

Andrzej SZELMANOWSKI, Ewa SZELMANOWSKA, Mariusz GARBACZ

KOMPUTEROWE MODELOWANIE ZJAWISKA DEZORIENTACJI PRZESTRZENNEJ LOTNICZEGO SYSTEMU NAWIGACJI INERCJALNEJ I UKŁADU BŁĘDNIKA PILOTA W MOBILNYCH SYMULATORACH LOTU

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki prac realizowanych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych i Wyższej Szkole Oficerskiej Sił Powietrznych w zakresie opracowania metod oceny ruchu przestrzennego wytwarzanego w mobilnych symulatorach lotu w zakresie wywoływania u pilota zjawiska dezorientacji przestrzennej. Wykazano, że zjawisko fałszywego określania położenia przestrzennego dotyczy zarówno sztucznych systemów pomiarowych (systemów orientacji przestrzennej i nawigacji inercjalnej), jak i układów biologicznych (narządów sensorycznych w błędniku pilota samolotu myśliwskiego). Zaprezentowano modele matematyczne funkcjonowania układu wyznaczania orientacji przestrzennej w systemie nawigacji inercjalnej oraz układu wykrywania ruchu głowy w narządach sensorycznych błędnika pilota. Podano zastępcze schematy obliczeniowe, opracowane dla tych układów, wykorzystywane do określania ich błędów w zakresie wyznaczania orientacji przestrzennej przy wymuszeniu stałą prędkością obrotu oraz zmienną prędkością kątową występującą w ruchu stożkowym. Wybrane rodzaje tych ruchów są wykorzystywane w mobilnych symulatorach lotu do badań podatności pilotów i kandydatów na występowanie zjawiska dezorientacji przestrzennej w warunkach złożonego ruchu przestrzennego.

WSTĘP

Jednym z głównych czynników mogących znacząco wpływać na pracę pilota współczesnego samolotu myśliwskiego w sposób negatywny jest zjawisko dezorientacji przestrzennej. Występuje ono w warunkach złożonego ruchu przestrzennego np. podczas wykonywania figur wyższego pilotażu. Pierwszymi, łagodnymi objawami utraty orientacji przestrzennej u pilota są błędne oceny położenia kąтового własnego ciała i statku powietrznego, trudności z ustaleniem położenia „górną-dół” oraz kierunku obrotu „lewo-prawo”. W „deficycie czasu”, w sytuacjach krytycznych, dochodzi w świadomości pilota do powstawania niepewności w określeniu położenia przestrzennego (tzw. iluzji), stanów lękowych, a w połączeniu z przeciążeniem nawet do utraty przytomności. Do badania podatności pilota na wpływ objawów zjawiska dezorientacji przestrzennej służą m.in. stacjonarne fotele obrotowe, wieloosiowe koła obrotowe (tzw. żyroskopy) oraz mobilne symulatory lotu [1].

Jednym z takich właśnie, nowoczesnych symulatorów mobilnych jest symulator ETC-PZL, stosowany w Wyższej Szkole Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie od 2013 roku. Symulator ten (fot. 1.) jest wykorzystywany do badania i treningu zachowań pilota w złożonym ruchu przestrzennym, podczas realizacji zadań pilotowania wirtualnego statku powietrznego i wykonywania obliczeń nawigacyjnych w warunkach oddziaływania efektów dezorientacji przestrzennej [2]. Mobilny symulator lotu ETC- PZL służy do imitacji objawów zaburzenia orientacji przestrzennej (iluzji) u kandydatów na pilotów (wstępna selekcja), a także do treningu w celu minimalizacji różnicy w reakcji pilota pomiędzy rzeczywistymi a symulowanymi zewnętrznymi bodźcami powodującymi utratę orientacji przestrzennej. Warunki takiego ruchu występują w czasie lotu manewrowego samolotów myśliwskich F-16 i MiG-29, ale również samolotów transportowych M-28 Bryza i śmigłowców W-3PL Głuszec, dla których to statków powietrznych symulator jest dedykowany.

Podczas lotu mogą wystąpić różne rodzaje iluzji dezorientacyjnych [2] w zależności od sposobu odbioru i oddziaływania bodźców zewnętrznych na zmysły pilota.



Fot. 1. Widok mobilnego symulatora lotu ETC-PZL wraz z podglądem czynności wykonywanych przez pilota na monitorze dodatkowego stanowiska kontrolnego [materiał ITWL/WSOSP, 2015]

Wyróżnia się iluzje wzrokowe (autokineza, iluzja wekcji, iluzja fałszywego horyzontu), iluzje związane z kanałami półkolistymi (iluzja Coriolisa, iluzja przechylenia, iluzje somatobrotowe) oraz iluzje związane z narządami otolitowymi przedsionka (iluzje okulo-grawitacyjne i somatograwitacyjne, iluzja odwrócenia). Działanie symulatora mobilnego polega na wytworzeniu takich warunków ruchu przestrzennego, które prowadzą do powstawania u pilota iluzji dezorientacyjnych. W zależności od pożądanego stanu danej iluzji operator w czasie treningu przyspiesza (do $60^\circ/s^2$) lub powoduje opóźnienie (do $-15^\circ/s^2$) ruchu obrotowego kabiny symulatora. Niezależnie od ruchu obrotowego kabiny, operator wprowadza tzw. efekty aktywne polegające na rzeczywistej i dynamicznej zmianie warunków środowiska np. pogody, pory doby, parametrów lotu czy też imituje awarię (usterkę) wybranych przyrządów pokładowych. Zjawiska te, w zależności od stopnia natężenia, decydują o szybkości utraty orientacji przestrzennej przez pilota, co prowadzi do tak groźnych sytuacji, jak brak poczucia pozycji horyzontalnej i kierunku

„góra-dół” czy też kierunku lotu i miejsca znajdowania się statku powietrznego w przestrzeni (fot. 2.).



Fot. 2. Widok zobrazowania wirtualnego otoczenia statku powietrznego i przyrządów lotniczych prezentowanych pilotowi w mobilnym symulatorze lotu ETC-PZL oraz parametrów wytwarzanego w nim ruchu przestrzennego [materiał ITWLWSOSP, 2015]

Mobilny symulator lotu ETC-PZL jest bardzo ważnym narzędziem w szkoleniu pilotów, ponieważ dzięki niemu pilot siedzący za sterami wysoko manewrowego statku powietrznego (samolotu bądź śmigłowca) będzie potrafił rozpoznać pierwsze oznaki iluzji, a przez to przeciwdziałać zjawisku utraty orientacji przestrzennej, zagubienia się w terenie oraz uniknąć ewentualnej katastrofy.

Jednym z głównych problemów naukowych-technicznych, występujących w badaniach zjawiska dezorientacji przestrzennej jest opracowanie metod oceny skuteczności wytwarzanego ruchu przestrzennego w zakresie wywoływania u pilota efektu utraty orientacji przestrzennej. Prace realizowane w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych wykazały, że zjawisko fałszywego określania położenia przestrzennego dotyczy także mechanicznych systemów pomiarowych m.in. sztucznych horyzontów, układów odniesienia kursu i pionu oraz systemów nawigacji inercyjnej i orientacji przestrzennej [3, 4]. Do badań rzeczywistych błędów systemów mechanicznych wykorzystywane są specjalistyczne stanowiska obrotowe, wytwarzające złożone rodzaje ruchu przestrzennego. Jednak do wstępnej oceny tych błędów wykorzystywane są symulacje komputerowe, które służą do weryfikacji modeli matematycznych pracy układu orientacji przestrzennej w systemach nawigacji inercyjnej.

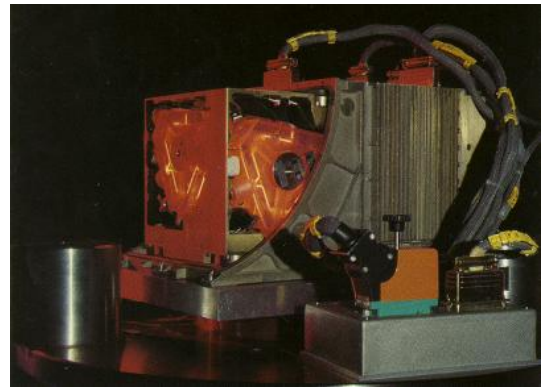
Jednym z ciekawych rodzajów ruchu przestrzennego jest ruch stożkowy, w którym jak wykazały badania [5, 6] błędy systemów nawigacji inercyjnej narastają najszybciej. Dla takiego wymuszenia zostały zaprezentowane w pracy wstępne modele funkcjonowania układu wykrywania ruchu głowy w narządach błędnika pilota i układu pomiarowego w systemach nawigacji inercyjnej oraz schematy obliczeniowe, wykorzystywane do określania błędów wyznaczania orientacji przestrzennej.

1. PODSTAWY FIZYCZNE WYSTĘPOWANIA ZJAWISKA DEZORIENTACJI PRZESTRZENNEJ W SYSTEMIE Nawigacji INERCJALNEJ I Błędniku PILOTA

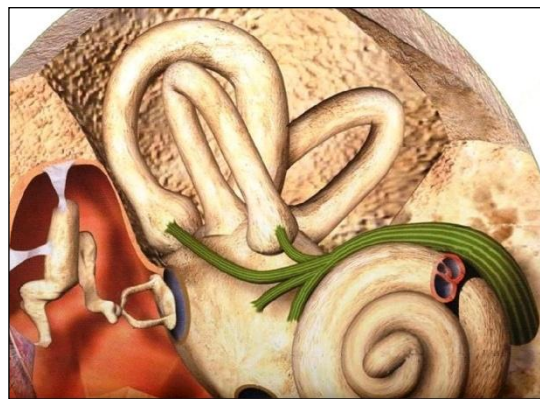
Analizując budowę i funkcje narządów równowagi pilota można stwierdzić, że w zakresie odbierania bodźców ruchowych są one podobne do budowy i funkcji urządzeń pomiarowych występujących w lotniczych systemach nawigacji inercyjnej i orientacji przestrzennej (fot. 3. i 4.). Jedne i drugie są przeznaczone do określania parametrów wykonywanego ruchu obrotowego (jako tzw. czujniki obrotu) oraz odchyłań osi odniesienia od płaszczyzny horyzontu i kierunku pionu (jako tzw. czujniki pionu) [7, 8].

Podstawową funkcją narządów orientacji przestrzennej pilota jest utrzymywanie stanu równowagi jego ciała w warunkach naziemnych oraz określanie kierunku ruchu pojawiającego się w czasie wykonywania manewrów statku powietrznego. Proces ten obejmuje szereg wejściowych sygnałów czuciowych, pochodzących z różnych narządów ciała, które poddawane są analizie w mózgowiu, wypracowującym informację o położeniu lub ruchu kątowym pilota i sterującym wysyłaniem sygnałów ruchowych.

Dane te, przetworzone do postaci sygnału nerwowego, pochodzą z kilku narządów sensorycznych pilota: obrazu otrzymywanego z jego oczu, sygnału przemieszczenia z mikroreceptorów zawartych w jego mięśniach i ścięgnach oraz napięcia mechanicznego z receptorów nacisku w jego skórze. Kluczową jednak rolę odgrywiają wypełnione płynem struktury ucha wewnętrznego tworzące narządy błędnika (przedśionek i trzy przewody półkoliste), które stanowią swoisty rodzaj czujników biologicznych [8].



Fot. 3. Widok układu trzech laserowych czujników prędkości obrotu występujących w systemie nawigacji inercyjnej [7]



Fot. 4. Widok układu trzech przewodów półkolistych występujących w błędniku pilota i stanowiących czujniki obrotu [8]

Głównym elementem pomiarowym struktur ucha wewnętrznego, zarówno przedśionka jak i przewodów półkolistych, są tzw. zmysłowe komórki rzęsate [8], które są podobne do komórek odpowiedzialnych za przetwarzanie dźwięku w uchu środkowym (tzw. ślimaku). Z wykonanych badań medycznych wynika, że przedśionek reaguje głównie na położenie głowy względem kierunku siły ciężkości (tzw. równowaga statyczna), natomiast przewody półkoliste odpowiedzialne są za reakcje na pojawienie się ruchu obrotowego głowy i jego kierunek (tzw. równowaga dynamiczna).

Przedśionek w swojej strukturze obejmuje dwa elementy: łagiewkę i woreczek, posiadające powierzchnie czułe zwane plamkami, zawierającymi komórki rzęsate. Działanie przedśionka polega na tym, że w stanie pochylecia głowy względem kierunku siły ciężkości (lub kierunku wypadkowego przeciążenia w stanach manewrowych statku powietrznego) komórki rzęsate są pociągane przez oddziału-

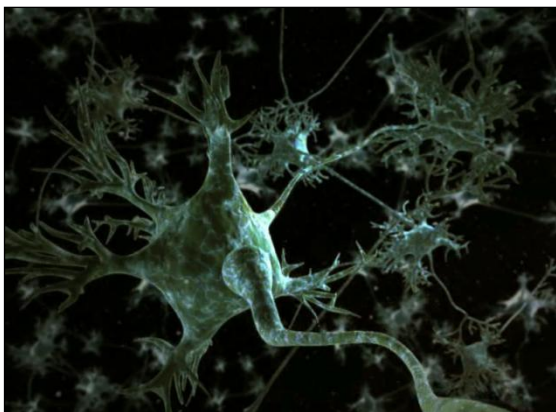
jącą siłę, która odchyła ich wypustki i powoduje pobudzenie (generację sygnału nerwowego). W warunkach lotu ustalonego horyzontalnego, głowa pilota jest ustawiona w pozycji normalnej, wtedy to plamka woreczka znajduje się w położeniu pionowym, a plamka łagiewki w położeniu poziomym i siła ciężkości oddziałuje tylko na plamkę woreczka – w świadomości pilota pojawia się odczucie pozostawania jego ciała w położeniu horyzontalnym.

W czasie pionowych manewrów statku powietrznego (np. w czasie nurkowania), przy pochyleniu głowy pilota w przód względem kierunku siły ciężkości, komórki rzęsate plamki łagiewki monitorują pozycję głowy względem horyzontu przekazując sygnały nerwowe, które w świadomości pilota wywołują odczucie o pochyleniu ciała do przodu. Gdy pilot wykonuje manewr wznoszenia, jego głowa jest pochylona w tył względem siły ciężkości i kierunek odchylenia wypustek komórek rzęsatej dla plamki łagiewki jest przeciwny, wtedy w świadomości pilota pojawia się odczucie o pochyleniu ciała do tyłu. Odczucia te, mimo że są naturalne, mogą być łatwo zakłócone w stanach manewrowych statku powietrznego.

Z kolei przewody półkoliste są narządami równowagi ustawionymi pod kątem prostym względem siebie i czuły na pojawiający się ruch obrotowy głowy. Każdy z nich rozszerza się na końcu, tworząc bańkę, która mieści komórki rzęsate z wypustkami włosowatymi zagłębionymi w tzw. osklepku. W trakcie obrotu głowy pilota (samoczynnego lub wywołanego ruchem kątowym statku powietrznego) płyn znajdujący się w przewodzie półkolistym reaguje na ruch z pewnym opóźnieniem i powoduje odchylenie osklepka. Odchylenie osklepka jest proporcjonalne do zmian ruchu obrotowego głowy (zmian prędkości kątowej) i powoduje wygięcie wypustek komórek rzęsatej oraz ich pobudzenie (generację sygnału nerwowego).

Sygnały nerwowe, otrzymywane jednocześnie z przedsionka i przewodów półkolistych, podawane są do ośrodków równowagi w mózgowiu i tam przetwarzane do postaci sygnałów korygujących stan równowagi (człowiek nie oswojony z lataniem mimowolnie chce przeciwdziałać zmianie położenia swego ciała względem pionu i horyzontu). Informacja o położeniu przestrzennym podawana jest też do kory mózgowej, gdzie pojawia się ona w świadomości pilota jako odczucie zmysłu równowagi [8].

Procesy przetwarzania sygnałów nerwowych w mózgowiu nie są do końca poznane i nie wiadomo dokładnie, w jaki sposób i na bazie jakich mechanizmów informacja o położeniu przestrzennym ciała pojawia się w świadomości pilota. Nie mniej jednak, możliwe jest modelowanie działania mózgowia na bazie teorii sieci neuronowych (fot. 5.), według której sygnały nerwowe jako wejściowe do sieci generują sygnały wyjściowe, wywołujące odczucia i ruchy odpowiednich części ciała pilota [8].



Fot. 5. Widok fragmentu sieci neuronowej mózgowia w czasie tzw. „zapłonu” jej neuronu [8]

Do modelowania funkcji przetwarzania informacji otrzymywanych z narządów zmysłu równowagi i realizowanych w mózgowiu pilota można wykorzystać metodę obliczeń stosowaną w teorii sztucznych sieci neuronowych [9], w której występuje struktura sieciowa o współczynnikach wzmocnienia sygnałów (tzw. wagach) i progach „zapłonu” neuronów (tzw. biasach).

Złożone fazy ruchu przestrzennego podczas wykonywania figur wyższego pilotażu powodują, że na narządy równowagi pilota oddziałują przyspieszenia liniowe i prędkości obrotowe niespotykane na ziemi, wywołujące z kolei nieznanne wcześniej stany odczuwania zaburzenia stanu równowagi. Zaburzenia odczucia stanu równowagi statycznej i dynamicznej objawiają się jako iluzje wzrokowe i ruchowe, powodujące błędne określenie położenia pionu i kierunku lotu, stanowiące podstawę do powstawania zjawiska dezorientacji przestrzennej u pilota.

Na ziemi położenie głowy i ciała pilota określane jest względem kierunku siły ciężkości, natomiast w czasie lotu położenie to określane jest względem wypadkowego wektora przyspieszenia liniowego spowodowanego manewrami statku powietrznego. Umieszczenie pilota w mobilnym symulatorze lotu i wykonywanie ruchu obrotowego powoduje, że w danym przewodzie półkolistym następuje odchylenie wypustek komórek rzęsatej proporcjonalne do zmian prędkości obrotu, a to z kolei generuje sygnał nerwowy podawany do mózgu (w świadomości pilota pojawia się odczucie obrotu).

W podjętej pracy dokonano próby zamodelowania parametrów tego odczucia w postaci określenia zmian prędkości obrotu sprowadzonej do układu horyzontalnego. Takie podejście umożliwiło porównanie warunków powstawania błędów określenia położenia kąтового na bazie prędkości obrotu i oceny zjawiska dezorientacji przestrzennej dla układów biologicznych i mechanicznych.

2. MATEMATYCZNE MODELOWANIE ZJAWISKA DEZ-ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ W SYSTEMIE NAWIGACJI INERCJALNEJ I BŁĘDNIKU PILOTA

Parametry orientacji przestrzennej, przyjęte w lotnictwie jako kąty położenia względem horyzontu i kierunku północnego: pochylenie, przechylenie i odchylenie zwane kursem, są standardowo wyznaczane na pokładzie statku powietrznego w tzw. sztucznych horyzontach i układach kursowych lub bardziej zaawansowanych technologicznie systemach nawigacji inercjalnej [3].

Ich układy pomiarowe, zwłaszcza wahadło elektrolityczne stosowane do korekcji wskazań oraz giroskopy mechaniczne lub optoelektroniczne czujniki prędkości kątowej, przypominają pod względem pełnionych funkcji układy pomiarowe znajdujące się w narządach równowagi błędnika pilota – przedsionek (do określania odchylenia od pionu) oraz przewody półkoliste (do określania zmian prędkości ruchu obrotowego). Dlatego opracowany i prezentowany poniżej opis matematyczny narządu równowagi pilota bazuje na opisie działania układu orientacji przestrzennej stosowanego w systemie nawigacji inercjalnej.

W systemie nawigacji inercjalnej bieżące położenie kątowe statku powietrznego jest wyznaczane na podstawie mierzonych składowych prędkości obrotu oraz znanych zależności bazujących na rachunku kwaternionowym lub przy wykorzystaniu macierzy kosinusów kierunkowych [6]:

$$\begin{bmatrix} C'11(t) & C'12(t) & C'13(t) \\ C'21(t) & C'22(t) & C'23(t) \\ C'31(t) & C'32(t) & C'33(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C11(t) & C12(t) & C13(t) \\ C21(t) & C22(t) & C23(t) \\ C31(t) & C32(t) & C33(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z(t) & +\Omega_y(t) \\ +\Omega_z(t) & 0 & -\Omega_x(t) \\ -\Omega_y(t) & +\Omega_x(t) & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

[C'11(t)+C'33(t)] – macierz wyznaczanych bieżących wartości pochodnych kosinusów kierunkowych;

$[C11(t) \div C33(t)]$ – macierz kosinusów kierunkowych;

$[\Omega_{XYZ}(t)]$ – macierz składowych prędkości obrotu określanych w układzie pomiarowym (mierzonych przez czujniki inercjalne).

Mając określone bieżące wartości składowych macierzy kosinusów kierunkowych, można określić bieżące wartości kątów orientacji przestrzennej układu pomiarowego w nawigacyjnym układzie horyzontalnym (pochylenia, przechylenia i kursu jako kątów stosowanych w nawigacji lotniczej), przy wykorzystaniu znanych przekształceń matematycznych [3].

Przekształcenia powyższe działają poprawnie dla ruchu prostego, jednak w złożonych postaciach ruchu obrotowego podczas manewrów statku powietrznego, mogą pojawiać się efekty zakłócające, powodujące powstawanie błędów w określaniu bieżącego położenia kąтового.

Jednym z takich efektów jest tzw. ruch nieholonomiczny [5, 6]. W ruchu tym wynikowe położenie kątowe ruchomego obiektu w przyjętym układzie współrzędnych np. nawigacyjnym układzie horyzontalnym, zależy nie tylko od wartości przemieszczeń kątowych, ale również od wartości prędkości kątowych i kolejności wykonywania obrotów w poszczególnych jego osiach – wynika to z obserwowalnego zjawiska nieprzemienności składania obrotów w przestrzeni trójwymiarowej [3].

Dlatego do badań zjawiska dezorientacji w zakresie błędów określania położenia przestrzennego modelowanego układu pomiarowego (systemu nawigacji inercjalnej z czujnikami giroskopowymi i błędniaka pilota z kanałami półkolistymi) wykorzystano ruch złożony w postaci ruchu stożkowego, który jest przykładem ruchu nieholonomicznego [5, 6].

Ruch stożkowy, reprezentowany przez prędkości obrotu mierzone przez czujniki inercjalne, może być opisany w układzie horyzontalnym w postaci następującej zależności:

$$\begin{bmatrix} \Omega_N^{RS}(t) \\ \Omega_E^{RS}(t) \\ \Omega_V^{RS}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C11(t) & C12(t) & C13(t) \\ C21(t) & C22(t) & C23(t) \\ C31(t) & C32(t) & C33(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Omega_X^{RS}(t) = +\Omega_{RS} \cdot \sin(\alpha_{RS}) \cdot \cos(\Omega_{RS} \cdot t) \\ \Omega_Y^{RS}(t) = -\Omega_{RS} \cdot \sin(\alpha_{RS}) \cdot \sin(\Omega_{RS} \cdot t) \\ \Omega_Z^{RS}(t) = +\Omega_{RS} \cdot [1 - \cos(\alpha_{RS})] \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$[\Omega_{NEV}(t)]$ – wektor składowych prędkości obrotu w ruchu stożkowym w nawigacyjnym układzie horyzontalnym;

$[C11(t) \div C33(t)]$ – macierz kosinusów kierunkowych;

$[\Omega_{XYZ}(t)]$ – wektor składowych prędkości obrotu w układzie pomiarowym;

Ω_{RS} – prędkość kątowna zakreślania obwiedni stożka;

α_{RS} – kąt rozwarcia linii tworzącej powierzchnię stożka.

W odniesieniu do badań systemu nawigacji inercjalnej ruch stożkowy oznacza harmoniczną zmianę położenia kąтового osi podłużnej i poprzecznej układu pomiarowego na stanowisku obrotowym wytwarzającym ruch stożkowy [6], natomiast jego oś pionowa zakreśla okręgi, przemieszczając się jako linia tworząca stożka o zadanym kącie rozwarcia.

2.1. Zastępczy model matematyczny obliczeń realizowanych w module określania położenia przestrzennego obiektu dla systemu nawigacji inercjalnej

Na bazie znajomości składowych macierzy kosinusów kierunkowych można wyznaczyć bieżące wartości składowych chwilowej prędkości kątownej w nawigacyjnym układzie horyzontalnym. Przy uwzględnieniu ruchu nieholonomicznego, składowe tej prędkości można określić przy wykorzystaniu następującej zależności:

$$\begin{bmatrix} \Omega_N^{NS}(t) \\ \Omega_E^{NS}(t) \\ \Omega_V^{NS}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C11(t) & C12(t) & C13(t) \\ C21(t) & C22(t) & C23(t) \\ C31(t) & C32(t) & C33(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Omega_X^{NS}(t) \\ \Omega_Y^{NS}(t) \\ \Omega_Z^{NS}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D11(t) & D12(t) & D13(t) \\ D21(t) & D22(t) & D23(t) \\ D31(t) & D32(t) & D33(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} NH_N^{NS}(t) \\ NH_E^{NS}(t) \\ NH_V^{NS}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

$[\Omega_{NEV}(t)]$ – wektor składowych prędkości obrotu systemu INS w nawigacyjnym układzie horyzontalnym;

$[\Omega_{XYZ}(t)]$ – wektor składowych prędkości obrotu systemu INS w układzie pomiarowym czujników inercjalnych;

$[C11(t) \div C33(t)]$ – macierz kosinusów kierunkowych;

$[D11(t) \div D33(t)]$ – macierz współczynników korekcji błędów „nieortogonalności” macierzy kosinusów kierunkowych;

$[NH_{NEV}(t)]$ – wektor błędów wyznaczanej prędkości obrotu wynikających z ruchu nieholonomicznego.

Wektor błędów wyznaczanej prędkości obrotu w układzie horyzontalnym wynikający z ruchu nieholonomicznego powoduje, że dla ruchu stożkowego w osi wertykalnej pojawia się składowa stała, świadcząca o występowaniu obrotu układu pomiarowego, którego w rzeczywistości nie ma, gdyż to oś pomiarowa zakreśla okręgi, natomiast układ pomiarowy nie obraca się [6].

2.2. Zastępczy model matematyczny obliczeń realizowanych w module określania położenia przestrzennego obiektu dla układu błędniaka pilota

Jako główny sposób modelowania działania mózgu pilota w zakresie przetwarzania informacji otrzymywanej z narządów czuciowych błędniaka przyjęto algorytm realizowany na bazie sztucznych sieci neuronowych [9]. Założono, że o ile realizacja biologiczna tego procesu jest bardzo złożona i nie odpowiada w pełni przyjętej realizacji sztucznej sieci neuronowej, to jednak na poziomie sposobu obliczeń, może wystąpić wiele cech podobnych, pozwalających na oszacowanie błędów określania zmian prędkości obrotu i położenia przestrzennego głowy w ruchu stożkowym. Podejście takie może pomóc w sformułowaniu i weryfikacji algorytmów realizowanych przez mózg pilota w różnych sytuacjach lotu manewrowego.

Przyjęto, że odczuwane składowe prędkości obrotu głowy pilota w układzie horyzontalnym mogą być wyznaczone z prędkości mierzonej przez przewody półkoliste w błędniku w następującej postaci:

$$\begin{bmatrix} \Omega_N^{PO}(t) \\ \Omega_E^{PO}(t) \\ \Omega_V^{PO}(t) \end{bmatrix} = \left[\begin{bmatrix} W11 \\ W21 \\ W31 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \Omega_X^{PO}(t) \\ \Omega_Y^{PO}(t) \\ \Omega_Z^{PO}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B11 \\ B21 \\ B31 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} W12 \\ W22 \\ W32 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B12 \\ B22 \\ B32 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} W13 \\ W23 \\ W33 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} NH_N^{PO}(t) \\ NH_E^{PO}(t) \\ NH_V^{PO}(t) \end{bmatrix} \right] \quad (4)$$

gdzie:

$[\Omega_{NEV}(t)]$ – wektor składowych prędkości obrotu głowy pilota w nawigacyjnym układzie horyzontalnym;

$[\Omega_{XYZ}(t)]$ – wektor składowych prędkości obrotu głowy pilota w układzie pomiarowym błędniaka;

$[W11 \div W33]$ – macierz współczynników „wzmocnienia” sygnałów w komórkach sieci neuronowej (tzw. wag);

$[B11 \div B33]$ – macierz progów „zapłonu” komórek sieci neuronowej (tzw. biasów);

$[NH_{NEV}(t)]$ – wektor błędów wyznaczanej prędkości obrotu wynikających z ruchu nieholonomicznego.

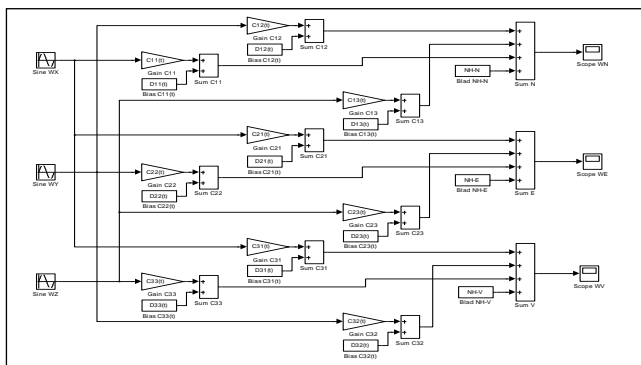
Wektor błędów wyznaczanej prędkości obrotu wynikający z ruchu nieholonomicznego powoduje, że dla ruchu stożkowego w świadomości pilota pojawia się odczucie wirowania w zadanym kierunku ze stałą prędkością obrotu, pomimo, że jego głowa kręci się w przestrzeni po obwiedni stożka, ale nie obraca się [6].

3. SCHEMATY BLOKOWE MODELOWANIA ZJAWISKA DEZORIENTACJI PRZESTRZENNEJ SYSTEMU NAWIGACJI INERCJALNEJ I BŁĘDNIA PILOTA

Do realizacji wstępnych badań symulacyjnych wykorzystano schematy zastępcze działania modułów określania położenia przestrzennego w zakresie wyznaczania prędkości obrotu w układzie horyzontalnym, opracowane dla systemu nawigacji inercyjnej (pkt. 3.1.) oraz dla układu błędniaka pilota (pkt. 3.2.). Ich wyniki zostały poddane weryfikacji w wybranych fragmentach w rzeczywistych badaniach na stanowiskach pomiarowych w ITWL i WSOSP.

3.1. Zastępczy schemat blokowy obliczeń realizowanych w module określania położenia przestrzennego obiektu dla systemu nawigacji inercyjnej

Zastępczy schemat blokowy obliczeń realizowanych w module systemu nawigacji inercyjnej w zakresie wyznaczania prędkości obrotu w nawigacyjnym układzie horyzontalnym (rys. 1.) można przedstawić z wykorzystaniem pakietu Matlab-Simulink (tj. wyników określania współczynników macierzy kosinusów kierunkowych w Matrix Toolbox) jako realizację obliczeń opisanych zależnością (3).



Rys. 1. Zastępczy schemat blokowy wyznaczania prędkości obrotu trzech sensorów systemu nawigacji inercyjnej w układzie horyzontalnym w modelowanej macierzy kosinusów kierunkowych o strukturze 3x3 [materiał ITWL/WSOSP, 2015]

Wyniki wykonanych obliczeń w zakresie błędów określania pochyleń, przechyleń i kursu [3, 4] potwierdziły, że ruch stożkowy wywołuje efekty zjawiska dezorientacji przestrzennej w systemach mechanicznych dedykowanych do określania parametrów położenia kąowego statku powietrznego.

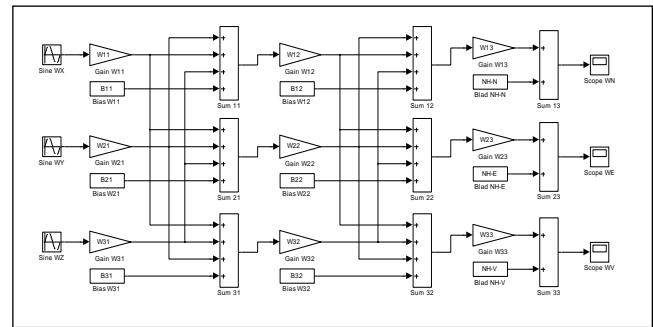
Badania przeprowadzone w ITWL na stanowisku obrotowym UPG-48 [3] wykazały, że dla systemów orientacji przestrzennej z giroskopowymi czujnikami obrotu błąd określania położenia kąowego dochodzi do 4° na jeden cykl ruchu stożkowego (dla prędkości ruchu 10°/s i kącie rozwarcia stożka 10°).

Do zmniejszenia tych efektów mogą być wykorzystywane algorytmy korekcji, bazujące na procedurze uwzględniania wpływu tzw. prędkości nieprzemiennej, wyliczanej na podstawie składowych mierzonych prędkości obrotu i wyliczanego na jej podstawie kąta obrotu. Wektor prędkości nieprzemiennej (niemierzalny metodami inercyjnymi) powstaje w konsekwencji nieprzemienności składania małych obrotów w ruchu nieholonomicznym [10, 11].

3.2. Zastępczy schemat blokowy obliczeń realizowanych w module określania położenia przestrzennego obiektu dla układu błędniaka pilota

Zastępczy schemat blokowy obliczeń realizowanych w module modelującym działanie przewodów półkolistych błędniaka pilota w zakresie wyznaczania prędkości obrotu w nawigacyjnym układzie horyzontalnym (rys. 2.) można przedstawić z wykorzystaniem pakie-

tu Matlab-Simulink (tj. wyników uczenia sieci w Neural Network Toolbox) jako realizację obliczeń opisanych zależnością (4).



Rys. 2. Zastępczy schemat blokowy wyznaczania składowych prędkości obrotu trzech przewodów półkolistych błędniaka pilota w układzie horyzontalnym w modelowanej sieci neuronowej o strukturze 3-3-3 [materiał ITWL/WSOSP, 2015]

Wstępne wyniki obliczeń w zakresie błędów określania pochyleń, przechyleń i kursu na podstawie wykonanych w ITWL prób modelowania działania przewodów półkolistych błędniaka pilota wykazują, że ruch stożkowy wywołuje zjawisko dezorientacji przestrzennej w systemach biologicznych, poprzez pojawienie się składowej stałej obrotu w analizowanej osi pionowej. Oznacza to, że pilot odczuwa wirowanie w przestrzeni, pomimo, że obraz otrzymywany ze zmysłu wzroku przeczy temu obrotowi, a jego mózg otrzymuje sprzeczne dane, co daje odczucie efektu vertigo [12].

Zastosowanie procedury modyfikacji wartości współczynników wagowych sieci neuronowej z wykorzystaniem pliku uczącego otrzymanego na bazie danych z ruchu stożkowego (realizowanego w Neural Network Toolbox pakietu Matlab-Simulink), powoduje zmniejszenie błędów określania parametrów ruchu obrotowego i położenia przestrzennego. Wskazuje to na możliwość uzyskania efektu rozpoznawania przez pilota zjawiska dezorientacji przestrzennej oraz zwiększenia progu jego wytrzymałości na tego typu zakłócenia. Adaptacja pilota do warunków zmiennego ruchu obrotowego może być realizowana przy wykorzystaniu mobilnych symulatorów lotu, poprzez samomodyfikację sieci neuronowej mózgu pilota w czasie oddziaływania złożonego ruchu przestrzennego.

PODSUMOWANIE

Mobilne symulatory lotu są nowoczesnym narzędziem badawczym, wykorzystywanym zarówno do wstępnej selekcji kandydatów na pilotów, jak również do badań pilotów w zakresie mechanizmów powstawania błędów określania orientacji przestrzennej i możliwości ich zmniejszania. Badania wykazały, że zjawisko fałszywego określania położenia przestrzennego dotyczy zarówno układów biologicznych (systemu błędniaka pilota samolotu myśliwskiego), jak i mechanicznych systemów pomiarowych (systemu orientacji przestrzennej i nawigacji inercyjnej).

Posiadany w Wyższej Szkole Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie mobilny symulator dezorientacji przestrzennej jest dedykowany głównie dla pilotów samolotów wojskowych z awioniką cyfrową i stanowi specjalistyczne stanowisko obrotowe służące do wzmacniania ich wytrzymałości na zjawisko dezorientacji przestrzennej w warunkach złożonych postaci ruchu przestrzennego.

Jednym z zadań zaplanowanych do realizacji na tym symulatorze jest nauczanie pilota rozpoznawania pierwszych objawów utraty orientacji przestrzennej i przeciwdziałania tym efektom. Stąd niezwykle istotne jest określenie warunków powstawania zjawiska dezorientacji przestrzennej w zakresie rodzaju ruchu przestrzennego i jego parametrów. Posiadane obecnie metodyki umożliwiają

wykonywanie badań i ocenę pilotów w zakresie określania położenia przestrzennego tylko w ograniczonym zakresie.

Zaprezentowane modele matematyczne funkcjonowania układu wyznaczania orientacji przestrzennej w systemie nawigacji inercyjnej oraz układu wykrywania ruchu głowy w systemie błędniaka pilota stanowią bazę obliczeniową do przeprowadzenia szczegółowych badań w zakresie określania błędów wyznaczania orientacji przestrzennej przy wymuszeniu stałą prędkością obrotu oraz prędkością kątową zmienną w ruchu stożkowym. Wyniki tych badań mogą być wykorzystane w mobilnych symulatorach lotu do badań reakcji pilotów w złożonych formach ruchu przestrzennego.

BIBLIOGRAFIA

1. Bartnik R., Grenda B., Galej P., *Symulatory lotu oraz symulatory kontroli ruchu lotniczego w szkoleniu lotniczym*. Wydawnictwo AON, Warszawa 2014.
2. Garbacz M., *Symulator dezorientacji przestrzennej – metodyka badań pilotów i kandydatów na pilotów w złożonym ruchu przestrzennym*. BT WSOSP, Dęblin 2013.
3. Michalak S., Szelmanowski A., Raczyński E., *Badania symulacyjne modeli numerycznych systemów orientacji przestrzennej i nawigacji inercyjnej*. BT ITWL, Warszawa 2000.
4. Szelmanowski A., *Metody badań systemów orientacji przestrzennej i nawigacji inercyjnej*. BT ITWL, Warszawa 2001.
5. Ortyl A., *Synteza i badanie algorytmów inercyjnego bezkardanowego systemu orientacji przestrzennej statku powietrznego*. Wydawnictwo WAT, Warszawa 1995.
6. Ortyl A., Gosiewski Z., *Algorytmy inercyjnego bezkardanowego systemu orientacji i położenia obiektu o ruchu przestrzennym*. Awionika. Wydawnictwo ILOT, Warszawa 1999.
7. Sextant Avionique, *Prospect of Inertial Navigation System TOTEM-200*. Bordeaux 1993.
8. Parker S., *Atlas anatomii człowieka*. Wydawnictwo Bellona, Warszawa 2010.
9. Hertz J., Krogh A., Palmer R., *Wstęp do teorii obliczeń neuro-nowych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
10. Szelmanowski A., *The method of testing optoelectronic inertial navigation systems while in coning motion*. Logistyka 2009, nr 6.
11. Bortz J.E., *A New Mathematical Formulation for Strapdown Inertial Navigation*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991.
12. Endsley M.R., *Flight Crews & Modern Aircraft in Search of Situation Awareness*. Royal Aeronautical Society, London 2000.

COMPUTER MODELING OF THE SPATIAL DISORIENTATION IN THE INERTIAL NAVIGATION SYSTEM AND PILOT'S VESTIBULAR SYSTEM IN MOBILE FLIGHT SIMULATORS

Abstract

The paper presents the results of the works at the Air Force Institute of Technology and the Polish Air Force Academy relating to the development of methods

for assessing the effectiveness of the mobile flight simulators production of spatial motion causing the spatial disorientation in a pilot. It has been shown that the phenomenon of false determining of the spatial position applies to both artificial measurement systems (spatial orientation and inertial navigation systems) and biological systems (fighter aircraft pilot's vestibular system). The paper presents mathematical models of functioning of the system determining the spatial orientation in the inertial navigation system and the system detecting head movement in the pilot's vestibular system. Computational diagrams developed for those systems used for detection of their errors in the scope of determining the spatial orientation by applying constant speed of rotation and variable angular velocity occurring in conical movement are also presented. Selected types of those movements are used in mobile flight simulators for testing the susceptibility of pilots and candidates to the occurrence of the spatial disorientation in the conditions of complex spatial motion.

Autorzy:

dr hab. inż. **Andrzej Szelmanowski** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie, Zakład Awioniki

rat. med. **Ewa Szelmanowska** – Warszawski Uniwersytet Medyczny w Warszawie, Wydział Lekarski

mjr mgr inż. **Mariusz Garbacz** – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Akademicki Ośrodek Szkolenia Lotniczego, Zespół Symulatorów Lotu