

# MODEL NUMERYCZNY I SYMULACJA PRACY WYBRANEJ KONCEPCJI SILNIKA SPALINOWEGO POZBAWIONEGO WAŁU KORBOWEGO

Maciej WOROPAY  
Adam BUDZYŃSKI  
Wojciech BIENIASZEWSKI

Katedra Eksploatacji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Akademia Techniczno-Rolnicza  
ul. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, fax (52) 340-84-95, e-mail: [budyn@atr.bydgoszcz.pl](mailto:budyn@atr.bydgoszcz.pl)

## Streszczenie

Przedstawiono model *MCAD* wybranej koncepcji silnika spalinowego, pozbawionego par kinematycznych typu wał korbowy – korbówód. Wynalazek znamienny jest m.in. tym, że oś suwu tłoków jest równoległa do osi wału odbiorczego. Geometrię silnika zamodelowano w systemie *Solid Edge V17* na podstawie schematu kinematycznego, zastrzeżonego *Opisem Patentowym RP Nr 151 290*. Symulację pracy silnika przeprowadzono w systemie *visualNastran 4D*. Stwierdzono, iż w wybranych stanach układ staje się samohamowny. Zaprezentowano modyfikację układu. Stwierdzono, iż wartość prędkości obrotowej wału odbiorczego oraz momentu obrotowego zmieniają się periodycznie. Obszarem zastosowań danego silnika mogą być maszyny o udarowej charakterystyce pracy. W porównaniu z silnikami klasycznymi, możliwe jest uzyskanie korzystniejszej wartości stosunku mocy silnika do jego wymiarów i zwiększenie sprawności.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, 3D MCAD, CAE

## NUMERICAL GEOMETRY MODEL AND MOTION ANALYSIS IN THE CASE OF THE CONCEPT COMBUSTION ENGINE THAT IS DEVOID OF THE CRANKSHAFT

### Summary

The paper presents a *3D MCAD* model of a selected concept engine with the unique kinematics, i.e. typical motion parts: crankshaft and connecting rods are excluded. The main feature of the invention is the fact the axis of the piston slide is parallel to the shaft axis. Aforementioned model was assembled with the *Solid Edge V17* software on the basis of the concept draft described in the Polish *Patent Specification No 151 290*. The motion analysis software tool is the *visualNastran 4D*. The model based on original kinematics used to become rigid in some cases, so engine main parts were redesigned. The main shaft angular velocity and its torque values are periodic. It means, stroke (impact) machines may be principal application of the engine with presented kinematics. Compared to classic combustion engines, the described one presents higher values of the reliability and the power - dimensions ratio.

Keywords: combustion engines, 3D MCAD, CAE

## 1. WSTĘP

Eksploatowane są silniki spalinowe, w których zamiana ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka na ruch obrotowy wału odbiorczego wykonywana jest bez zastosowania pary kinematycznej typu wał korbowy–korbówód. Silniki takie określa się mianem awangardowych, a głównym celem ich badań i rozwoju jest poszukiwanie rozwiązań konstrukcyjnych, które w porównaniu z silnikami o klasycznej kinematyce będą się charakteryzować m.in. większą wartością sprawności i mniejszą wartością zużycia energii.

Wiele koncepcji konstrukcyjnych silników awangardowych nie wykorzystano do wytworzenia napędów rzeczywistych, m.in. ze względu na fakt

zaistnienia trudności poznania zależności kinematycznych układu jedynie z zastosowaniem metod analitycznych lub eksperymentalnych.

Rozwój oprogramowania służącego do komputerowego wspomagania projektowania w branży mechanicznej *3D MCAD* (ang. *Mechanical Computer Aided Design*) spowodował uzyskanie możliwości dokonania numerycznej symulacji pracy silników, już podczas trwania procesu ich projektowania i konstruowania. Po wstępnej akceptacji zależności kinematycznych projektowanego źródła napędu, możliwe jest bezpośrednio przesłanie plików z systemu *MCAD* do profesjonalnego systemu, służącego do wykonywania analiz kinematyczno-dynamicznych oraz wytrzymałościowych *3D CAE* (ang. *Computer Aided Engineering*).

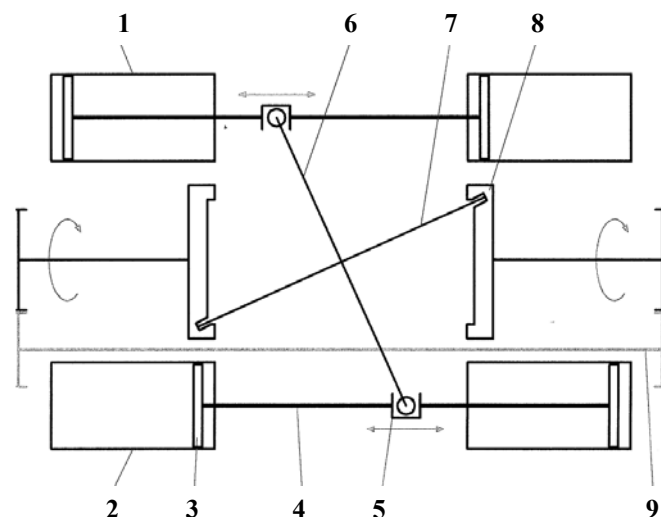
Przykładem software'u *MCAD*, w którym można przeprowadzić udany proces konstrukcyjny danego silnika, a następnie dokonać jego przybliżonej analizy kinematycznej jest *UGS Solid Edge V17*. Pliki tego systemu otwierać można bezpośrednio w profesjonalnym systemie *CAE visualNastran 4D*. W pracy przedstawiono metodę przeanalizowania struktury geometrycznej oraz zależności kinematycznych wybranej koncepcji silnika spalinowego o awangardowym układzie kinematycznym. Dzięki temu, już na wczesnym etapie rozwoju projektu zauważono i wyeliminowano zauważone błędy konstrukcyjne analizowanego źródła napędu.

## 2. UKŁAD KINEMATYCZNY DANEGO AWANGARDOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

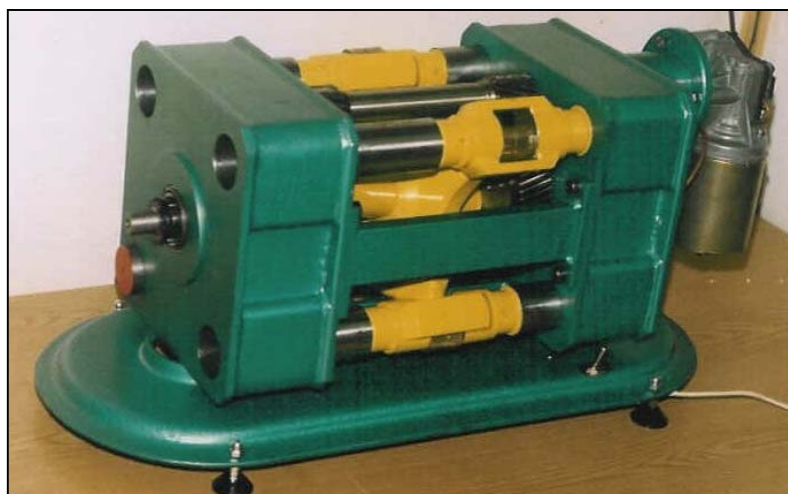
W *Opisie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej nr 151 290* przedstawiono zastrzeżenia wynalazcze kinematyki danego silnika spalinowego, w którym ruch posuwisto-zwrotny tłoków zamieniany jest na ruch obrotowy wału odbiorczego bez zastosowania pary kinematycznej typu wał korbowy-korbowód. Układ kinematyczny silnika, przedstawiono na Rys. 1.

W bloku silnika osadzone są przeciwległe pary współosiowo usytuowanych cylindrów (1, 2). Umieszczono w nich tłoki (3), połączone ze sobą sztywnymi łącznikami (4), mającymi gniazda przegubowe (5), w których osadzona jest dźwignia mechanizmu zamiany ruchu posuwisto-zwrotnego na ruch obrotowy (6). Dźwignia połączona jest sztywno z prostopadłą do niej osią (7), której oba końce osadzone są obrotowo w dwóch kołach (8) napędzających wał odbiorczy (9). Dźwignia (6) wraz z osią (7) wyznaczają w wariacie czterocyndrowym krzyżak, wpisany swym ruchem w kulę, w której końce dźwigni (6) przemieszczają się liniowo południkowo, zaś końce osi (7) przemieszczają się orbitalnie równoleżnikowo. Końce dźwigni (6) i osi (7) stanowią cztery punkty podparcia mechanizmu zamiany ruchu.

Według danego *Zastrzeżenia Patentowego* zbudowano model *3D MCAD* układu, a także wytworzono jego prototyp (Rys. 2), który poddaje się szczegółowym badaniom w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.



Rys. 1. Schemat kinematyczny danego spalinowego: 1, 2 – cylindry, 3 – tłok, 4 – sztywny łącznik tłokowy, 5 – gniazdo przegubowe, 6 - dźwignia, 7 - oś, 8 - koło podporowe, 9 - wał odbiorczy



Rys. 2. Prototyp danego silnika spalinowego

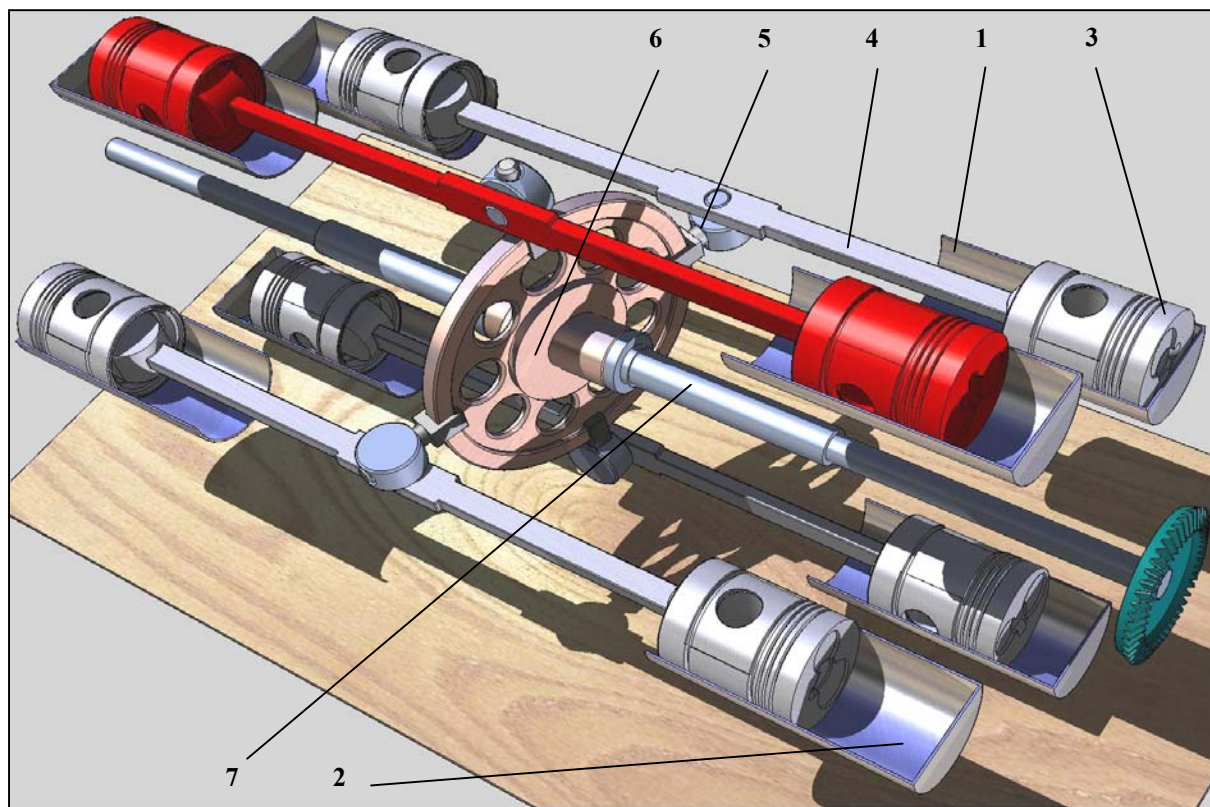
Podczas testów modelu wirtualnego i rzeczywistego zauważono, iż silnik wykonuje pracę właściwą (tłoki napędzają wał) jedynie w określonych przedziałach prędkości liniowej tłoków, poza którymi układ stawał się samohamowny. Bez problemów przebiegały próby pracy odwrotnej silnika (wał napędza tłoki). Podczas prób właściwej pracy modeli silnika, wirtualnego i rzeczywistego, zauważono zjawisko nierównomierności prędkości obrotowej wału odbiorczego.

### 3. MODYFIKACJA KINEMATYKI SILNIKA, MODEL 3D MCAD UKŁADU

Celem usunięcia niepożądanych zjawisk wprowadzono następujące modyfikacje układu:

- elementem służącym do zamiany ruchu posuwisto-zwrotnego tłoków na ruch obrotowy wału odbiorczego jest tarcza wodząca, nachylona pod odpowiednim kątem do osi symetrii wału,
- po obwodzie tarczy ślizgają się gniazda przegubowe sztywnych łączników naprzeciwlegle umieszczonych tłoków,
- gniazdo przegubowe składa się z przegubu przemieszczającego się po obwodzie tarczy oraz z przegubu obrotowo-wzdłużnego, łączącego przegub obwodowy z gniazdem sztywnego łącznika tłokowego.

Model 3D MCAD silnika awangardowego o zmodernizowanym układzie kinematycznym wykonano w systemie UGS Solid Edge V17. Efekt prac zilustrowano na Rys. 3.



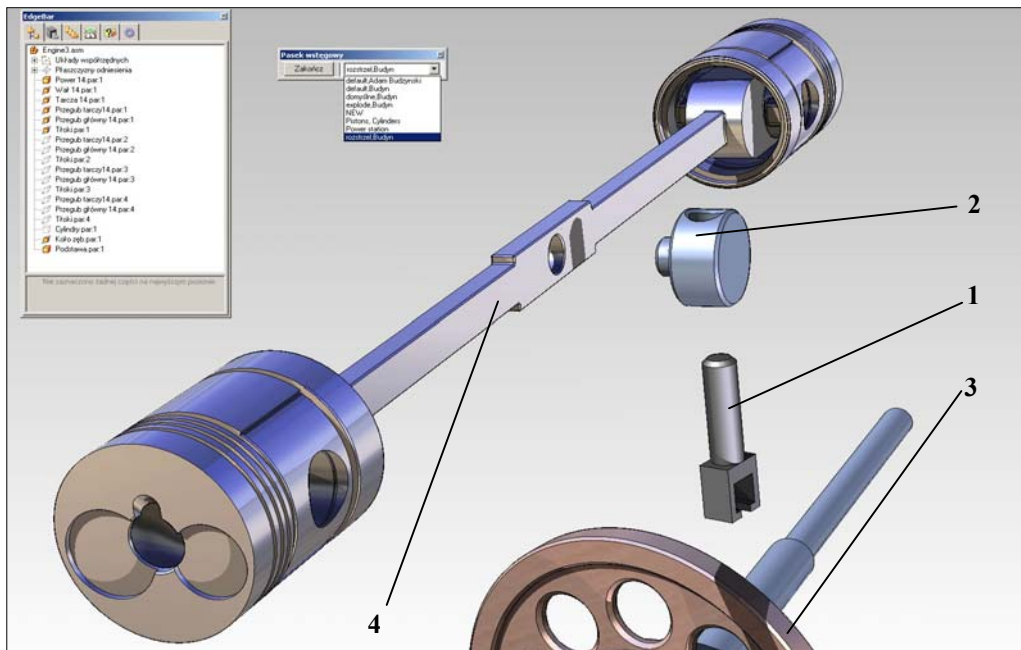
Rys. 3. Model 3D MCAD zmodernizowanej koncepcji silnika spalinowego, wykonany w systemie Solid Edge: 1, 2–cylindry, 3–tłok, 4–łącznik tłokowy, 5–gniazdo przegubu, 6–tarcza wodząca, 7–wał odbiorczy

Na Rys. 4 przedstawiono widok mechanizmu zamiany ruchu posuwisto-zwrotnego na ruch obrotowy. Celem uwidocznienia szczegółów, wyświetlony fragment modelu 3D MCAD zwizualizowano w widoku eksplodującym.

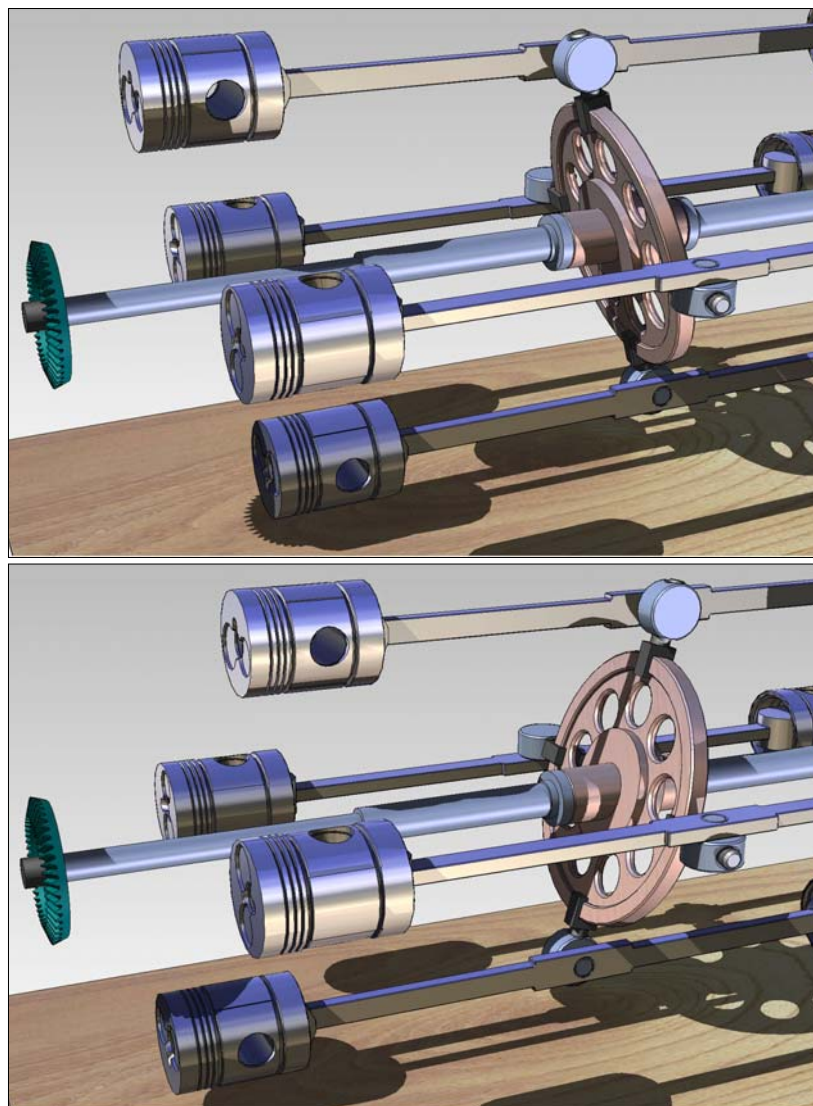
Zoptymalizowano wartość kąta nachylenia osi wału odbiorczego do płaszczyzny, w której zawiera się tarcza wodząca, skutkiem czego dokonano skutecznej wstępnej symulacji pracy modelu wirtualnego, zarówno pracy właściwej, jak i pracy odwrotnej. Dwa wybrane położenia układu, uzyskane w wyniku symulacji kinematycznej, wykonanej w środowisku Solid Edge przedstawiono na Rys. 5.

### 4. WERYFIKACJA MODELU 3D MCAD W SYSTEMIE 3D CAE

Pliki systemu 3D MCAD Solid Edge V17, zawierające zapis konstrukcji układu, otwarto bezpośrednio w systemie 3D CAE visualNastran 4D. Dzięki kompatybilności wymienionych narzędzi numerycznych, przetransportowano z systemu MCAD do systemu CAE geometrię poszczególnych części oraz rodzaje i wartości relacji przestrzennych, dzięki którym połączono je w funkcjonalny zespół. Rozpoczęcie analizy CAE, możliwe jest natychmiast po otwarciu w nim plików środowiska MCAD. Analizę w systemie CAE ograniczono do symulacji pracy dwusuwowego silnika dwucylindrowego. Do układu wprowadzono uproszczone wymuszenie dynamiczne, tj. siłę o danej wartości, działającą okresowo na każdy z cylindrów.



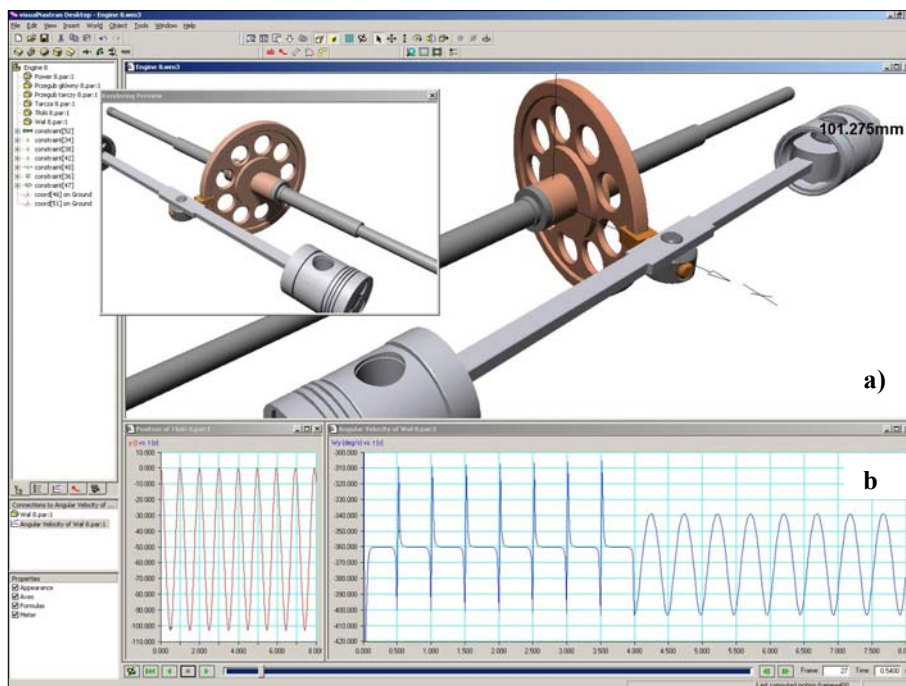
Rys. 4. Widok gniazda przegubowego, tj. mechanizmu zamiany ruchu posuwisto – zwrotnego na ruch obrotowy: 1-przegub obwodowy, 2-przegub obrotowo-wzdłużny, 3-tarcza wodząca, 4-łącznik tłokowy



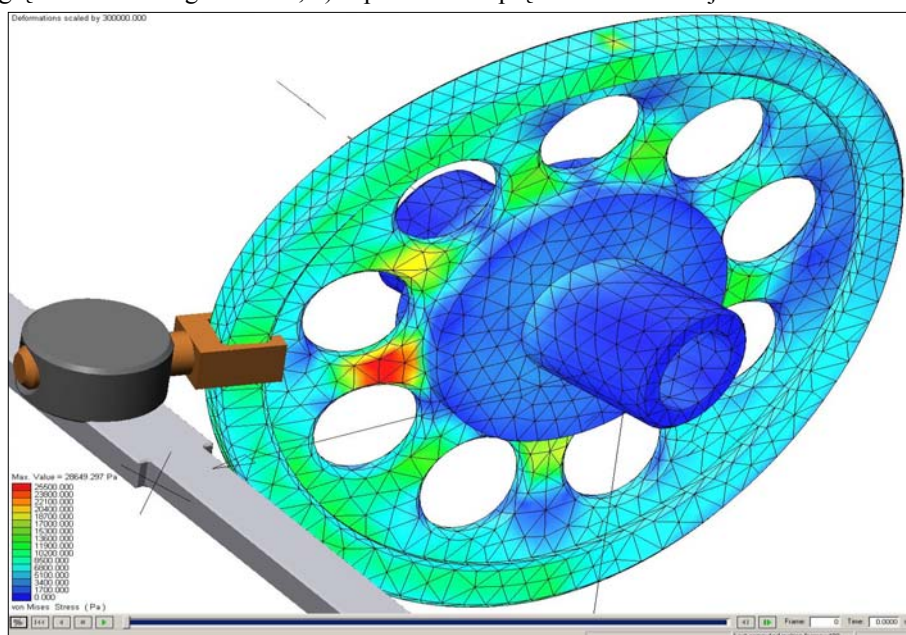
Rys. 5. Wybrane położenia modelu MCAD silnika o awangardowym układzie kinematycznym

Potwierdzono numerycznie fakt okresowej zmiany wartości prędkości obrotowej silnika. Zauważono, że zmiana ta następuje z chwilą nawrotu pary tłoków, niezależnie od tego, czy symuluje się pracę właściwą silnika, czy też jego ruch jałowy, tj. bez wymuszenia przyspieszenia spowodowanego wirtualnym wybuchem mieszanki. Podczas symulacji CAE pracy silnika (Rys. 6), zmiany wartości prędkości obrotowej modelu wału odbiorczego są nagłe i sięgają  $\pm 10\%$  wartości średniej, natomiast podczas symulacji ruchu jałowego zespołu, zmiany te mają charakter łagodny, zbliżony do harmonicznego i sięgają  $\pm 5\%$  wartości średniej.

Mając na celu weryfikację wytrzymałościową modelu silnika, układ przygotowano do uruchomienia obliczeń wykonanych *Metodą Elementów Skończonych MES*, (ang. *FEA, Finite Element Analysis*). W związku z istniejącym w układzie okresowym wymuszeniem dynamicznym, zarejestrowano wartości sił, działających na model tarczy wodzącej. Stwierdzono, że naprężenie o największej wartości pojawiają się w modelu tarczy podczas nawrotu pary modeli tłoków, spowodowanego wirtualną eksplozją mieszanki. Maksymalne wartości naprężeń mieszczą się w dopuszczalnych granicach dla wybranego materiału, tj. tytanu. (Rys. 7).



Rys. 6. Symulacja pracy danego silnika, przeprowadzona w systemie 3D CAE MSC.visualNastran 4D: a) podgląd analizowanego modelu, b) zapis wartości prędkości obrotowej modelu wału odbiorczego



Rys. 7. Wyniki pomiaru naprężeń w modelu tarczy wodzącej podczas nawrotu pary tłoków

## 5. WNIOSKI

Z zastosowaniem nowoczesnych narzędzi numerycznych opracowano układ kinematyczny awangardowego silnika spalinowego, tj. takiego, w którym zamiana ruchu posuwisto zwrotnego tłoków na ruch obrotowy wału odbiorczego, odbywa się z wyeliminowaniem pary kinematycznej typu wał korbowy-korbówód. Zmodyfikowano koncepcję układu, przedstawioną w *Opisie Patentowym RP nr 151 290*. W wyniku wprowadzonych innowacji, opracowano układ, w którym do zamiany ruchów wykorzystuje się spoczywającą na wale tarczę wodzącą, po której obwodzie przemieszczają się gniazda przegubowe sztywnych łączników naprzeciwlegle współosiowo pracujących tłoków. Model 3D MCAD silnika danym układzie kinematycznym wykonano w systemie UGS Solid Edge V17.

Podczas wstępnej symulacji pracy modelu, udowodniono wyeliminowanie określonych wad, typowych dla modelu 3D MCAD silnika o koncepcji opisanej w *Zastrzeżeniu Patentowym*. Na podstawie badań CAE stwierdzono, że prędkość obrotowa modelu wału odbiorczego zmienia się okresowo, co spowodowane jest faktem nawrotów par tłoków. Na podstawie obliczeń z zastosowaniem *Metody Elementów Skończonych*, stwierdzono, że maksymalne wartości naprężeń pojawiających się w modelu tarczy wodzącej nie przekraczają wartości dopuszczalnych dla uprzednio dobranego materiału.

Analizując wybrane zależności kinematyczne i dynamiczne zmodernizowanego układu, zauważono, iż cechuje się on następującymi zaletami, w porównaniu z silnikami o klasycznej kinematyce:

- możliwe jest uzyskanie znacznie lepszej wartości stosunku mocy silnika do jego gabarytów,
- w wariacie wielocylindrowym układu, dzięki sztywnemu połączeniu tłoków następuje bezpośrednie przekazanie energii z tłoka wykonującego suw pracy na tłok wykonujący suw sprężania, co wpływa pozytywnie na zwiększenie sprawności silnika,
- zastąpienie krzyżaka tarczą wodzącą umożliwia znacznie łatwiejszy montaż/demontaż wymaganej liczby par cylindrów, celem optymalizacji charakterystyki mocy silnika,
- konstrukcja silnika umożliwia zwielokrotnienie liczby par cylindrów, bez nadmiernego komplikowania budowy bloku napędowego,
- periodyczne zmiany wartości prędkości obrotowej wału odbiorczego implikują zastosowanie silnika o opisanym układzie kinematycznym m.in. w maszynach o udarowej charakterystyce pracy, np. młyny wielotarczowe.

Praca powstała we współpracy z firmą „**PRAXE Jacek Barcikowski**”.

## LITERATURA

- [1] Kazimierczak G., Pacuła B., Budzyński A.: Solid Edge - komputerowe wspomaganie projektowania, HELION, Gliwice 2004
- [2] Zastrzeżenie Patentowe RP nr 151 290

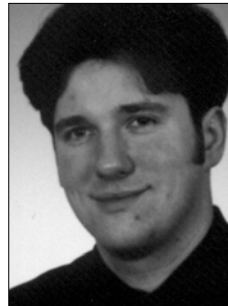


**Prof. dr hab. inż. Maciej Woropay** jest kierownikiem Katedry Eksploatacji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Akademii Technicznej – Rolniczej w Bydgoszczy.

W pracy naukowej zajmuje się problemami dotyczącymi teorii systemów, teorii niezawodności i sterowania

procesami eksploatacji w złożonych systemach biotechnicznych, a w szczególności sterowaniem tymi procesami w systemach transportu miejskiego.

Jest autorem i współautorem ponad 100 prac naukowych, autorem podręczników i skryptów akademickich, promotorem ponad 120 prac magisterskich i inżynierskich oraz prac doktorskich.



**Mgr inż. Adam Budzyński** jest asystentem w Katedrze Eksploatacji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy.

W pracy naukowej zajmuje się zastosowaniem narzędzi numerycznych 3D MCAD w praktyce inżynierskiej.

Prowadzi badania dotyczące powstawania i zanikania drgań samowzbudnych podwozi lotniczych. Jest Opiekunem Koła Naukowego Solid Edge z WM ATR, w którym popularyzuje się narzędzia CAD/CAM/CAE wśród młodzieży studenckiej.



**Mgr inż. Wojciech Bieniaszewski** jest doktorantem w Katedrze Maszyn Spożywczych i Ochrony Środowiska na Wydziale Mechanicznym Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy.

W pracy naukowej zajmuje się analizą numeryczną procesu rozdrabniania w młynach wielotarczowych. Prowadzi badania dotyczące rozwoju narzędzi numerycznych służących do komputerowego wspomaganie wytwarzania (CAM).

Jest Prezesem Koła Naukowego Solid Edge z WM ATR, w którym popularyzuje się narzędzia CAD/CAM/CAE wśród młodzieży studenckiej.