

Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK

## SYMULACYJNA METODA WYZNACZANIA DRGAŃ KADŁUBA SILNIKA SPALINOWEGO

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono badania, których celem jest wyznaczenie drgań kadłuba silnika spalinowego na podstawie obliczanych sił wymuszających w układzie korbowo-tłokowym. W badaniach prowadzono obliczenia w programie Matlab-Simulink, gdzie wyznaczano siły wymuszające, oraz w programie Nastran, w którym na podstawie modelu MES kadłuba obliczano jego drgania.

Prezentowana metoda umożliwia prowadzenie badań i analiz drgań silników spalinowych na podstawie wirtualnych modeli komputerowych.

## A SIMULATION METHOD OF CALCULATION OF THE CRANKCASE VIBRATION OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

**Summary.** The paper presents investigation, whose aim is the calculation of the crankcase vibration of the internal combustion engine on the basis of estimated excitation forces in the crank drive system. In the study, the calculation has been carried out in Matlab-Simulink program, where the excitation forces were estimated, and in Nastran program, in which on the basis of FEM model of engine crankcase, its vibration was calculated.

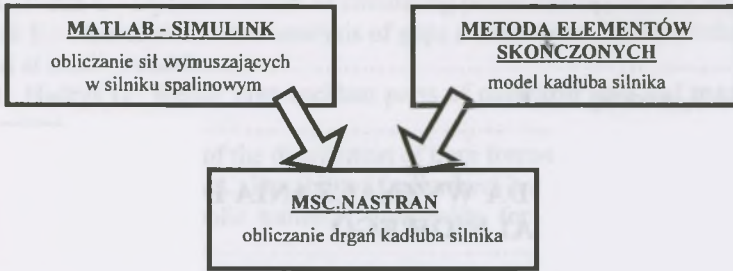
The presented method enables the study and analysis of vibration signal of the internal combustion engine on the basis of the virtual models.

### 1. WSTĘP

Rzeczywiste techniki komputerowe umożliwiają wykorzystywanie istniejącego oprogramowania do wyznaczania drgań silników spalinowych. Połączenie różnych metod symulacyjnych pozwala na obliczanie drgań emitowanych przez kadłub silnika już w momencie jego konstruowania. Złożoność sygnału drganiowego silnika wymaga jednak opracowania wielu modeli ruchu jego podzespołów.

Praca zawiera propozycję metody modelowania sił wymuszających w silniku oraz jego drgań w wyizolowanym układzie jednego cylindra silnika wielocylindrowego. Metoda ta wykorzystuje dwa środowiska obliczeniowe: program Matlab-Simulink oraz Metodę Elementów Skończonych z oprogramowaniem MSC.NASTRAN (rys.1).

Prezentowane podejście wymaga informacji na temat budowy geometrycznej układu korbowo-tłokowego silnika, budowy geometrycznej kadłuba silnika oraz wartości zmiennego ciśnienia w cylindrze. Mając te informacje, na podstawie zależności kinematycznych, możliwe jest obliczenie poszukiwanych wymuszeń w układzie tłok-cylinder silnika oraz drgań jego kadłuba. W publikacji zamieszczono podstawowe zależności służące do wyznaczenia sił w formie algorytmu obliczeniowego, przykładowe wartości sił wyznaczone z programu Matlab, założenia dotyczące zadania obciążenia modelu MES oraz przykładowe wyniki wpływu wymuszenia na drgania kadłuba silnika spalinowego.



Rys. 1. Model obliczania drgań silnika spalinowego

Fig. 1. The study model of the internal combustion engine vibration

## 2. WYZNACZANIE PODSTAWOWYCH SIŁ WYMUSZAJĄCYCH SILNIKA SPALINOWEGO

Do wyznaczenia sił wymuszających w silniku spalinowym niezbędne jest podanie podstawowych jego wymiarów geometrycznych, prędkości obrotowej wału korbowego oraz zmiany ciśnienia w cylindrze w zależności od kąta obrotu wału. W obliczeniach przyjęto założenie, że elementy układu korbowo-tłokowego silnika, takie jak: tłok, sworzeń tłokowy, korbowód i wał korbowy, posiadają nieskończenie dużą sztywność, a pomiędzy współpracującymi elementami nie występują luzy.

Poniżej zamieszczono podstawowe zależności (1 – 13) służące do obliczenia sił wymuszających w silniku, zgodnie z [1, 2] w kolejności ich obliczania, natomiast na rysunkach 2 i 3 zaprezentowano rozkład sił w formie graficznej na modelu układu korbowo-tłokowego jednocylindrowego silnika.

### 2.1. Droga tłoka – x

$$x = r(1 - \cos\varphi) + l_{pl}(1 - \cos\psi) \quad (1)$$

gdzie:

 $r$  – długość ramienia wału korbowego (wykorbienia wału), $\varphi$  – kąt obrotu wału korbowego, $\psi$  – kąt występujący pomiędzy osią korbowodu a linią ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka, $l_{pl}$  – długość korbowodu.

### 2.2. Prędkość tłoka – v

$$v = \frac{dx}{dt} = r\omega \frac{\sin(\varphi + \psi)}{\cos(\psi)} \quad (2)$$

gdzie:

 $\omega$  – prędkość kątowna wału korbowego.

### 2.3. Przyspieszenie tłoka – a

$$a = \frac{dv}{dt} = r\omega^2 \left[ \frac{\cos(\varphi + \psi)}{\cos(\psi)} + \frac{\sin\psi \cos^2\varphi}{\cos\varphi \cos^3\psi} \right] \quad (3)$$

### 2.4. Siła gazowa – $F_{Gas}$

$$F_{Gas} = p_z A_k \quad (4)$$

gdzie:

$p_z$  – ciśnienie w cylindrze,

$$A_K = \frac{\pi}{4} D_K^2,$$

$D_K$  – średnica cylindra.

## 2.5. Siła masowa oscylująca w ruchu posuwisto-zwrotnym – $F_{mosz}$

$$F_{mosz} = m_{osz} r \omega^2 \sum_{k=1}^n f(\lambda) \cos k \varphi = \sum_{k=1}^n F_k =$$

$$= m_{osz} r \omega^2 (\cos \varphi + A_2 \cos 2\varphi + A_4 \cos 4\varphi + A_6 \cos 6\varphi + \dots)$$
(5)

$$k = 1, 2, 4, 6, \dots, \quad A_2 = \lambda_{Pl} + \frac{1}{4} \lambda_{Pl}^3 + \frac{15}{128} \lambda_{Pl}^5, \quad A_4 = -\frac{1}{4} \lambda_{Pl}^3 - \frac{3}{16} \lambda_{Pl}^5, \quad A_6 = \frac{9}{128} \lambda_{Pl}^5$$

gdzie:

$m_{osz}$  – masa elementów wykonujących ruch posuwisto-zwrotny,

$\lambda_{Pl} = r/l_{Pl}$ :

$$m_{osz} = m_K + m_{KS} + m_{Kr} + m_{St} r_{St} / l_{Pl}$$
(6)

gdzie:

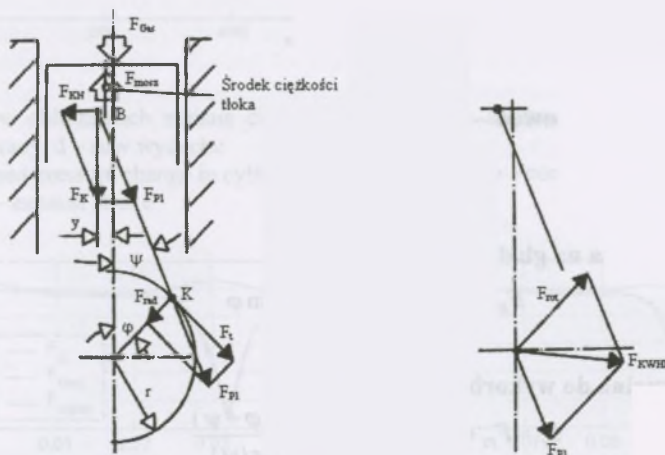
$m_K$  – masa tłoka,

$m_{KS}$  – masa sworznia,

$m_{Kr}$  – masa pierścieni tłokowych,

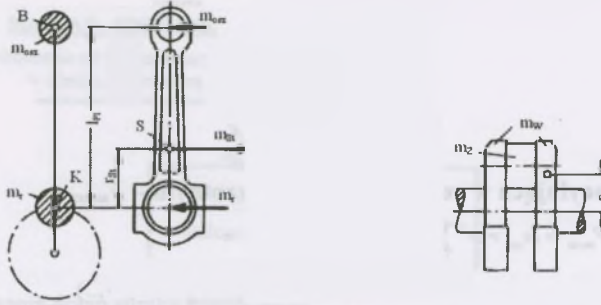
$m_{St}$  – masa korbowodu,

$r_{St}$  – długość korbowodu do jego środka ciężkości (jak na rys. 3).



Rys. 2. Rozkład sił w układzie korbowo-tłokowym silnika jednocylindrowego

Fig. 2. The decomposition of forces in crank drive system of the one-cylinder engine



Rys. 3. Rozkład mas w układzie korbowo-tłokowym silnika jednocylindrowego  
Fig. 3. The decomposition of mass in crank drive system of the one-cylinder engine

## 2.6. Siła masowa występująca w ruchu obrotowym – $F_{rot}$

$$F_{rot} = m_r r \omega^2 \quad (7)$$

gdzie:

$m_r$  – masa elementów wykonujących ruch obrotowy:

$$m_r = m_Z + m_W (r / r_W) + m_{St} (1 - r_{St}) / l_{Pl} \quad (8)$$

gdzie:

$m_Z$  – masa czopu korbowego,

$m_W$  – masa wykorbienia,

$r_W$  – długość wykorbienia do środka ciężkości wału korbowego.

## 2.7. Siła nacisku tłoka wzdłuż osi cylindra – $F_K$

$$F_K = F_{Gas} - F_{mosz} \quad (9)$$

## 2.8. Siła nacisku na korbowód – $F_{Pl}$

$$F_{Pl} = \frac{F_K}{\cos \psi} \quad (10)$$

## 2.9. Siła nacisku tłoka na gładź cylindra – $F_{KN}$

$$F_{KN} = F_K \tan \psi = F_K \lambda_{Pl} \sin \varphi \quad (11)$$

## 2.10. Siła normalna do wykorbienia wału – $F_t$

$$F_t = F_{Pl} \sin (\varphi + \psi) = F_K \frac{\sin (\varphi + \psi)}{\cos (\psi)} \quad (12)$$

## 2.11. Siła całkowita obciążająca łożyska główne wału korbowego w kadłubie silnika – $F_{KWHL}$

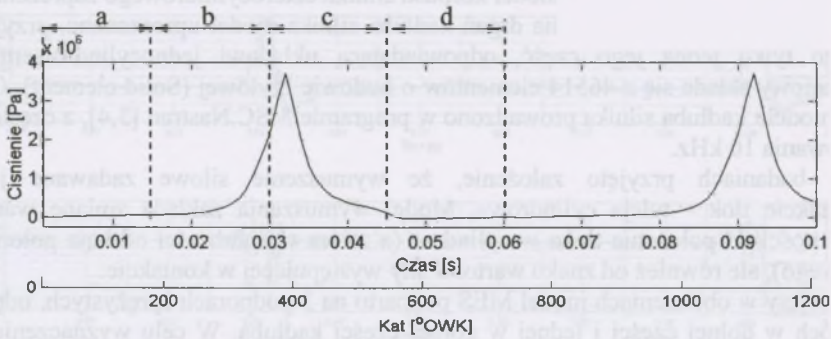
$$\vec{F}_{KWHL} = \vec{F}_{Pl} + \vec{F}_{mrot} \quad (13)$$

Przebieg drgań silnika można wyznaczyć zakładając wymuszenie siłą  $F_{KN}$  (nacisku tłoka na gładź tulei cylindrowej) oraz siłą  $F_{KWHL}$  (obciążającą łożyska główne wału korbowego silnika).

### 3. PRZYKŁADOWE WARTOŚCI SIŁ WYZNACZONE W PROGRAMIE MATLAB

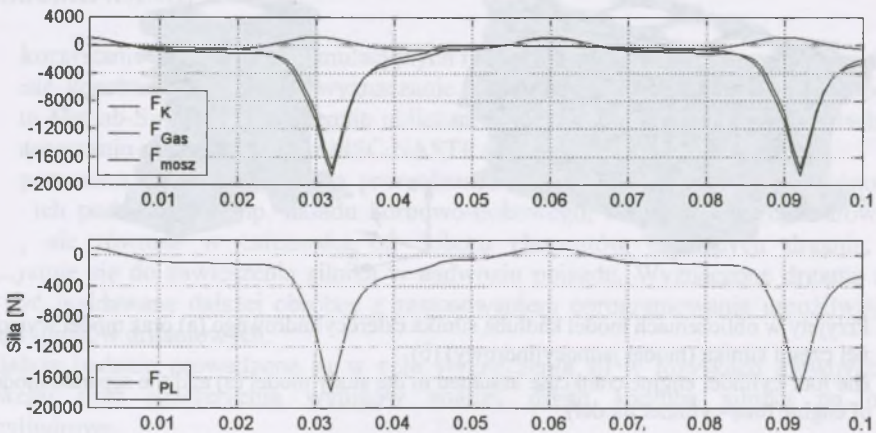
Do obliczeń sił wymuszających w silniku oraz jego drgań wybrano model geometryczny korpusu silnika czterocylindrowego, który wyposażony jest w suche tuleje cylindrowe. Na podstawie zamieszczonych w rozdziale 2 zależności przeprowadzono obliczenia sił wymuszających drgania kadłuba silnika. W obliczeniach przyjęto, że: średnica cylindra x skok wynosi 80x88 mm, prędkość obrotowa wału korbowego wynosi 2000 obr/min, a zmiana ciśnienia w cylindrze jest zgodna z zaprezentowaną na rysunku 4.

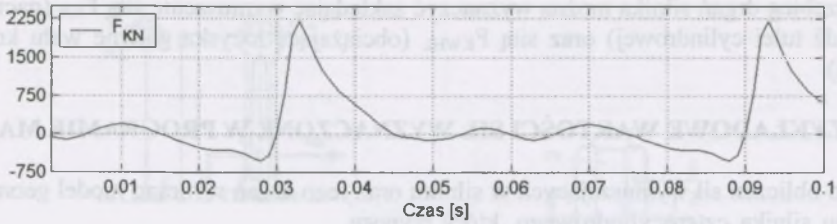
Przedstawione na rysunku 5 zależności świadczą o znaczącej zmianie sił działających zarówno na korbowód silnika, jak i na kontakt tłoka z cylindrem spowodowany przyrostem ciśnienia spalania w cylindrze i związanej z tym siły gazowej. Wartości sił przenoszonych przez korbowód na łożyska główne wału korbowego są znacznie większe od wartości sił obciążających kontakt tłok - tuleja cylindrowa. Występujące na rysunku znaki wartości obliczonych sił zależą od przyjętego układu współrzędnych.



Rys. 4. Przyjęta w obliczeniach zmiana ciśnienia w cylindrze: a – suw ssania, b – suw sprężania, c – suw pracy, d – suw wydechu

Fig. 4. The assumed pressure change in cylinder: a – intake stroke, b – compression stroke, c – power stroke, d – exhaust stroke





Rys. 5. Wartości sił wyznaczone w programie Matlab, gdzie:  $F_K$  – siła nacisku tłoka w kierunku wału korbowego,  $F_{Gas}$  – siła gazowa,  $F_{mosz}$  – siła masowa oscylująca w ruchu posuwisto-zwrotnym,  $F_{Pl}$  – siła nacisku na korbowód,  $F_{KN}$  – siła nacisku tłoka na gładź cylindra

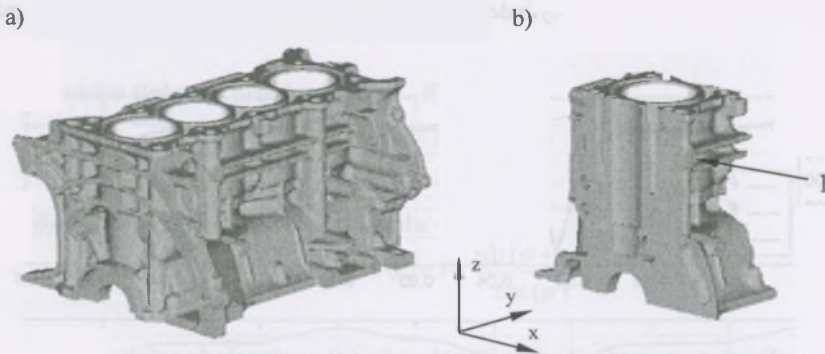
Fig. 5. The value of forces calculated in Matlab program, where:  $F_K$  – force working on the piston in crankshaft direction,  $F_{Gas}$  – gases force,  $F_{mosz}$  – the mass force oscillating in va-et-vient,  $F_{Pl}$  – force working on the connecting rod,  $F_{KN}$  – force working on the contact between piston and cylinder

#### 4. MODEL MES KADŁUBA SILNIKA ORAZ SPOSÓB JEGO OBCIĄŻENIA

Przyjęty do obliczeń drgań model korpusu silnika czterocylindrowego zaprezentowano na rysunku 6. W trakcie wyznaczenia drgań kadłuba silnika model uproszczono, przyjmując do obliczeń tylko jedną jego część, odpowiadającą układowi jednocylindrowemu. Model obliczeniowy składa się z 46514 elementów o budowie bryłowej (Solid element). Obliczenia drgań modelu kadłuba silnika prowadzono w programie MSC.Nastran [3,4], z częstotliwością próbkowania 10 kHz.

W badaniach przyjęto założenie, że wymuszenie siłowe zadawane jest tylko w kontakcie tłok - tuleja cylindrowa. Model wymuszenia zakłada zmianę wartości siły w zależności od położenia tłoka w cylindrze (a zatem w zależności od kąta położenia wału korbowego), ale również od znaku wartości siły występującej w kontakcie.

Przyjęty w obliczeniach model MES podparto na 3 podporach sprężystych, odpowiednio na dwóch w dolnej części i jednej w górnej części kadłuba. W celu wyznaczenia wartości drgań każdorazowo obliczano wartość przyspieszenia drgań punktu pomiarowego wybranego na bocznej ścianie kadłuba silnika (ozn. 1 na rys. 6b).



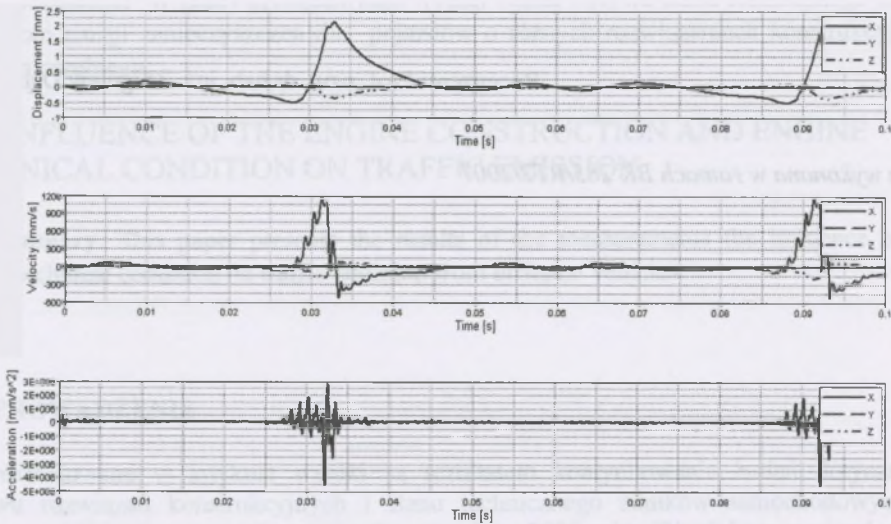
Rys. 6. Przyjęty w obliczeniach model kadłuba silnika czterocylindrowego (a) oraz model wyizolowanej części silnika (model jednocylindrowy) (b)

Fig. 6. The four-cylinder engine crankcase assumed in the study model (a) and the separate model part of engine (one-cylinder model)

## 5. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ DRGAŃ KADŁUBA SILNIKA

Na rysunku 7 zamieszczono przykładowe wartości przemieszczeń, prędkości i przyspieszenia drgań kadłuba obliczone w programie Nastran. Przedstawione przebiegi drgań sygnałów świadczą o znaczącym wpływie na drgania silnika momentu zmiany kierunku działania siły w kontakcie tłok - cylinder przy przejściu tłoka przez punkt zwrotu zewnętrznego (pomiędzy suwem sprężania a suwem pracy). Wyznaczone w symulacjach przyspieszenia drgań osiągają wartość w granicach  $300\text{--}450\text{ m/s}^2$ , a wartości wychylenia kadłuba silnika osiągają wartości do 2 mm.

Obliczone w pozostałych okresach pracy silnika wartości przyspieszenia drgań osiągają wartości do  $50\text{ m/s}^2$ . Również przemieszczenia kadłuba towarzyszące pracy silnika osiągają znacznie mniejsze wartości do około 0,5 mm.



Rys. 7. Wyznaczone w symulacjach wartości przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia modelu kadłuba silnika jednocylindrowego w kierunkach jak na rys. 6

Fig. 7. The computed in the simulation displacement, velocity and acceleration values of the crankcase of the one-cylinder engine model in directions according to fig. 6

## 6. PODSUMOWANIE

Wykorzystanie w badaniach symulacyjnych różnych aplikacji komputerowych umożliwia w procesie konstruowania silnika wyznaczanie sił wymuszających drgania, np. za pomocą programu Matlab-Simulink, a następnie obliczanie drgań kadłuba silnika w modelach MES przy zastosowaniu oprogramowania MSC.NASTRAN.

Proponowana metoda umożliwia prowadzenie analiz drgań silników w zależności od budowy ich podzespołów, np. układu korbowo-tłokowego, kadłuba, tulei cylindrowej czy głowicy, ale również w zależności od doboru elementów tłumiących drgania, które wykorzystuje się do zawieszenia silnika w nadwoziu pojazdu. Wyznaczone drgania silnika mogą być poddawane dalszej obróbce z zastosowaniem oprogramowania umożliwiającego analizę sygnałów drganiowych.

Dalsze badania prowadzone są w celu wyznaczenia sił w łożyskach głównych wału korbowego oraz rozszerzenia wyników analizy drgań kadłuba silnika na modele wielocylindrowe.

## Literatura

1. Köhler E.: Verbrennungsmotoren. ATZ-MTZ-Fachbuch. Braunschweig/Wisbaden 2002.
2. Beitz W., Grote K. H.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 19 Auflage. Springer-Verlag, Berlin 1997.
3. MSC.Nastran Quick Reference Guide. MSC.Software Corporation, USA 2001.
4. Heim R.: FEM mit NASTRAN. Carl Hanser Verlag-München, Wien 2005.
5. Ubysz A., Figlus T.: Ćwiczenia laboratoryjne z silników spalinowych i ochrony środowiska. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
6. Figlus T.: Propozycja metody obliczania drgań kadłuba silnika spalinowego. XIII Konferencja Naukowa Wibroakustyki i Wibrotechniki, VIII Ogólnopolskie Seminarium Wibroakustyka w Systemach Technicznych, WibroTech 2007, Jachranka 29-30 listopada 2007, s.113-120.

Recenzent: Prof. nzw. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

*Praca wykonana w ramach BK 285/RT2/2007*