

DYNAMICS ANALYSIS OF THE MAIN LANDING GEAR IN 3D MODEL

Wiesław Krasoń, Jerzy Małachowski

Military University of Technology
Department of General Mechanics
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 6839654, 6839683
e-mail: wkrason@wme.wat.edu.pl, jmalachowski@wme.wat.edu.pl

Abstract

Properly adjusted characteristics enable minimisation of loads that occur in the landing-gear components at the moment of touchdown. Therefore, dynamic analyses of the landing gear are conducted to provide capabilities to forecast their behaviour under hazardous conditions. This kind of investigation with numerical methods applied is much easier and less expensive than stand tests. However, the development of the landing gear FEM models is necessary. Methodology of the main landing gear numerical models developing and procedures of parameters selection for the real structure features representation is discussed in the paper. The nonlinear physical material properties were precisely defined. To describe material properties of all mechanical components of the landing gear, a materials chart describing parameters for the elastic range was used. In FEM model the following matters were taken into consideration: contact problems between collaborating elements, the phenomena of energy absorption by gas-liquid damper placed in the landing gear and the response of the landing gear during touchdown of a flexible wheel with the ground. Chosen results of the numerical analysis for the maximum load of the gear considered, corresponding to an aircraft's 3-point landing at maximum decline speed allowed have been compared to experimental research's results. The analysis presented in this paper is the first part of wider considerations concerning numerical assessment of landing gear life.

Keywords: aircraft landing gear, numerical modelling, touchdown drop test, FEM

ANALIZA DYNAMICZNA PODWOZIA GŁÓWNEGO W MODELU 3D

Streszczenie

Właściwie dobrane charakterystyki podwozia pozwalają minimalizować obciążenia występujące w podzespołach układu podwozia podczas jego pracy w momencie przyziemienia. W związku z tym wykonuje się analizy dynamiczne podwozi, aby przewidzieć ich zachowanie się w warunkach dla nich niebezpiecznych. Przeprowadzenie tego typu badań z wykorzystaniem metod numerycznych jest znacznie łatwiejsze i tańsze od prób stanowiskowych. W pracy omawiana jest metodyka modelowania podwozia głównego i procedury doboru parametrów opisujących rzeczywistą strukturę badanego układu. W celu określenia właściwości materiałowych elementów składowych układu podwozia definiowane są sprężyste i nieliniowe charakterystyki materiałowe. W modelu numerycznym MES uwzględniono następujące zagadnienia: kontakt pomiędzy współpracującymi częściami układu, zjawisko pochłaniania energii w amortyzatorze gazowo-cieczowym zastosowanym w podwoziu, oddziaływanie gruntu na odkształcalną oponę podczas przyziemienia. Wybrane wyniki analizy numerycznej odpowiadające przypadkowi maksymalnych obciążeń podwozia podczas przyziemienia na 3 punkty z maksymalną dopuszczalną prędkością pionową będą omawiane wraz z wynikami testów stanowiskowych. Prezentowana w pracy analiza jest pierwszą częścią badań numerycznych trwałości podwozia lotniczego.

Słowa kluczowe: podwozie samolotowe, modelowanie numeryczne, zrzutowy test lądowania, MES

1. Wstęp

W każdym tradycyjnym cyklu eksploatacyjnym samolotu w locie musi wystąpić faza lądowania, podczas której konstrukcja podwozia spełnia swoją kluczową rolę absorpcji olbrzymiej energii samolotu w momencie przyziemienia. Co więcej, nie należy zapominać, że samolot spędza

spora część swojego ‘życia’ na powierzchni podczas takich czynności, jak choćby jazda po pasie startowym, postój czy sam start i lądowanie. Podczas tych manewrów podwozie samolotu jest także narażone na działanie m.in. wysokich obciążeń dynamicznych, co w skrajnych przypadkach może prowadzić do zniszczeń oraz utraty stabilności. Podwozie projektowane i eksploatowane zgodnie z obowiązującymi normami lotniczymi [1, 2] powinno w sposób bezpieczny pochłoniąć odpowiednią część energii zniżania samolotu, jak również energii związanej z ruchem poziomym samolotu po płycie lądowiska lub generowanej w wyniku powstania drgań samowzbudnych typu shimmy [3, 4]. Prowadzone są nieustanne badania wykorzystujące metody numeryczne (MES) oraz testy eksperymentalne, których celem jest udoskonalenie tego podzespołu samolotu, poprzez poszukiwanie jak najkorzystniejszego kompromisu pomiędzy wytrzymałością poszczególnych elementów, ale również zachowaniem odpowiednio małej masy podwozia oraz zapewnieniu komfortu pasażerom [5, 6, 7]. Założenia projektowe i konstrukcyjne ograniczają obciążenia występujące w elementach podwozia podczas przyziemienia. Jednocześnie dąży się do wspomnianej minimalizacji masy zespołu i uzyskania jak najefektywniejszej relacji pomiędzy wyężeniem i masą układu. W związku z tym konieczne są wielowariantowe analizy dynamiczne podwozi [7], w celu spełnienia licznych, często wzajemnie wykluczających się wymagań, istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji samolotu. Analizy takie umożliwiają przewidywanie zachowania się podwozi także w warunkach lądowań awaryjnych. Ich dużą zaletą jest to, że mogą być zastosowane do symulacji dowolnej sytuacji niebezpiecznej, bez zbędnego narażania ludzi i konstrukcji. Należy zaznaczyć, że analizy numeryczne są znacznie tańsze od prób stanowiskowych.

W niniejszej pracy omówiono model numeryczny zastosowany w analizie dynamicznej podwozia głównego samolotu transportowego. Model MES podwozia zbudowano z odkształcalnych brył, które wiernie odzwierciedlają parametry geometryczno-fizyczne podstawowych podzespołów wykonawczych. W modelu tym uwzględniono, dźwignię wraz z podzespołem węzła mocowania podwozia do struktury kadłuba, amortyzator z tuleją, przeguby kulowe, oś koła, oraz sworznie. Połączenia ruchowe układu modelowano z uwzględnieniem odpowiednich warunków kontaktu. Dyskutowane są wybrane elementy metodyki budowy numerycznego modelu podwozia głównego i założenia przyjęte do realizacji analiz dynamicznych tego układu konstrukcyjnego. Wspomniany model 3D zastosowano w numerycznej symulacji testu zrzutu zrealizowanego za pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania LS-Dyna [8]. Celem zrealizowanych badań numerycznych jest walidacja modelu 3D przeznaczonego do analizy dynamicznej podwozia głównego i ocena wyężenia jego poszczególnych podzespołów.

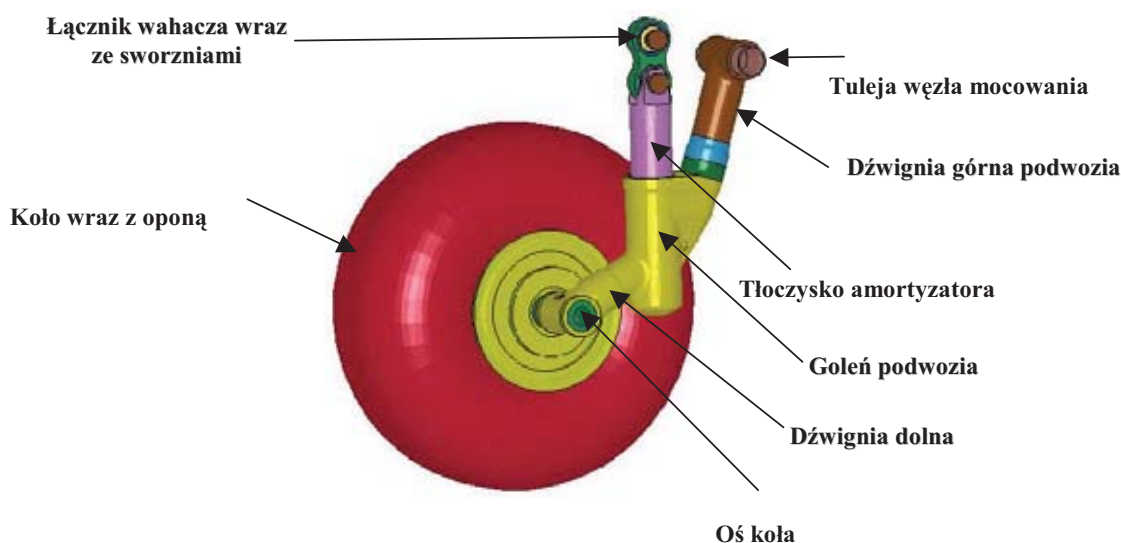
2. Obiekt badań i modele numeryczne

Przedmiotem badań jest podwozie stałe samolotu transportowego. Modelowano prawą część układu podwozia głównego. Z punktu widzenia konstrukcyjnego, podwozie samolotu, podzielić można na podzespoły, których zadaniem jest przede wszystkim zamocowanie układu do struktury kadłuba i przenoszenie obciążeń wynikających z uderzenia o płytę lotniskową. W modelach komputerowych przeznaczonych do analizy wyężenia podwozia należy uwzględnić podzespoły istotne dla realizacji tych zadań.

2.1. Model geometryczny

Model geometryczny rozważanego układu podwozia głównego samolotu transportowego zbudowano za pomocą oprogramowania 3D UGS Solid Edge. W modelu tym uwzględniono, dźwignię wraz z podzespołem węzła mocowania podwozia do struktury kadłuba, amortyzator z tuleją, przeguby kulowe, oś koła, oraz sworznie jak na rys. 1. Model geometrii importowano następnie do preprocesora graficznego pakietu MSC.Software, a następnie używając dostępnych procedur i bibliotek programu MSC.PATRAN uzupełniono go o model geometryczny koła

podwozia. W modelu geometrycznym koła odwzorowano główne jego podzespoły w postaci piasty koła, statora i rotora hamulca oraz opony.



Rys. 1. Model geometryczny układu podwozia
Fig. 1. Geometrical model of the landing gear system

W omawianym modelu geometrycznym uwzględniono wszystkie podstawowe podzespoły układu podwozia niezbędne do opracowania modelu dyskretnego MES do badań dynamiki podwozia głównego. Odwzorowano funkcjonalny podział badanej struktury, geometryczne nieciągłości w budowie poszczególnych części oraz ich wzajemne pozycjonowanie. Konfiguracja odwzorowana w modelu geometrycznym odpowiada układowi podwozia w stanie nieobciążonym – z amortyzatorem całkowicie rozprężonym. Takie położenie podzespołów podwozia odpowiada wyjściowej konfiguracji przewidywanych wariantów analizy numerycznej.

W opracowanym modelu geometrycznym zastosowano niezbędne uproszczenia dotyczące geometrii podzespołów jak też rozwiązań konstrukcyjnych - np. pominięto niektóre szczegóły konstrukcyjne, drobne elementy nie mające bezpośredniego wpływu na współpracę głównych podzespołów podwozia. Umożliwiło to realizację kolejnych etapów modelowania i wykonanie analizy dynamicznej tego złożonego układu konstrukcyjnego. Widok gotowego modelu geometrycznego kompletnego układu podwozia zamieszczono na rys. 1.

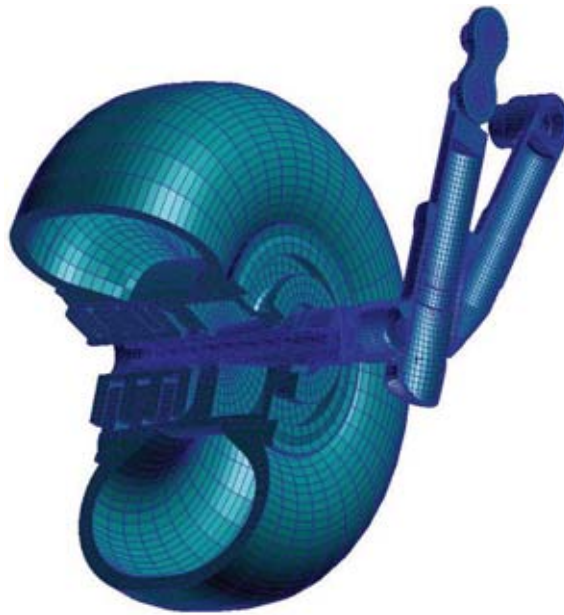
2.2 Model odkształcalny do badań numerycznych MES

Model geometryczny kompletnego układu wykorzystano do opracowania w pełni odkształcalnego modelu dyskretnego MES, przeznaczonego do badań dynamiki podwozia głównego samolotu transportowego. Modelowanie wykonano w środowisku MSC.PATRAN w wersji 2005r2 z zastosowaniem preferencji kodu LS-Dyna, który posłuży do wykonania analiz dynamicznych. W poszczególnych bryłach modelu geometrycznego, odzwierciedlających części układu podwozia, zdefiniowano siatki elementów skończonych, modele materiałów oraz odpowiednie typy i właściwości elementów skończonych, odpowiadające modelowanym podzespołom.

Rozważanym podzespołom układu fizycznego podwozia z wyjątkiem opony nadano charakterystyki materiałowe odpowiadające w większości dwóm materiałom: stali 30HGSNA i stali 30HGSA. Stale te stosuje się na konstrukcje wysoko obciążone m.in. w lotnictwie. Parametry mechaniczne stali przyjęto na podstawie norm: dla stali 30HGSNA: PN-69/H-94010, PN-72/H-84035, dla stali 30HGSA: wg PN-89/H-84030.

Charakterystyka materiału zastosowanego w modelu numerycznym opony koła podwozia głównego odpowiada modelowi fizycznemu opony firmy BARUMTECH o rozmiarach: 720x310, Model Y Tubless – z ciśnieniem napełnienia $P_{op} = 0,55\text{MPa}$. Dla elementów skończonych opisujących gumę opony przyjęto model materiałowy Mooney’a-Rivlina, dostępny w bibliotekach kodu LS-Dyna [8]. Ten model materiału gumy pozwala uzyskiwać poprawne wyniki w zakresie dużych przemieszczeń i deformacji, dotyczących opony.

Elementy bryłowe typu HEX8 zastosowano do modelowania następujących podzespołów układu podwozia: dźwigni dolnej i górnej goleni podwozia, łącznika wahacza wraz z przegubami kulistymi – bieżniami łożysk i sworzniami, tłoczyska amortyzatora wraz z pierścieniami i z trzonem mocowania do łącznika, tulei amortyzatora, osi koła ze sworzniem mocowania do dźwigni goleni, piasty koła podwozia, statora oraz rotora hamulca, a także opony – rys. 2.



Rys. 2. Model numeryczny MES podwozia
Fig. 2. Numerical FEM model of the landing gear

W modelu kompletnego układu podwozia zastosowano 73146 elementów skończonych typu HEX8. Kompletny model układu podwozia wraz z kołem zawiera 98009 węzłów, 2760 elementów powłokowych typu QUAD4 oraz 120 elementów MPC. Elementy powłokowe użyto do odwzorowania wewnętrznej powierzchni opony. We wnętrzu modelu opony ograniczonym tą powierzchnią zdefiniowano AIRBAG [8]. Jego zadaniem jest odwzorowanie w modelu numerycznym oddziaływania gazu sprężonego we wnętrzu koła. Model poduszki powietrznej pozwala na kontrolę objętości wewnętrznej koła i bazuje na teorii Green’a [8]. W modelu analizuje się pewną zamkniętą objętość, która jest określona przez elementy powierzchniowe, dla których sprawdzane jest położenie i orientacja w każdym kroku obliczeń.

Układ sprężysto – tłumiący amortyzatora zastąpiono dwuwęzłowym elementem sprężysto – tłumiącym o liniowej charakterystyce. Metodę doboru charakterystyki zastępczej tego elementu omówiono szczegółowo w pracy [9].

3. Analiza numeryczna podwozia głównego i wnioski

Badania dynamiki podwozia metodą elementów skończonych [8] prowadzono według algorytmu typu *explicit*. Dla badanego układu tworzone są macierze bezwładności, sztywności i tłumienia a następnie rozwiązuje się równania ruchu w postaci macierzowej (1):

$$M \ddot{d} + C \dot{d} + Kd = R, \quad (1)$$

gdzie:

M – macierz bezwładności modelu dyskretnego,

K – macierz sztywności modelu dyskretnego,

C – macierz tłumienia modelu dyskretnego,

R – wektor sił zewnętrznych,

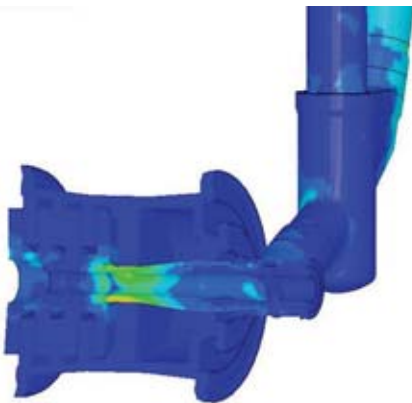
d – współrzędne uogólnione.

Całkowanie równanie ruchu w postaci (1) w metodzie bezpośredniej realizowane jest krok po kroku. Termin ‘całkowanie bezpośrednie’ oznacza, że równanie to nie jest przekształcane do innej postaci (w odróżnieniu od metody superpozycji modalnej). Istotą metody całkowania bezpośredniego jest założenie, że równanie ruchu ma być spełnione w wybranych chwilach t , a nie w całym przedziale całkowania oraz założenie o charakterze zmienności przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń pomiędzy tymi chwilami. Metoda ta [8] należy do jednej z najbardziej efektywnych metod tej grupy. Rozwiązanie numeryczne równania (1) odbywa się według zależności (2):

$$\frac{1}{\Delta t^2}(d_{t-\Delta t} - 2d_t + d_{t+\Delta t})M + \frac{1}{2\Delta t}(d_{t-\Delta t} + d_{t+\Delta t})C + Kd_t = R_t, \quad (2)$$

Z równania tego określany jest stan przemieszczeń w chwili $t+\Delta t$, czyli $dt+\Delta t$. Zaletą takiej metody jest to, że w procesie rozwiązywania równania (2) nie wymaga się odwracania macierzy sztywności K .

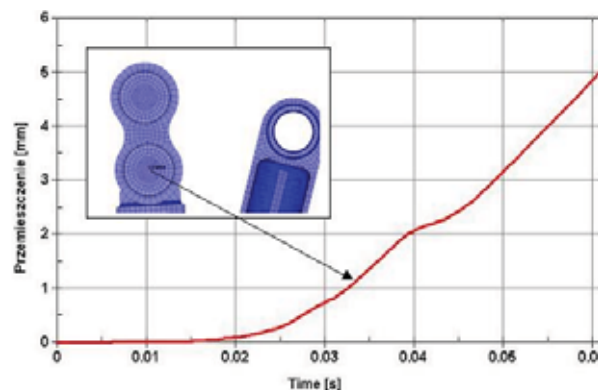
a)



b)



c)



Rys. 3. Wybrane wyniki testu numerycznego
Fig. 3. Chosen results of the numerical test

Opisana procedura cechuje się krótkim krokiem całkowania i nie wymaga stosowania operacji iteracyjnych w celu uwzględnienia nieliniowości modelu. Pozwala to na znaczące zredukowanie kosztów numerycznych rozwiązania, co ma szczególne znaczenie przy analizach z zastosowaniem

złożonych modeli, takich jak prezentowany model podwozia głównego.

Omówiony algorytm obliczeniowy zaimplementowano w symulacji wybranego wariantu przyziemienia podwozia głównego. Celem wykonanej analizy jest walidacja zbudowanego modelu numerycznego, ocena jego przydatności i ewentualne określenie modyfikacji koniecznych do wykonania przewidywanych badań numerycznych podwozia zmierzających do określenia jego trwałości. W teście numerycznym odwzorowano współpracę elementów w modelu podwozia poddanego działaniu ciśnienia o wartości zastępczej. Ciśnienie przyłożono do opony koła podwozia w strefie styku pneumatyka z gruntem. W modelu podwozia wprowadzono warunki brzegowe odpowiadające realizowanemu wariantowi testu numerycznego. Więzy zewnętrzne w postaci podpór przegubowych nieprzesuwnych wprowadzono w węzłach mocowania podwozia (węzły centralne na powierzchniach bocznych sworzni górnej i tulei dźwigni górnej – rys. 1) do struktury kadłuba samolotu. Wybrane wyniki testu numerycznego zamieszczono na rys. 3.

W wyniku realizacji testów numerycznych uzyskano szereg danych opisujących zjawiska współpracy poszczególnych podzespołów podwozia w obszarach kontaktu. Dotyczy to zarówno kinematyki jak i dynamiki badanej konstrukcji. Dystrybucja naprężeń w obszarach kontaktu powierzchniowego połączeń pomiędzy poszczególnymi podzespołami, zobrazowana na rys. 3a i 3b w początkowej fazie trwania testu, potwierdza poprawność funkcjonalną zastosowanego modelu. Otrzymane wyniki testów numerycznych upoważniają do stwierdzenia, że omówiony w pracy model 3D podwozia głównego może być z powodzeniem zastosowany w dalszych badaniach, zmierzających do oszacowania stopnia niezawodności układu oraz modernizacji jego geometrii.

Podziękowanie

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego 4T12C06829 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji.

Literatura

- [1] FAR-23, *Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic and Commuter Category Airplanes* 1966.
- [2] MIL 008866B, *Airplane damage tolerance requirements*, U.S. Air Force, 1987.
- [3] Małachowski, J., Krasoń, W., Budzyński, A., *Badanie numeryczne zjawiska drgań samowzbudnych w podwoziu samolotu transportowego*, NIT. Nauka, Innowacje, Technika, Nr 3/2005 (10), str. 38-43, 2005.
- [4] Rogers L. C., *Theoretical tire equations for shimmy and other dynamic studies*, Journal of Aircraft, Vol.9, No.8, 1972.
- [5] Kaplan, M. P., Wolff, T. A., *Damage tolerance assessment of CASA, landing gear*. Willis & Kaplan Inc, 2002.
- [6] Niezgoda, T., Małachowski, J., Krasoń, W., *Strength analysis of transport aircraft's landing gear*, Transactions of the Institute of Aviation, No 170-171/2002, pp. 42-48, 2002.
- [7] Pritchard J. I., *An overview of landing gear dynamics*, NASA/TM-1999-209143, ARL-TR-1976, 1999.
- [8] Hallquist, J. O., *LS-Dyna. Theoretical manual*, California Livermore Software Technology Corporation 1998.
- [9] Kajka R., Krasoń W., Małachowski J., „Dobór zastępczej charakterystyki dynamicznej podwozia samolotu transportowego”, ‘Górnictwo Odkrywkowe’ - Czasopismo naukowo techniczne, Nr 5-6, Rocznik XLVIII, Wrocław 2006.