylindra	Skok tłoka	Długość korbowodu	Stopień sprężania
9	4	iskrowy	155,5 mm	175 mm	350 mm	6,4



Rys. 3. Założony przebieg wywiązywania ciepła

## Model gaźnika

Model gaźnika składa się z czterech przewodów stożkowych imitujących gardziele oraz czterech przewodów o stałych średnicach (rysunek 4).



Rys. 4. Model gaźnika czterogardzielowego

Wtryskiwacze na wlocie do gaźnika imitują rozpylacze. Wydatek paliwa uzależniono od prędkości obrotowej na podstawie wyników uzyskanych w czasie badań. Założono też stały współczynnik odparowania paliwa. Wyznaczono go na podstawie porównania uzyskanego spadku temperatury w gaźniku z danymi eksperymentalnymi. Przyjęto wartość współczynnika odparowania paliwa równą 0,7.

## Sprężarka doładowująca

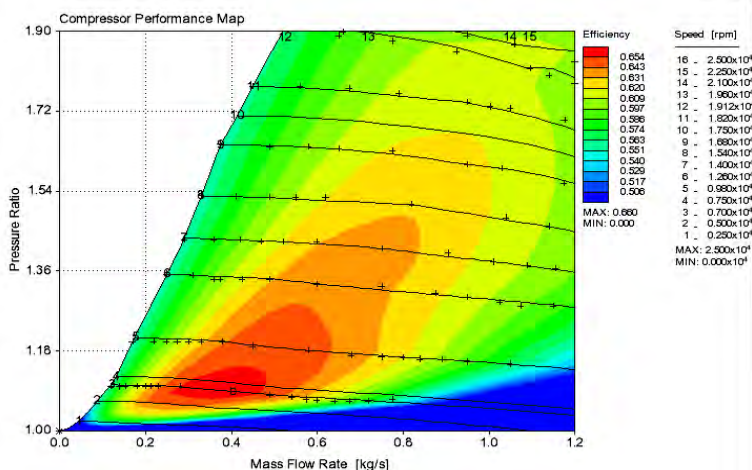
Gaźnik został połączony z przewodem doprowadzającym mieszankę do sprężarki za pomocą elementu Y-junction. Element taki definiuje się podając jego średnicę i objętość. Koniec tego przewodu został połączony bezpośrednio z króćcem ssącym sprężarki. W modelu zastosowano napęd sprężarki z wału korbowego silnika. Przyjęto przełożenie napędu 8,3125 oraz sprawność mechaniczną 0,95 co jest zgodne z rzeczywistymi wartościami tych parametrów.

Do modelu sprężarki wprowadzono mapę sporządzoną na podstawie oryginalnej charakterystyki urządzenia doładowującego zastosowanego w silniku (rysunek 5).

## WERYFIKACJA MODELU SILNIKA ASz-62IR

Poprawność modelu została zweryfikowana poprzez porównanie przebiegów parametrów gazodynamicznych i osiągnięć w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego.

Symulację przeprowadzono dla sześciu wartości prędkości obrotowych. Obejmują one podstawowy zakres pracy silnika (1850–2300 obr/min). Prędkości te wy-



Rys. 5. Charakterystyka sprężarki doładowującej

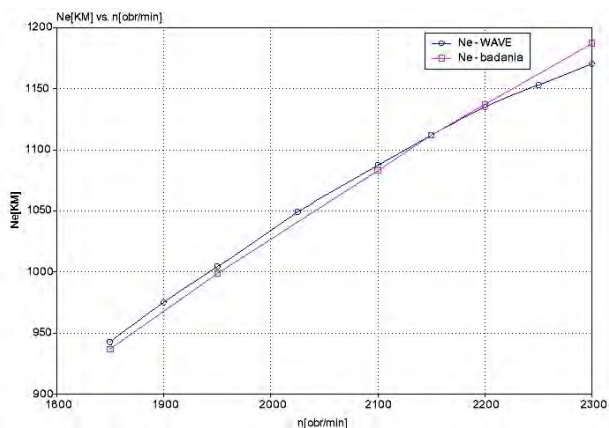
brano ze względu na możliwość porównania wyników symulacji z wynikami badań eksperymentalnych. W tabeli 2 przedstawiono wartości doświadczalne porównywalnych parametrów.

Tabela 2. Wyniki symulacji

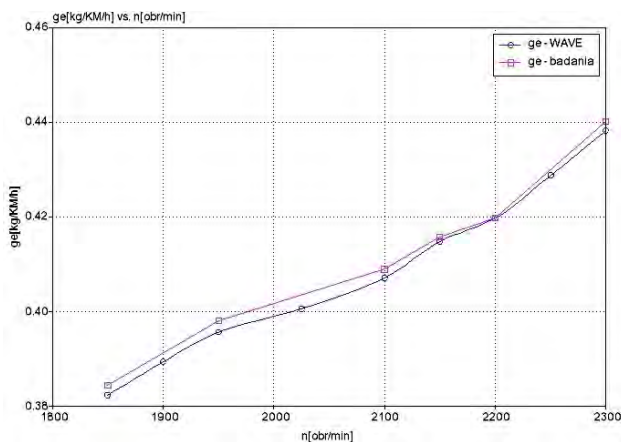
Prędkość obrotowa n, obr/min	Moc Ne, KM	Zużycie paliwa		Ciśnienia		Temperatury	
		godzinowe Ge, kg/h	jednostkowe ge, g/kW/h	statyczne w rurze ssącej pk, bar	statyczne za gaźnikiem pg, bar	w rurze ssącej Tk, K	za gaźnikiem Tg, K
1850	937	266	0,283	1,508152	0,991848	328	277
1950	1014	293	0,293	1,5625	0,991848	333	277
2100	1102	326	0,301	1,630435	0,985054	346	277
2150	1131	340	0,306	1,657609	0,978261	349	278
2200	1156	351	0,309	1,677989	0,971467	351	278
2300	1204	378	0,324	1,745924	0,964674	353	280

Na rysunku 6 przedstawiono porównanie charakterystyk mocy efektywnej uzyskanych w trakcie badań hamownianych i badań symulacyjnych. Moc symulowana różni się od mocy zmierzonej maksymalnie o 20 KM, co daje błąd względny równy około 1,7%. Maksymalna różnica wartości godzinowego zużycia paliwa wynosi 0,004 kg/kW/h (rysunek 7), co daje błąd około 1%. Taki stopień korelacji potwierdza prawidłowe odwzorowanie rzeczywistego obiektu przez model.





Rys. 6. Porównanie mocy efektywnej



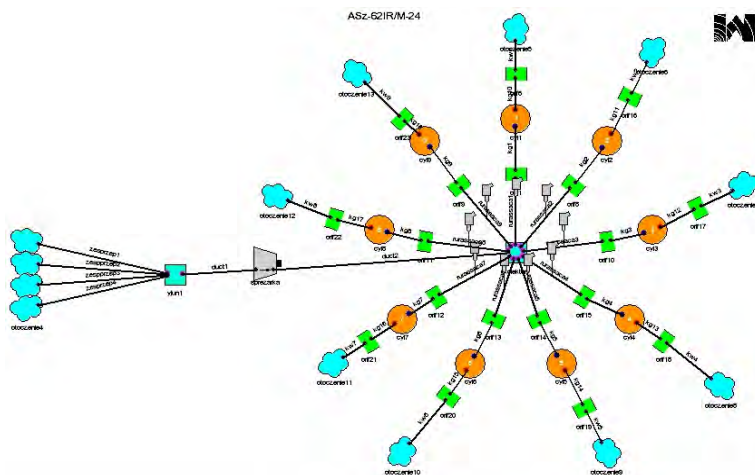
Rys. 7. Porównanie godzinowego zużycia paliwa

## MODEL SILNIKA K9-E

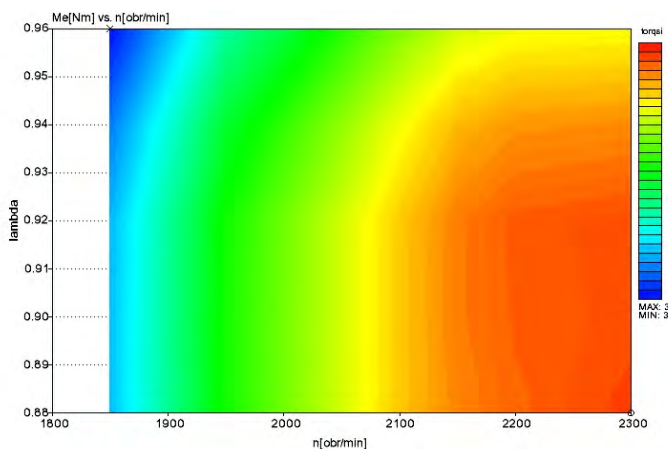
Model silnika K9-E (tak oznaczono prototypową wersję z wielopunktowym wtryskiem benzyny) różni się od ASz-62IR zastosowaniem w miejscu modelu gaźnika czterech przewodów o stałych średnicach oraz innym sposobem zasilania w paliwo (rys. 8).

W modelu wykorzystano 9 wtryskiwaczy typu *proportional*, umieszczonych na początku rur dolotowych. Pozwalają one na wprowadzenie stałego (dla danych warunków) współczynnika nadmiaru powietrza  $\epsilon$ . Dzięki temu założeniu możliwe było ustalenie współczynnika  $\epsilon$  odpowiadającego maksymalnej wartości momentu obrotowego (rysunek 9).

Ustalono, że maksymalny moment uzyskuje się przy współczynniku nadmiaru powietrza równym około 0,92.



Rys. 8. Widok modelu silnika K9-E



Rys. 9. Przebieg momentu obrotowego z zależności od prędkości obrotowej silnika oraz współczynnika nadmiaru powietrza

Następnym krokiem badań było poznanie wartości optymalnego kąta wyprzedzenia zapłonu. W tym celu sporządzono charakterystykę zależności momentu obrotowego od prędkości obrotowej silnika i od kąta wyprzedzenia zapłonu. Symulacje wykazały, że maksymalny moment uzyskuje się przy stałym (nie zależnym od prędkości obrotowej) kącie wyprzedzenia zapłonu, równym około  $26^\circ$  przed GMP.

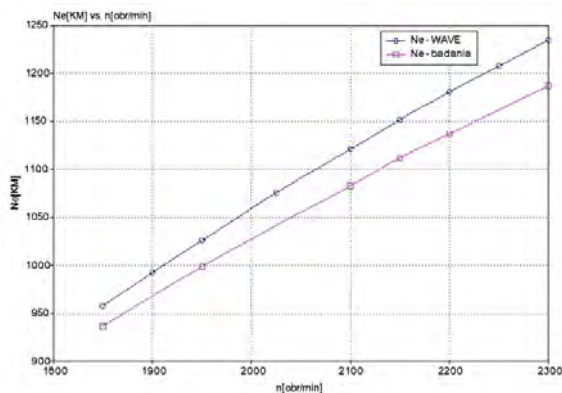
Ostatnim krokiem było poznanie optymalnego, ze względu na osiągi silnika, położenia wtryskiwacza i przyjęto odległość od początku rury dolotowej równą 120 mm.

Po wprowadzeniu uzyskanych danych optymalizacyjnych do modelu przystąpiono do symulacji osiągow silnika K9-E.

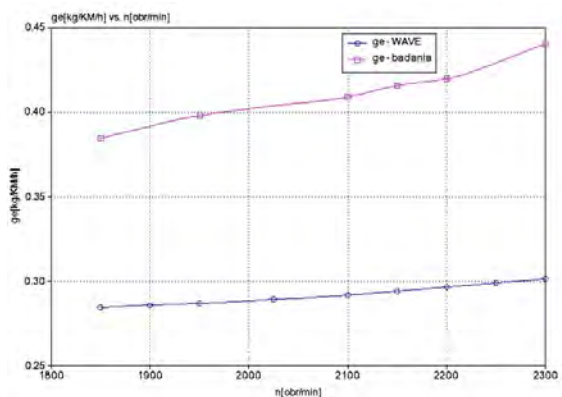


## WYNIKI SYMULACJI PRACY SILNIKA K9-E

Na rysunku 10 porównano moc efektywną rzeczywistego obiektu i uzyskaną z symulacji komputerowej. Maksymalna moc uzyskana z obliczeń jest większa względem zmierzonej o 50 KM (4,2 %). Wartość jednostkowego zużycia paliwa jest zaś mniejsza o 0,14 kg/KM/h (47 %) (rysunek 11).



Rys. 10. Porównanie mocy efektywnej



Rys. 11. Porównanie jednostkowego zużycia paliwa

## ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Program WAVE v7 pozwala na zbudowanie w krótkim czasie modelu silnika oraz na łatwe porównanie wyników symulacji z wynikami badań. Wyniki symulacji silnika ASz-62 IR są bardzo zbliżone do wyników badań. Małe wartości błędów wyznaczenia parametrów pracy silnika pozwalają stwierdzić, że po modyfikacji model silnika

ASz-62IR może posłużyć do przeprowadzenia symulacji silnika K9-E oraz że wyniki obliczeń nie będą w dużym stopniu odbiegać od wyników przeprowadzonych w przyszłości prób.

Przeprowadzone badania potwierdziły istnienie potencjalnych korzyści wynikających z zastąpienia gaźnikowego systemu zasilania wielopunktowym wtryskiem benzyny. W tej sytuacji uzasadnione było podjęcie realizacji projektu badawczego modernizacji silnika lotniczego ASz-62IR/M-18, w wyniku której jednostka ta stanie się bardziej konkurencyjna na rynku. Będzie to wynikiem:

- zwiększenia mocy,
- zmniejszenia zużycia paliwa,
- zmniejszenia drgań silnika w wyniku poprawy równomierności zasilania poszczególnych cylindrów.

## LITERATURA

1. Heywood J.B.: *Engine Combustion Modeling – An Overview, Combustion Modeling in Reciprocating Engines*. New York, 1980.
2. Rychter T., Teodorczyk A. *Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego*. PWN, Warszawa, 1990.
3. Sirignano W.A. *One-Dimensional Analysis of Combustion in a Spark-Ignition Engine* „Comb. Sci. and Techn.” 1973.
4. [www.ricardo.com](http://www.ricardo.com) strona internetowa producenta programu Wave.

Materiały zakładowe WSK PZL – Kalisz:

5. Instrukcja obsługi silnika lotniczego ASz-62IR-16, ASz-62IR-M18.
6. Opis techniczny silnika lotniczego K9-AA i K9-BB
7. Rysunki konstrukcyjne silnika ASz-62IR

## Streszczenie

Artykuł opisuje badania symulacyjne w programie WAVE. Zostały one wykonane w celu uzasadnienia podjęcia realizacji projektu modernizacji silnika lotniczego ASz-62IR/M-18. Celem badań było potwierdzenie potencjalnych korzyści wynikających z zastąpienia gaźnikowego systemu zasilania sekwencyjnym wtryskiem benzyny.

## COMPUTER AIDED MODERNIZATION OF FUEL SUPPLY SYSTEM FOR AIRCRAFT ENGINE

### Summary

The article describes simulation research done with the use of WAVE program. The research was aimed at configuration of rightness of retrofitting aircraft engine ASz-62IR/M-18 with fuel injection system.