

I Krajowa Konferencja Naukowa
Szybkie prototypowanie
Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
RAPIDROM

Wybrane zagadnienia projektowania prototypowych przekładni stożkowych dla przemysłu lotniczego

Selected topics of design of the bevel gear prototypes for aviation industry

ADAM MARCINIEC
 MIECZYŚLAW PŁOCICA*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.572

W artykule opisano zagadnienia związane z projektowaniem nowych przekładni stożkowych, przeznaczonych dla lotnictwa. Podano przykłady wykorzystania środowiska wirtualnego do symulacji procesów obróbki członów przekładni oraz współpracy pary zębatej. Określono podstawowe cele badań stanowiskowych prototypowych przekładni.

SŁOWA KLUCZOWE: przekładnie stożkowe, symulacja obróbki, projektowanie

The article describes the issues related to the design of new bevel gears for aviation industry. There are presented some examples of the virtual environment using to cutting simulation of the gear members and analysis its cooperation. They were defined basic targets of stand tests of transmission prototypes.

KEYWORDS: bevel gears, cutting simulation, design.

Zastosowanie przekładni stożkowych w przemyśle lotniczym obejmuje zarówno układy napędowe śmigłowców jak i płatowców. Stosując kryterium warunków pracy można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje przekładni stożkowych lotniczych: przekładnie wysoko obciążone, przenoszące duży moment obrotowy przy relatywnie małych obrotach (np. przekładnie wirnika głównego śmigłowców) oraz przekładnie szybkoobrotowe, pracujące przy obrotach rzędu 25000 obr/min i przenoszące małe moce (przekładnie napędu skrzynki agregatów) [15].

Nowo projektowanym przekładniom lotniczym stawia się wysokie wymagania odnośnie sprawności i trwałości oraz zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania. Aktualne ocze-

kiwania przemysłu lotniczego kierują się w stronę stałego zmniejszania strat w przekładni, głównie spowodowanych wymianą ciepła. W stosunku do nowych konstrukcji formułowane są dodatkowo np. postulaty poprawnej pracy przy krótkotrwałym zaniku smarowania.

Koła zębate projektuje się w lotnictwie z założeniem nieograniczonej żywotności części. Oznacza to, że przekładnia ma być trwała w całym zakresie użytkowania statku powietrznego i jedynie podlegać weryfikacji podczas kolejnych remontów. Dlatego podczas projektowania przekładni dąży się do jej wszechstronnego sprawdzenia przed przekazaniem dokumentacji do produkcji. Szczególnie rozbudowane są analizy w środowiskach CAD i MES, a także z wykorzystaniem specjalistycznych programów do oceny właściwości dynamicznych przekładni.

Modelowanie uzębień

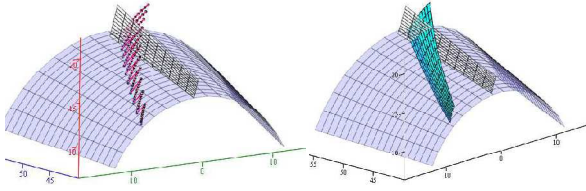
Współcześnie praktykuje się najczęściej dwa sposoby modelowania powierzchni bocznych zębów kół stożkowych. Pierwszy opiera się na matematycznym modelu symulacji obróbki w zadanym układzie technologicznym, w którym powierzchnia boku zęba powstaje jako obwiednia rodziny powierzchni działania narzędzia. Równanie powierzchni bocznej zęba wyznacza się z układu równań, zawierającego równanie rodziny powierzchni działania narzędzia oraz równanie zazębienia [4,9]:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1(s_t, \theta_t, \psi_t) \\ \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{v}_1^{t1}(s_t, \theta_t, \psi_t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

gdzie $\mathbf{r}_1(s_t, \theta_t, \psi_t)$ - funkcja wektorowa określająca rodzinę powierzchni działania narzędzia w układzie związanym z obrabianym zębnikiem (S_1), \mathbf{n}_1 - jednostkowy wektor normalny określony w S_1 , $\mathbf{v}_1^{t1}(s_t, \theta_t, \psi_t)$ - wektor prędkości względnej, określony w S_1 .

* dr hab. inż. Adam Marciniak, prof. PRz amarc@prz.edu.pl,
 dr inż. Mieczysław Płocica mplocica@prz.edu.pl

Zagadnienie generowania uzębienia z użyciem modelu matematycznego szczegółowo omówiono w pracy [9]. Siatka punktów reprezentujących powierzchnię boku zęba powstaje jako zbiór rozwiązań numerycznych układu równań (1), uzyskanych w oparciu o siatkę odniesienia, zdefiniowaną w przekroju osiowym w granicach czynnej powierzchni boku zęba (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowa siatka odniesienia i punkty siatki boku zęba. Źródło: [12]

Na podstawie wyznaczonych punktów siatki rozpiętej na boku zęba wyznacza się równanie aproksymowanej powierzchni w postaci b-spline, które jest niezbędne do dalszych analiz [9].

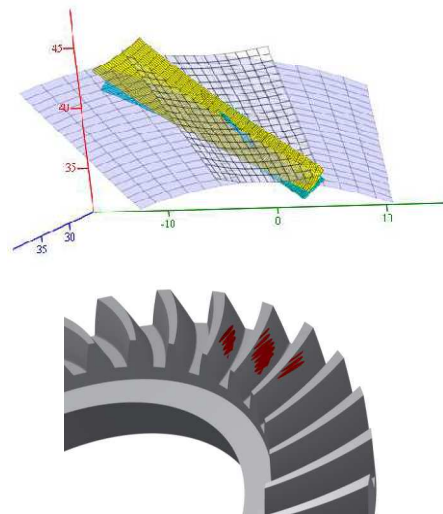
Drugi ze sposobów generowania boku zęba polega na opracowaniu symulacji nacinania uzębienia na modelach bryłowych w systemie CAD, z wykorzystaniem wyników obliczeń technologicznych (tzw. summary). Znanych jest wiele autorskich aplikacji, opracowanych z użyciem różnych języków programowania i w różnych programach CAD [11,13]. Otoczka obrabianego koła oraz bryła narzędzia są zazwyczaj generowane automatycznie w oparciu o wczytaną geometrię ich przekrojów osiowych. Następnie bryły są ustawiane w położeniu nacinania. W symulacji bryłowej wręb powstaje jako efekt odjęcia interferującej objętości narzędzia od otoczki, przy czym koło obrabiane ustawia się od razu w położeniu osiągnięcia dna wrębu przez narzędzie. W przypadku obróbki obwodniowej odtaczanie jest realizowane z zadaniem krokiem dyskretnym. Powstały wręb jest zazwyczaj kopiowany wokół osi otoczki (zamiast wielokrotnego powtarzania symulacji nacinania) dla uzyskania efektu nacięcia wszystkich zębów.

Analiza wskaźników jakości pracy

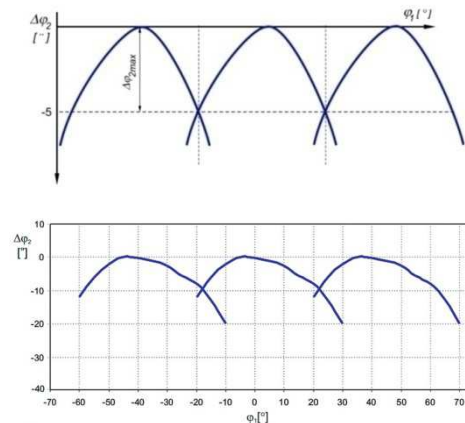
W przekładniach projektowanych dla przemysłu lotniczego zasadniczy nacisk kładzie się na realizację poprawnego sumarycznego śladu współpracy, którego położenie, kształt i wielkość określa się zależnie od przeznaczenia przekładni. Decydującym kryterium kształtowania śladu współpracy jest zazwyczaj wytrzymałość uzębienia, ponadto należy zwrócić uwagę na wrażliwość zaprojektowanej geometrii uzębienia na błędy montażowe [3]. W lotnictwie mniejszą uwagę przywiązuje się do hałasu generowanego przez zazębienie i będącego w znacznej części pochodną dokładności kinematycznej przekładni. Podejście takie wynika z pracy przekładni w otoczeniu innych komponentów napędu, generujących wielokrotnie większy hałas niż zazębienie stożkowe. Od lotniczej przekładni stożkowej wymaga się, aby przebieg wykresu przekazywania ruchu był łagodny, a maksymalna odchyłka ruchu członu biernego nie przekraczała 10 sekund kątowych [4].

Sprawdzenie współpracy na modelu konstrukcyjnej pary stożkowej służy przede wszystkim ocenie sumarycznego śladu współpracy bez obciążenia (TCA) i pod obciążeniem (LTCA), a także wyznaczeniu ścieżek styku na bokach zębów członów pary oraz linii przyporu w przestrzemi zazębie-

nia. Ocenę śladu prowadzi się dla strony czynnej i biernej zazębienia.



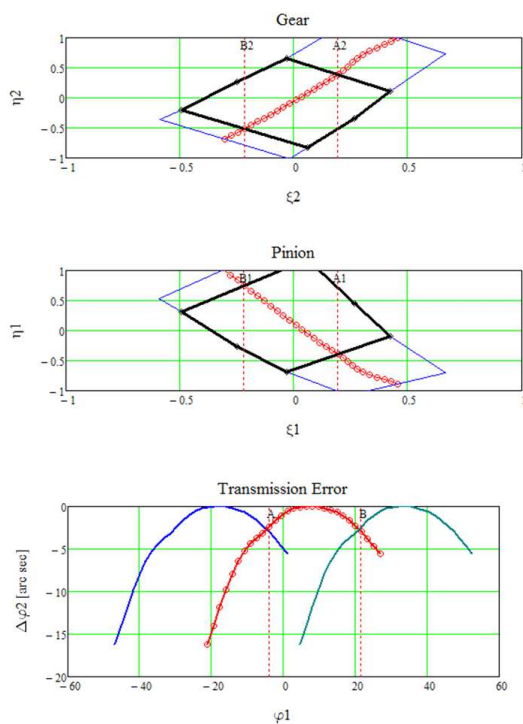
Rys. 2. Przykładowe wizualizacje chwilowego śladu styku i sumarycznego śladu współpracy na modelach wirtualnych. Źródła: [12,13]



Rys. 3. Przykładowe wykresy dokładności kinematycznej, uzyskane w różnych programach. Źródła: [8, 5]

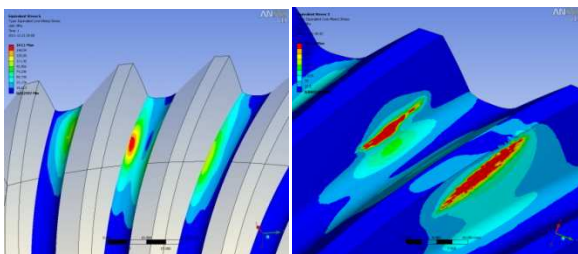
Na rys. 4 przedstawiono wygenerowane w autorskim programie TCA ścieżki styku (kolor czerwony) na współpracujących powierzchniach bocznych zębów koła i zębniaka. Kolorem czarnym oznaczono obszar sumarycznego śladu współpracy, odpowiadający przenoszeniu obciążenia przez analizowaną parę zębów. Kolor niebieski oznacza obszar współpracy, w którym para wchodzi i wychodzi z zazębienia.

Ocena śladu współpracy pod obciążeniem, na modelu podatnym w środowisku MES, pozwala wnioskować o nośności przekładni oraz wykryć na etapie jej projektowania ewentualne nieprawidłowości, polegające na zaistnieniu styku w niedozwolonych obszarach zazębienia. Norma ISO 10300 stawia następujące wymagania w zakresie powierzchni styku: 85 do 95% szerokości wieńca z wykluczeniem kontaktu na jego krawędziach oraz od 85 do 95% wysokości czynnej zęba z wykluczeniem współpracy krawędziowej przy wierzchołkach zębniaka i koła. Z uwagi na warunki pracy przekładni i dynamikę innych komponentów zespołu napędowego są to wymagania trudne do spełnienia w praktyce. Mają na to wpływ m.in. odkształcenia wałów i korpusów oraz różnice temperatury między elementami zespołu przekładniowego w warunkach eksploatacji podczas lotu.



Rys. 4. Wygenerowany sumaryczny ślad współpracy zazębienia (strona czynna) oraz wykres kinematyczny przekładni

Środowisko MES pozwala na przeprowadzenie oceny stanu naprężeń w przekładni pod przewidywanym obciążeniem roboczym. Metody numeryczne, zastosowane do przekładni stożkowych o zębach łukowych, dają satysfakcjonujące wyniki. Należy zauważyć, że otrzymywane wartości naprężeń są zazwyczaj nieco niższe od obliczonych z wykorzystaniem norm branżowych, np. AGMA.



Rys. 5. Naprężenia u podstawy zęba pochodzące od jego zginania oraz naprężenia stykowe na bokach zęba otrzymane w programie ANSYS. Źródło: [14]

Oprócz analiz MES celowe jest, przed fizycznym wykonaniem prototypowej przekładni, określenie jej właściwości dynamicznych na modelu, co jest realizowane z użyciem specjalistycznych programów lub modułów dedykowanych systemom inżynierskim (np. RecurDyn dla systemu CATIA).

Zagadnienia wykonawcze i pomiarowe

Prototypowe pary stożkowe, przeznaczone do badań wytrzymałości zmęczeniowej, powinny być wykonane z docelowego materiału oraz ściśle według technologii zaplanowanej dla produkcji seryjnej. Wynika to z faktu, że geometria kół i przekładni jest bezpośrednim wynikiem przyjętej metody obróbki. Wytrzymałość zmęczeniowa przekładni zależy zarówno od materiału, jak i parametrów obróbki cieplnej, cieplno-chemicznej (jeśli jest przewidziana), rodzaju obróbki wykończeniowej i uzyskanej chropowatości, a także np. od wielkości naprężeń resztkowych, będących efektem całego procesu produkcyjnego.

W lotniczej produkcji seryjnej, z uwagi na wysokie klasy dokładności wykonania, można zaobserwować różnice we właściwościach kół, wykonanych z materiału o tym samym symbolu, ale z różnych wytopów. M. in. z tego względu celowe jest prowadzenie badań prototypowych przekładni lotniczych z uwzględnieniem zagadnień statystycznych. Wymaga to wykonania par stożkowych w liczbie odpowiadającej obliczonej minimalnej liczbie próby.

Koła przekładni lotniczych powinny być wykonane w 4-5 klasie dokładności. Klasa ta jest określana w oparciu o pomiary następujących parametrów: największa odchyłka podziałki, największa różnica sąsiednich podziałek, odchyłka sumaryczna podziałek i odchyłka bicia promieniowego. Pozostałe wielkości geometryczne uzębienia nie są definiowane co do klasy, tj. mają tolerancję swobodną [10].

W procesie technologicznym zęby zębniaka i koła stożkowego o kołowej linii zęba nacinane są względem dwóch ustalających elementów geometrycznych:

- rzeczywistej osi obrotu elementu nacinanego,
- powierzchni bazowej, od której odmierzana jest odległość montażowa (mounting distance MD).

Dla zachowania poprawności metrologicznej, użyty podczas pomiaru na współrzędnościowej maszynie pomiarowej układ współrzędnych powinien być oparty na tych samych elementach odniesienia, czyli powierzchni bazowej oraz dwóch powierzchniach walcowych, wyznaczających oś koła zębatego. Przy pomiarze kół stożkowych o kołowej linii zęba, ze względu na skomplikowaną geometrię uzębienia, oprócz standardowo wymaganych charakterystyk pomiarowych wykonuje się pomiar topografii zębów, pozwalający na identyfikację odchyłek geometrii na boku zęba, przez porównanie z wczytanym wzorcem. Wprowadzenie korekt do geometrii nacinanego koła pozwala na obserwację zmian dopasowania nowej siatki boku zęba do wzorca oraz na automatyczną aplikację nowych ustawień na obrabiarkę, o ile pracuje ona w sprzężeniu zwrotnym z maszyną pomiarową.

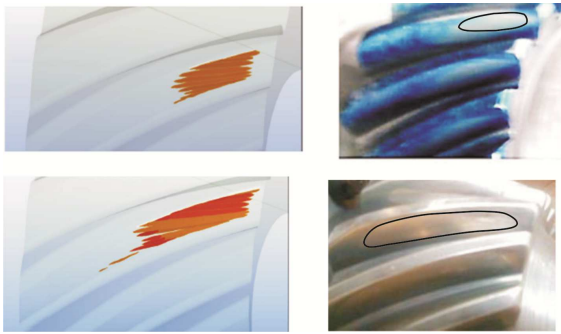
Badania stanowiskowe prototypów

Normy odbioru przekładni w przemyśle lotniczym wymagają ich przebadania na kompletnych zespołach przekładniowych, przeznaczonych do montażu w statkach powietrznych. Niektóre z takich zespołów posiadają rozszerzone wyposażenie pomiarowe i spełniają dodatkową rolę jako urządzenia do testów, mających służyć rozwojowi wiedzy w zakresie konstruowania nowych przekładni stożkowych. Oddzielną grupą są specjalne stanowiska badawcze (ang. test rig), przeznaczone wyłącznie do badań w warunkach laboratoryjnych.

Podstawową funkcją stanowisk badawczych jest test współpracy jednostronnej z wyznaczeniem śladu współpracy bez obciążenia i pod obciążeniem oraz określenie błędów kinematycznych przekładni (wykres nierównomierności przekazywania ruchu). Dalsze możliwości pomiarowe zależą od zainstalowanych układów pobierania danych oraz oprogramowania. Badania nowo zaprojektowanych par stożkowych na stanowiskach testowych służą przede wszystkim:

- weryfikacji rezultatów otrzymanych na modelach opracowanych w środowiskach CAD i MES (sumaryczny ślad współpracy, dokładność kinematyczna, wartości naprężeń),
- ocenie wytrzymałości zmęczeniowej przekładni na różne postacie zużycia (pitting, scoring, złamanie u podstawy zęba),

- określeniu częstości drgań własnych przekładni, częstości rezonansowych oraz ustaleniu zakresów prędkości, odpowiadających spokojnej pracy przekładni [1,2,7].



Rys. 6. Porównanie śladu współpracy pod lekkim i pełnym obciążeniem uzyskanego na modelu w programie ANSYS oraz na kontrolerze w warstwie tuszu (ślady pod lekkim obciążeniem) i na stanowisku testowym pod pełnym obciążeniem (czarną linią oznaczono kontur śladu). Źródło: [14]

Możliwości nowoczesnych stanowisk pozwalają na wszechstronne przebadanie nowych konstrukcji, w warunkach laboratoryjnych, pod względem ich nośności, emisji drgań i jakości pracy. Możliwe jest doświadczalne wyznaczenie naprężeń u podstawy zęba (z użyciem systemu telemetrii, pracującego w trybie dynamicznym), pochodzących od zginania oraz wyznaczenie współczynników wytrzymałościowych i dynamicznych dla konkretnej przekładni, przez co można precyzyjnie określić jej nośność i trwałość niż na podstawie naprężeń obliczeniowych. Dokładne wyznaczenie naprężeń dopuszczalnych umożliwi w efekcie obniżenie masy projektowanej przekładni (do obliczeń przyjmuje się wartości wyznaczone, a nie graniczne, podawane przez literaturę). Dodatkowo na stanowiskach testowych prowadzi się m.in. badania właściwości nowych środków smarujących przekładnię, wyznaczając stopień obciążenia niszczącego, powodującego określone rodzaje zużycia w zadanym czasie, w przekładni smarowanej badanym olejem. Dla zwiększenia odporności na zużycie testuje się przekładnie z zastosowaniem pokryć powierzchni bocznych zębów różnego rodzaju powłokami [6].

Wnioski

W przemyśle lotniczym dąży się do przeniesienia do środowiska wirtualnego jak największego zakresu czynności związanych z projektowaniem nowych przekładni. Ma to istotne znaczenie praktyczne, ponieważ wiąże się ze znacznym skróceniem czasu projektowania i wdrażania do produkcji nowego rozwiązania konstrukcyjnego.

Matematyczny i numeryczny zapis powierzchni bocznych zębów członów pary stożkowej umożliwia przeprowadzenie analiz kontaktu i dopracowanie geometrii uzębienia i zazębienia oraz ustawień obrabiarki przed wykonaniem fizycznej przekładni. Powszechność systemów CAD sprawia, że konstruktorzy chętnie korzystają z oryginalnych aplikacji do symulacji nacinania uzębienia, przede wszystkim metodą bryłową. Aplikując wygenerowane programowo ustawienia obrabiarki do modelu obróbki otrzymuje się powierzchnie boczne zębów zębniaka i koła, które zestawione w model pary konstrukcyjnej (idealny bądź uwzględniający odchyłki) służą do sprawdzenia wskaźników jakości współpracy zazębienia oraz wszechstronnej oceny zaprojektowanej przekładni. Niezbędne uzupełnienie analiz na modelach sztywnych stanowią badania modeli odkształcalnych w środowisku MES, gdzie symuluje się współpracę zazębienia

pod obciążeniem i wyznacza obszar tej współpracy oraz występujące w nim naprężenia i odkształcenia.

Wyniki stanowiskowych badań wytrzymałościowych służą do weryfikacji rozważań na modelach wirtualnych oraz do optymalizacji konstrukcji, szczególnie pod względem masy. Aktualne możliwości badań stanowiskowych pozwalają na formułowanie rozbudowanych programów badawczych i wielokierunkowe doskonalenie konstrukcji stożkowych przekładni lotniczych.

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr PO-IG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

1. Fan Y.S., Wang S.M., Yang Z. "Dynamic characteristics of the Coupled System of the High Pressure Rotor and the Radial Driveshaft of a Turbofan Engine". *Advanced Materials Research*, Vols 44-46 (2008), str. 127-134
2. Feng L., Liu Y., Xie W., Huang J. "Dynamic Contact Simulation Analysis of Spiral Bevel Gear Based on ANSYS/LS-DYNA". *Advanced Materials Research*, Vols 912-914 (2014), str. 649-652
3. Liu GR., Zhang R., Zhao N. "Quantitative of the influence of Installation Errors on the Contact Pattern of Spiral Bevel Gears". *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 86 (2011), str. 278-282
4. Marciniak A. „Analiza i synteza ząbów przekładni stożkowej o kołowo-lukowej linii zęba”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2001
5. Marciniak A., Sobolewski B. „Zastosowanie systemu Autodesk Inventor do symulacji współpracy przekładni stożkowych Gleasona”. *Mechanik* nr 1/2012.
6. Michalczyński R., Kalbarczyk M., Tuszyński W., Szczerek M. "The Scuffing Resistance of WC/C Coated Spiral Bevel Gears". *Key Engineering Materials*, Vol. 604 (2014), str. 36-40.
7. Mueller L. "Przekładnie zębate". Dynamika. WN-T, Warszawa 1986
8. Pisula J., Płocica M. "Guidelines for the quality development of aircraft bevel gears. Aircraft Engineering and Aerospace Technology". Vol. 87, Issue 2, pp. 110-119, Emerald Group Publishing Limited, ISSN: 0002-2667
9. Pisula J., Płocica M.: "Matematyczny model generowania powierzchni bocznej zęba zębniaka przekładni stożkowej na maszynie 116G". XVII Konferencja „Metody i środki projektowania wspomagane komputernie”, Krasiczyn 7-9 października 2009
10. Pisula J., Płocica M. „Ocena jakości wykonania uzębienia stożkowej przekładni lotniczej z użyciem współrzędnościowej techniki pomiarowej”. *Logistyka* nr 6/2014, str. 8697-8704
11. Siemiński P., Skawiński P. „Generowanie modeli bryłowych zębniaków przekładni kształtowo-obwiedniowych w naturalnych układach technologicznych”. Krasiczyn 7-9 października 2009
12. Skawiński P., Marciniak A., Pisula J., Płocica M., Kuryjański R., Siemiński P. "Comparative analysis of numerical and experimental methods for determining the contact pattern of aircraft bevel gears". 9th AIRTEC 2014 INTERNATIONAL CONGRESS, Frankfurt, 28th - 30th October 2014.
13. Sobolewski B., Marciniak A. "Method of spiral bevel gear tooth contact analysis performed in CAD environment". *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. Vol. 85 Iss: 6, (2013) pp.467 – 474
14. Sowa J. „Analiza wytrzymałościowa lotniczych przekładni stożkowych o kołowo-lukowej linii zęba”. Praca doktorska, Rzeszów 2014 (materiał niepublikowany).
15. Zeyong Y., Bibo F., Tongbo X., Yonghong W., Jie G. "Development of Helicopter Power Transmission System Technology". *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 86 (2011), str. 1-17