

Symulacja ruchu silnika gwiazdowego

Zbigniew Budniak, Marek Dobrowolski

Streszczenie

W artykule pokazano możliwości współczesnych systemów CAD/CAE do modelowania i analizy kinematycznej silników gwiazdowych. Opracowany model symulacyjny pozwolił na przeprowadzenie analiz numerycznych. Wyniki tych analiz przedstawiono na wykresach.

Słowa kluczowe: modelowanie, CAD/CAE, silnik gwiazdowy, analiza ruchu, układ korbowo-tłokowy.

Wstęp

Postęp w rozwoju zintegrowanych systemów CAD/CAE do komputerowego wspomaganego projektowania oraz obliczeń i analiz inżynierskich daje konstruktorowi doskonałe narzędzie o niespotykanych dotąd możliwościach do kreowania i analizowania projektowanych maszyn i urządzeń oraz całych układów technicznych. Przykładem takiego układu są silniki gwiazdowe charakteryzujące się złożoną budową.

Silniki gwiazdowe są to silniki spalinowe, w których cylindry umieszczone są promieniowo na obwodzie koła, z centralnym wałem korbowym. Silnik gwiazdowy może zawierać od trzech do kilkunastu cylindrów. Silnik taki może mieć obieg zarówno dwusuwowy jak i czterosuwowy. W przypadku tego drugiego (ponad 90% konstrukcji) liczba cylindrów w danej gwiazdzie jest zawsze nieparzysta. Kilkunastocylindrowe silniki gwiazdowe budowane są w układzie podwójnej, a czasem i poczwórnej gwiazdy.

Elementy ruchome silnika wykonują złożone ruchy w przestrzeni trójwymiarowej. Stąd bardzo istotnym punktem prezentowanej pracy było sprawdzenie poprawności opracowanego modelu kinematycznego na przykładzie dziewięciocylindrowego silnika gwiazdowego. Do modelowania bryłowego silnika wykorzystano program SolidWorks. Obliczenia i analizy kinematyczne przeprowadzono przy wykorzystaniu programu SolidWorks Motion [1].

2. Modelowanie silnika gwiazdowego

Zamodelowany dziewięciocylindrowy silnik gwiazdowy [2] posiada moc $N = 57 \text{ kW}$ i przenosi maksymalny moment obrotowy $M_o = 106 \text{ Nm}$. Prędkość obrotowa n zawiera się w przedziale od 3000 do 6000 obr/min, a pojemność skokowa $V_{ss} = 1,160 \text{ dm}^3$.

Modelowanie konstrukcji przeprowadzono w programie SolidWorks. Jest to program z dziedziny komputerowego wspomaganego projektowania CAD, przeznaczony do modelowania elementów i zespołów mechanicznych.

Widok modelu silnika gwiazdowego pokazano na rys. 1. Głównym podzespołem jest gwiazdowy układ korbowo-tłokowy. Poszczególne układy korbowo-tłokowe są rozmieszczone promieniowo wokół wału korbowego. Krótki wał uniemożliwia zamocowanie na nim bezpośrednio wszystkich korbowodów, dlatego zastosowano jeden korbowód główny, do którego są zamocowane pozostałe korbowody zwane korbowodami przyczepnymi. Układ korbowy zamienia ruch posuwisto-zwrotny tłoka na ruch obrotowy wału korbowego



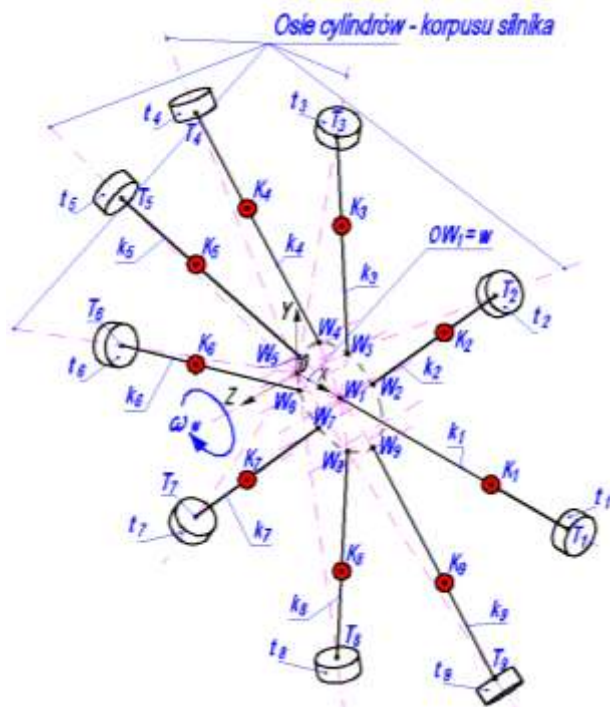
Rys. 1. Budowa silnika gwiazdowego: 1 - tłok, 2 - pierścień tłokowy, 3 - sworzeń tłokowy, 4 - korbowód, 5 - wał korbowy, 6 - cylinder, 7 - głowica, 8 - pokrywa głowicy - kanał dolotowy, 9 - pokrywa głowicy - kanał wylotowy, 10 - świeca zapłonowa, 11 - popychacz zaworu wydechowego, 12 - popychacz zaworu dolotowego, 13 - pokrywa tylna silnika, 14 - pokrywa przednia silnika. **Źródło:** Opracowanie własne

3. Model symulacyjny

Do przeprowadzenia badań symulacyjnych opracowano model szkieletowy gwiazdowego układu korbowo-tłokowego (rys. 2), wykorzystując jego model bryłowy pokazany na rys. 1. W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych ruchu przyjęto absolutny układ współrzędnych OXYZ związany z nieruchomym korpusem silnika spalinowego.

Początek układu współrzędnych O znajduje się w punkcie przecięcia osi wału korbowego z osiami tłoków. Oś Z pokrywa się z osią wału korbowego, natomiast oś X jest zgodna z osią tłoka t_1 oraz cylindra c_1 . W modelu szkieletowym funkcję wału korbowego pełni ramię w , którego długość $r_w = s/2$ (s – skok tłoka). Jednocześnie długość ramienia r_w jest odległością

pomiędzy osią wykorbienia czopa wału korbowego a jego osią symetrii (odcinek OW_1).



Rys. 2. Model kinematyczny silnika gwiazdowego
Źródło: Opracowanie własne

Z kolei korbówód główny k_1 stanowi ramię o długości l_{k1} (odległość między osiami otworów w korbówódzie – odcinek W_1T_1). Pozostałe korbówody $k_2 - k_9$ posiadają jednakową długość $l_{k2}=l_{k3}=\dots=l_{k9}$, są to odpowiednio odcinki $W_2T_2, W_3T_3, \dots, W_9T_9$. Każdemu elementowi układu przypisano masę umieszczoną w ich środkach ciężkości W (wał korbówód), $K_1 - K_9$ (korbówody) i $T_1 - T_9$ (tłoki).

Z modelu bryłowego części, w programie SolidWorks, odczytano współrzędne środków ciężkości masy w ich lokalnych układach współrzędnych. Parametry wszystkich układów korbowo - tłokowych, przedstawionych na rys. 2, zapisano jako zmienne modelowania.

Ze względu na przestrzenne usytuowanie elementów konstrukcyjnych modelu silnika, wykorzystano geometrię odniesienia w postaci płaszczyzn i osi określających położenie istniejących parametrów szkicu, takich jak oś obrotu ramienia r_w , wspólna oś obrotu ogniwi w i k_1 (punkt W_1). Pozostałe osiem korbówodów k_2, k_3, \dots, k_9 połączono z osiami otworów korbówodu głównego k_1 w punktach W_2, W_3, \dots, W_9 .

W kolejnym etapie modelowania wykorzystano środowisko zespołu Assembly, wchodzące w skład oprogramowania SolidWorks, które umożliwia składanie oddzielnych modeli krawędziowych układów korbowo - tłokowych. Bazując na modelu korpusu silnika, reprezentowanego przez osie symetrii cylindrów, zdefiniowano relacje występujące pomiędzy pozostałymi elementami układu tworząc jego przestrzenny model krawędziowy. Do jednoznacznego określenia łączonych elementów wykorzystano wiązanie współliniowości współpracujących osi obrotowych oraz wiązanie połączenia końców krawędzi.

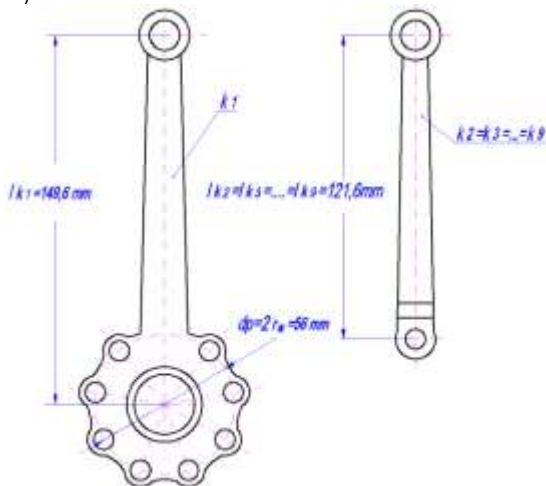
Wymuszenie względnego ruchu wału korbówód (ramię r_w), w celu wykonania symulacji ruchu, uzyskano przez

zastosowanie obrotu czynnego ramienia r_w . Wał wykonuje ruch obrotowy ze stałą prędkością kątową $\omega_w=2\pi n$ deg/s, gdzie n obr/min jest prędkością obrotową silnika. Analizę numeryczną względnego położenia przestrzennego układu korbowo - tłokowego przeprowadzono dla punktów $W_1, W_2, \dots, W_9, K_1, K_2, \dots, K_9$ i T_1, T_2, \dots, T_9 .

4. Analiza położenia

Zastosowanie programu SolidWorks Motion pozwoliło na znalezienie położenia charakterystycznych punktów dziewięciocylindrowego silnika gwiazdowego. Położenia tych punktów poszukuje się na ich trajektoriach wynikających z więzów narzuconych przez poszczególne pary kinematyczne.

W badaniach symulacyjnych przyjęto następujące dane: wał korbówód obraca się ze stałą prędkością obrotową $n = 3000$ obr/min ($\omega_w=100\pi$ s⁻¹); długość ramienia $r_w=28$ mm; wymiary korbówodów $l_{k1} = 149,6$ mm; $l_{k2}=l_{k3}=\dots=l_{k9} = 121,6$ mm (rys. 3).



Rys. 3. Korbówody silnika gwiazdowego
Źródło: Opracowanie własne

Na rys. 4 przedstawiono silnik gwiazdowy z trajektoriami:
- TW_1, TW_2, \dots, TW_9 - zakreślonymi przez punkty W_1, W_2, \dots, W_9 ;
- TK_1, TK_2, \dots, TK_9 - zakreślonymi przez punkty K_1, K_2, \dots, K_9 ;
- TT_1, TT_2, \dots, TT_9 - zakreślonymi przez punkty T_1, T_2, \dots, T_9 .

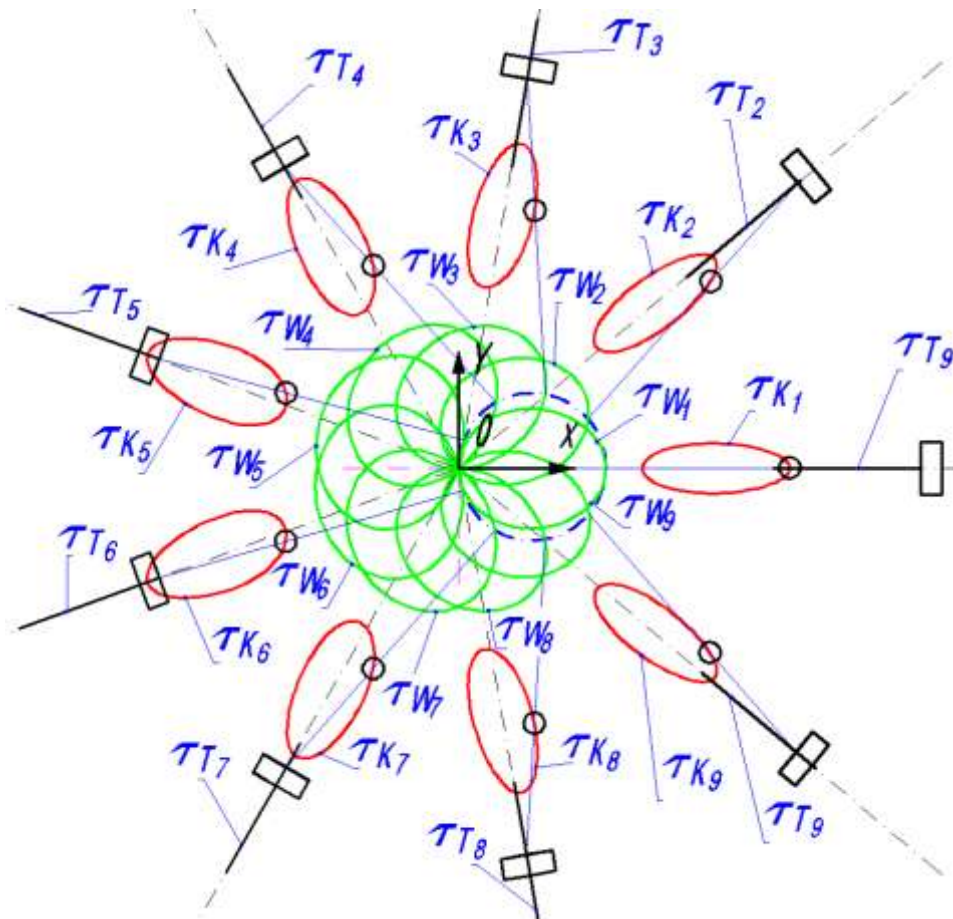
Jeżeli członem czynnym jest wał korbówód w obracający się ze stałą prędkością obrotową ω_w to konfiguracja układu jest następująca:

- punkt W_1 , znajdujący się w początku lokalnego układu współrzędnych korbówodu k_1 i jednocześnie oddalony od osi wału korbówód na odległość $w=28$ mm, porusza się po okręgu zakreślając trajektorię TW_1 ,
- trajektorie TW_2, TW_3, \dots, TW_9 pozostałych punktów W_2, W_3, \dots, W_9 (oznaczone kolorem zielonym), zakreślają złożone krzywe na powierzchni płaskiej OXY globalnego układu współrzędnych. Osie obrotów korbówodów k_1, k_2, \dots, k_9 są prostopadłe do płaszczyzny OXY . Zmianę wartości współrzędnych punktów W_1, W_2, \dots, W_9 w globalnym układzie współrzędnych pokazano na rys. 5.
- trajektorie TK_1, TK_2, \dots, TK_9 środków ciężkości korbówodów k_1, k_2, \dots, k_9 (oznaczone kolorem czerwonym), znajdujących się w punktach K_1, K_2, \dots, K_9 , są złożonymi zamkniętymi krzywymi na płaszczyźnie OXY . Zmianę środków ciężkości masy dla

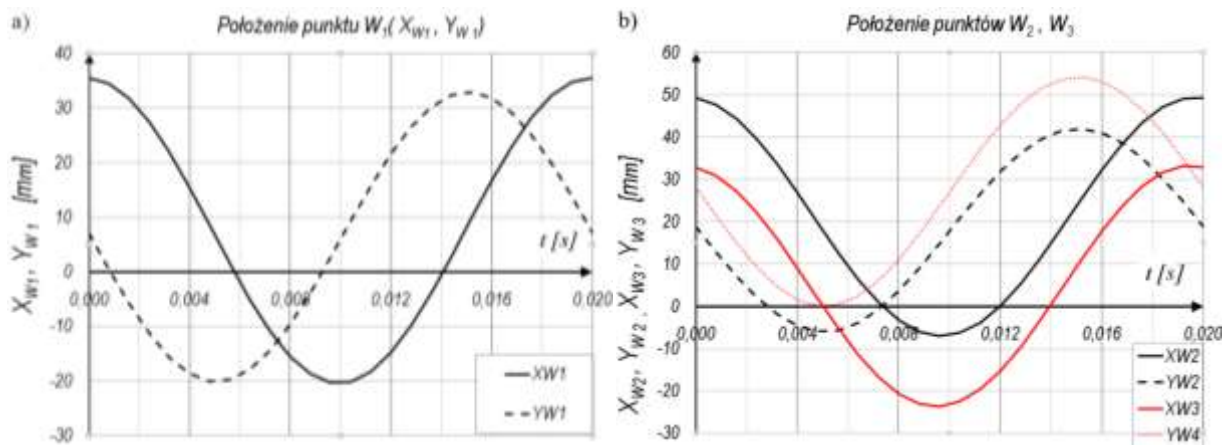
wybranych punktów K_1 i K_2 w funkcji czasu t , podczas jednego cyklu pracy, przedstawiono na rys. 6.

- $\tau T_1, \tau T_2, \dots, \tau T_9$, środków ciężkości tłoków t_1, t_2, \dots, t_9 , znajdujących się w punktach T_1, T_2, \dots, T_9 , są odcinkami

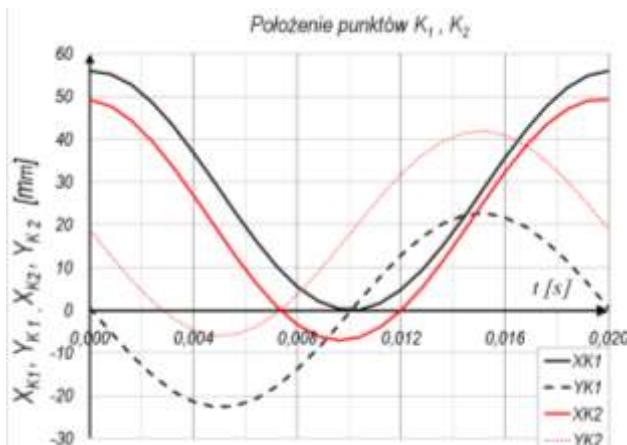
prostymi znajdującymi się na poszczególnych osiach cylindrów. Długości tych odcinków są równe wielkości skoków poszczególnych tłoków.



Rys. 4. Trajektorie wybranych punktów charakterystycznych silnika gwiazdowego. Źródło: Opracowanie własne

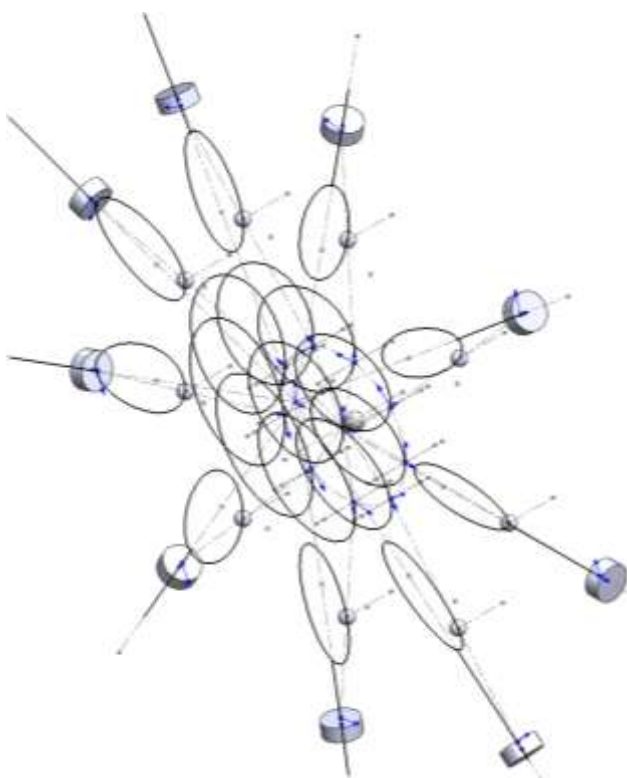


Rys. 5. Położenie wybranych punktów charakterystycznych silnika gwiazdowego, dla: a) punktu W_1 ; B) punktu W_2, W_3
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 6. Położenie wybranych punktów charakterystycznych K_1 i K_2 korbowodu k_1 i k_2
Źródło: Opracowanie własne

Poszczególne parametry elementów szkieletowego modelu kinematycznego są zapisane, jako zmienne modelowania. Pozwala to na przeanalizowanie dowolnej konfiguracji silnika gwiazdowego. Na rys. 7 pokazano przykład, w którym przyjęto następujące parametry: $d_p = 84$ mm (rys. 3), promień wykorbienia wału korbowego $r_w = 32$ mm, długość korbowodów $l_{k1} = 174$ mm, $l_{k2} = l_{k3} = \dots = l_{k9} = 132$ mm.

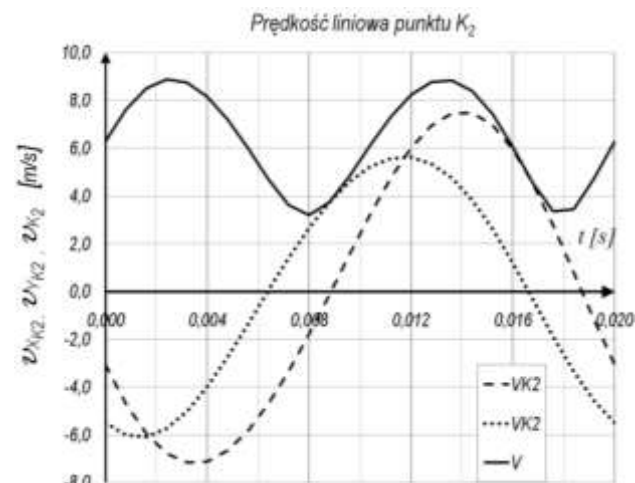


Rys. 7. Trajektorie wybranych punktów charakterystycznych silnika gwiazdowego
Źródło: Opracowanie własne

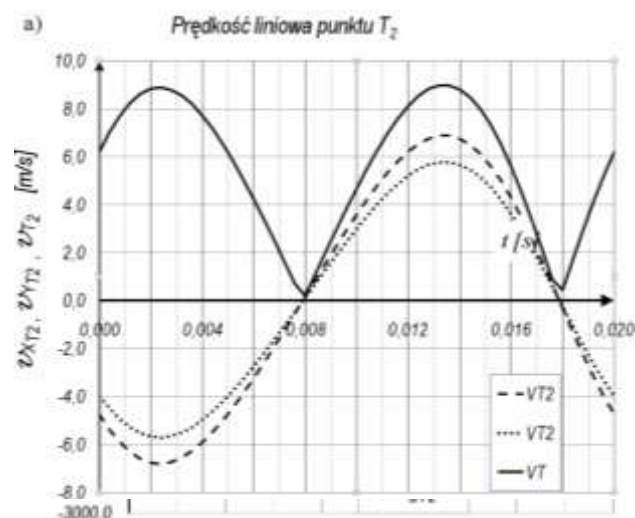
5. Analiza prędkości i przyspieszenia

Znając wielkości opisujące konfigurację układu kinematycznego silnika gwiazdowego, można przystąpić do opisu ruchu w zakresie prędkości i przyspieszeń, które definiujemy jako kolejne pochodne przemieszczenia względem czasu. Przemieszczeniom liniowym wybranych punktów (przykłady przedstawione na rys. 5 - 6) $W_1 - W_9, K_1 - K_9$ oraz $T_1 - T_9$ odpowiadają prędkości i przyspieszenia liniowe. Znalazienie jawnych funkcji, w celu określenia wartości prędkości i przyspieszenia, jest na ogół kłopotliwe, a czasem niemożliwe. Jednak jawne zależności nie zawsze są niezbędne do ich wyznaczenia. W prezentowanym artykule parametry te wyznaczono na podstawie obliczeń numerycznych w programie SolidWorks Motion.

Analizę numeryczną prędkości i przyspieszeń (rys. 8 - 9) przeprowadzono dla takich samych danych wejściowych jak w przykładach pokazanych na rys. 4 - 7.



Rys. 8. Prędkość liniowa punktu K_2 .
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 9. Prędkość (a) i przyspieszenie liniowe (b) środka ciężkości T_2 tłoka t_2
Źródło: Opracowanie własne

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule model symulacyjny pozwala na przeprowadzenie analiz kinematycznych i dynamicznych złożonych przestrzennych układów technicznych. Pokazano to na przykładzie dziewięciocylindrowego silnika gwiazdowego charakteryzującego się złożoną budową. Przeprowadzenie badań na modelu bryłowym, z wykorzystaniem technik komputerowych CAD/CAE, jest bardzo trudne i wymagające dużych mocy obliczeniowych systemów komputerowych. Zastąpienie modelu bryłowego modelem szkieletowym [3, 4] znacznie przyspiesza przeprowadzenie analiz projektowanej konstrukcji.

Pokazane wyniki badań symulacyjnych zawierają ilustrację tylko wybranych czynników wpływających na pracę dziewięciocylindrowego silnika gwiazdowego. Dysponowanie opisem położenia układu kinematycznego w postaci wyników numerycznych jest korzystne. Jest to przede wszystkim punkt wyjścia do kolejnych analiz konstrukcyjnych, montażowych i technologicznych w tym również analiz dynamicznych. Wyniki

badań symulacyjnych pozwalają na wielokrotną analizę silników gwiazdowych dla różnych wariantów rozwiązań konstrukcyjnych.

Bibliografia

1. Kuang - Hua Chang: Motion Simulation and Mechanism Design with SolidWorks Motion 2011. Schroff Development.
2. Dobrowolski M., Budniak Z.: *Modelowanie silnika gwiazdowego*. Autobusy - Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 2014, nr 6, p.p.
3. Budniak Z., *Modelowanie przestrzennych łańcuchów wymiarowych układów montażowych z zastosowaniem technik CAD/CAE*. Pomiar Automatyka Kontrola, 2013, vol. 59, s. 652 - 655.
4. Budniak Z., Bil T.: *Simulation of the movement of four - bar spatial linkage*. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2012, vol.17, No.4, pp.723 - 732.

Numerical motion analysis radial engine

Abstract

The article presents use of the capabilities of modern simulation system CAD/CAE for modeling and kinematic analysis of the radial engine. The developed simulation model allows to perform numerical analysis. The results of these analyzes are shown in the graphs.

Key words: modeling, CAD/CAE, radial engine, motion analysis, crank piston mechanism.

Autorzy:

Dr inż. **Zbigniew Budniak** - Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej

Marek Dobrowolski - Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej