

Andrzej Szelmanowski, Andrzej Pazur, Mariusz Żokowski, Paweł Janik, Wojciech Paterek

Komputerowe modelowanie charakterystyk cewek elektrycznych dedykowanych dla lotniczych nahałmowych systemów celowniczych z metodą magnetyczną

JEL: L93 DOI: 10.24136/atest.2019.065

Data zgłoszenia: 15.12.2018 Data akceptacji: 08.02.2019

W artykule omówiono znaczenie nahałmowych systemów celowniczych w zwiększeniu bezpieczeństwa lotu oraz skuteczności wykonania zadania bojowego w zakresie tzw. osiągania przewagi w powietrzu. Przedstawiono wybrane systemy nahałmowe stosowane w rozwiązaniach zagranicznych i krajowych, wykorzystujące metodę magnetyczną. Zaprezentowano oryginalną, autorską metodę wyznaczania położenia kątownego hełmu pilota z wykorzystaniem pola magnetycznego z jednej cewki płaskiej i rachunku kwaternionowego. Cennym elementem są podane zależności matematyczne opisujące charakterystyki pola magnetycznego generowanego przez wybrane typy cewek elektrycznych (cewka płaska, cewka Helmholtza / Anti-Helmholtza). Sposób modelowania zilustrowano wynikami badań symulacyjnych wartości indukcji i zakrzywienia pola magnetycznego modelu cewki płaskiej o zadanej liczbie zwojów oraz jej weryfikacji eksperymentalnej dla cewki zbudowanej w ITWL.

Słowa kluczowe: nahałmowe systemy celownicze, metoda magnetyczna.

Wstęp

Rozwój technologii w zakresie miniaturyzacji systemów zobrazowania spowodował, że obecnie jednym z najważniejszych systemów wspomagających pilota w zakresie zobrazowania i obsługi uzbrojenia pokładowego są nahałmowe systemy celownicze [7, 8].

Systemy te są wykorzystywane m.in. na pokładach samolotów i śmigłowców przeznaczonych do realizacji misji ratowniczych (ang. SAR – Search and Rescue) oraz zadań z obszaru ratownictwa z użyciem własnego uzbrojenia na terytorium nieprzyjaciela (ang. CSAR – Combat Search and Rescue). Realizują one funkcje zobrazowania bezpośrednio przed okiem pilota informacji pilotażowo-nawigacyjnej i obserwacyjnej (pozyskiwanej z pokładowych głowic obserwacyjno-celowniczych) oraz funkcje sterowania położeniem ruchomego uzbrojenia pokładowego (działka i rakiet kierowanych), naprowadzanego na cel za pomocą ruchu głowy pilota [8, 9].

Przykładem takiego systemu jest nahałmowy system celowniczy JHMCS (rys. 1.) stosowany m.in. na samolotach F-16 [7]. System ten wykorzystuje złożone układy pomiarowe (m.in. systemy nawigacji inercyjnej) do pozyskiwania danych pilotażowo-nawigacyjnych i celowniczych. Umożliwia nie tylko nahałmowe wyświetlanie informacji o parametrach lotu i sterowania uzbrojeniem, ale także podaje komendy dyrektywne, nakazujące czynności niezbędne dla wykonania zadania lub ostrzeżenia o sytuacjach awaryjnych, otrzymywane z pokładowych systemów kontroli stanu technicznego [7].

Układ wyznaczania położenia kątownego hełmu pilota bazuje na generacji sztucznego pola magnetycznego „przywiązanego” do kabiny samolotu. Linia wizowania jest ustalana względem kabiny samolotu z częstotliwością uaktualniania równą 240 Hz dla samolotu z jednym pilotem lub 120 Hz dla kabiny dwuosobowej. Wskazywanie celu jest realizowane z dokładnością rzędu 0,5 deg [8].



Rys. 1. Widok hełmu pilota samolotu F-16 z zamontowaną nakładką nahałmowego systemu celowniczego JHMCS [9]

Elementem pomiarowym pola magnetycznego generowanego w kabine samolotu F-16 jest czujnik zabudowany w nakładce (rys. 2.) montowanej na hełmie pilota [9].



Rys. 2. Widok nakładki systemu nahałmowego JHMCS z sensorem pola magnetycznego w postaci układu modułowego [9]

Do generowania pola magnetycznego wykorzystywany jest nadajnik pola (rys. 3.) zabudowany na ramie owiewki kabiny.



Rys. 3. Widok hełmu pilota i nadajnika pola magnetycznego generowanego dla nahałmowego systemu celowniczego JHMCS [9]

Przykładem nahlmowego systemu celowniczego zbudowanego w Polsce jest system NSC-1 Orion (rys. 4.), opracowany w ramach współpracy ITWL i Przemysłowego Centrum Optyki. System ten jest przeznaczony do zabudowy m.in. na pokładzie śmigłowca W-3PL [8] oraz innych śmigłowców wojskowych lub cywilnych, posiadających cyfrowo zintegrowane urządzenia i systemy pokładowe m.in. śmigłowców Mi-24 (po zabudowie systemu ZSA).



Rys. 4. Widok helmu z wyświetlaczem przeziernym i grzebieniem diod do orientacji nahlmowego systemu celowniczego NSC-1 [8]

System NSC-1 Orion służy do nahlmowego zobrazowania parametrów pilotażowo-nawigacyjnych i celowniczych bezpośrednio przed okiem pilota. Współpracuje ze zintegrowanym systemem awionicznym śmigłowca W-3PL, którego jednym z elementów jest pokładowy system uzbrojenia ruchomego z WKM-B (rys. 5.).



Rys. 5. Widok ruchomego stanowiska WKM-B śmigłowca W-3PL sterowanego przez nahlmowy system celowniczy NSC-1 [8]

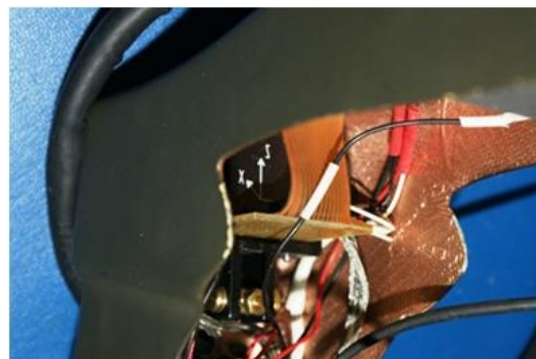
Opracowane oprogramowanie awioniczne, przeznaczone dla systemu NSC-1 Orion, umożliwia pozyskiwanie i przetwarzanie: danych charakteryzujących prezentowane parametry pilotażowo-nawigacyjne i celownicze, sygnałów gotowości do pracy urządzeń składowych, informacji o sytuacjach niebezpiecznych na pokładzie. Od dokładności i wiarygodności prezentowanej informacji zależy bezpieczeństwo lotu, szczególnie w czasie lotów manewrowych na małej wysokości oraz lotów podczas trudnych warunków atmosferycznych i w nocy (z wykorzystaniem gogli noktowizyjnych). Oprogramowanie to jest dedykowane dla struktury otwartej systemu, umożliwiającej jego rozbudowę o dodatkowe funkcje [8].

Do zapewnienia współpracy nahlmowego systemu celowniczego NSC-1 Orion ze zintegrowanym systemem awionicznym śmigłowca W-3PL, komunikującym się z wykorzystaniem cyfrowej transmisji danych według standardu MIL-1553B, opracowany został komputer graficzny KG-1HC (rys. 6.), zbudowany w ITWL. Zaimplementowano w nim algorytmy wyznaczania położenia kąowego helmu pilota z wykorzystaniem metody elektrooptycznej i technologii sztucznych sieci neuronowych [8].



Rys. 6. Widok komputera graficznego z oprogramowaniem sterującym trybami zobrazowania nahlmowego systemu NSC-1 [8]

Jedną z metod testowanych w systemie NSC-1 Orion do wyznaczania położenia kąowego helmu pilota jest metoda magnetyczna, polegająca na generowaniu pola magnetycznego o znanej charakterystyce. Do pomiaru składowych tego pola wykorzystywany jest zintegrowany czujnik trójosiowy ADIS-16405 (rys. 7.), posiadający trzy magnetometry o zakresie pomiarowym $\pm 0,35$ mT ($\pm 3,5$ Gs) oraz czułości pomiaru $\pm 0,05$ μ T ($\pm 0,5$ mGs) [1].



Rys. 7. Widok zabudowanego czujnika pola magnetycznego wykorzystywanego w systemie nahlmowym NSC-1 [8]

W wersji docelowej, rozwijanej m.in. dla trybu poszukiwania i identyfikacji rozbitka w czasie akcji poszukiwawczo-ratowniczych, oprogramowanie systemu NSC-1 Orion umożliwi pilotowi nahlmowe sterowanie położeniem kąowym tzw. głowicy obserwacyjno-celowniczej TOPLITE (z kamerą dzienną TV i termalną FLIR) [8].

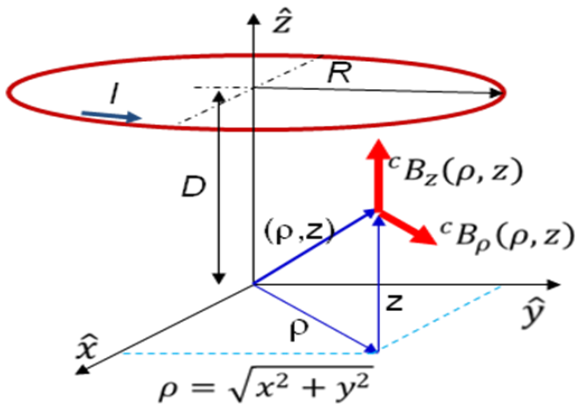
Jednym z problemów występujących w badaniach dokładności metody magnetycznej w systemie NSC-1 były zbyt duże błędy wyznaczania położenia kąowego helmu pilota, wynikające z zakrzywienia pola magnetycznego generowanego przez cewki płaskie.

Sposobem wykorzystywanym w ITWL do analizy i oceny stopnia zakrzywienia pola magnetycznego generowanego przez wybrane rodzaje cewek o zadanej geometrii było zastosowanie specjalizowanego pakietu symulacyjnego COMSOL, który umożliwił wyznaczanie charakterystyk przestrzennych pola magnetycznego [3, 11].

1. Komputerowe modelowanie charakterystyki cewki płaskiej pełnej (kołowej)

Jednym z rozwiązań analizowanych w ITWL w zakresie wytwarzania pola magnetycznego przez elementy, które nie byłyby zabudowane z przodu głowy pilota jest zastosowanie cewki płaskiej pełnej (kołowej), generującej dla małych przemieszczeń helmu pilota jednorodne pole magnetyczne wzdłuż osi symetrii cewki [6].

W układzie sferycznym (rys. 8.) charakterystyka pola magnetycznego cewki płaskiej, z uwagi na symetryczność względem osi prostopadłej do płaszczyzny cewki, może być opisana poprzez podanie dwóch składowych indukcji: osiowej i promieniowej.



Rys. 8. Schemat budowy cewki płaskiej pełnej (kołowej) wykorzystany do modelowania charakterystyki jej pola [6]

Dla wykorzystania wyznaczonych składowych w nahlmowym systemie celowniczym należy dokonać transformacji składowych do układu prostokątnego (x,y,z) , w którym wyznaczane są dwa kąty: elewacja i azymut osi helmu pilota względem układu kabiny.

1.1. Zależności matematyczne dla cewki płaskiej pełnej

Podstawą do modelowania charakterystyki pola magnetycznego cewki płaskiej były zależności podane w [6], opisujące składowe: osiową i promieniową indukcji pola magnetycznego generowanego przez pojedynczy zwoj cewki w postaci:

$$B_z^C = \frac{-\mu I \rho}{2\pi \rho \sqrt{(R+\rho)^2 + (z-D)^2}} \left[\frac{R^2 - \rho^2 - (z-D)^2}{(R-\rho)^2 + (z-D)^2} E(k^2) + K(k^2) \right] \quad (1)$$

$$B_\rho^C = \frac{\mu I (z-D)}{2\pi \rho \sqrt{(R+\rho)^2 + (z-D)^2}} \left[\frac{R^2 + \rho^2 - (z-D)^2}{(R-\rho)^2 + (z-D)^2} E(k^2) + K(k^2) \right] \quad (2)$$

gdzie: I – natężenie prądu płynącego w zwoju cewki; μ – przenikalność magnetyczna; z, ρ, ϕ – współrzędne punktu w układzie sferycznym; R, D – parametry cewki; $E(k^2), K(k^2)$ – całki sferyczne.

W celu wyznaczenia składowych generowanego pola magnetycznego przez cewkę płaską o promieniu R ze spiralnie nawiniętymi zwojami (oddalonymi od siebie o odległość ΔR równą sumie średnicy zwoju i odległości między zwojami) założono, że można ją potraktować jako zbiór pojedynczych zwojów o narastającej wartości promienia R_i zmieniającej się skokowo o wartość ΔR w zakresie od 0 do wartości promienia cewki R .

Dla tego przypadku składowe: osiową i promieniową pola magnetycznego dla cewki płaskiej jednorodnej w układzie sferycznym (z, ρ, ϕ) można wyznaczyć według następujących zależności:

$$B_z^{FC}(R, D, z, \rho, \phi) = \sum_{R_i=0}^{R_i=R} B_z^C(R_i, D, z, \rho, \phi) \quad (3)$$

$$B_\rho^{FC}(R, D, z, \rho, \phi) = \sum_{R_i=0}^{R_i=R} B_\rho^C(R_i, D, z, \rho, \phi) \quad (4)$$

W celu wykorzystania składowych generowanego pola magnetycznego w nahlmowym systemie celowniczym, określającym kąty elewacji i azymutu helmu pilota w prostokątnym układzie współrzędnych związanym z kabiną statku powietrznego, należy dokonać ich transformacji przy wykorzystaniu następujących zależności:

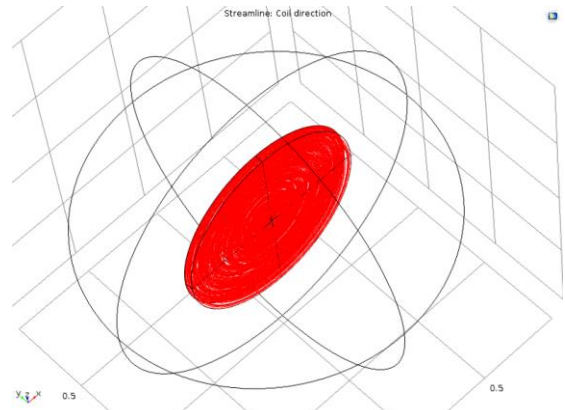
$$B_z^{FC}(R, D, z, \rho, \phi) = B_z^{FC}(R, D, z, \rho, \phi) \quad (5)$$

$$B_x^{FC}(R, D, z, \rho, \phi) = B_\rho^{FC}(R, D, z, \rho, \phi) \cdot \cos(\phi) \quad (6)$$

$$B_y^{FC}(R, D, z, \rho, \phi) = B_\rho^{FC}(R, D, z, \rho, \phi) \cdot \sin(\phi) \quad (7)$$

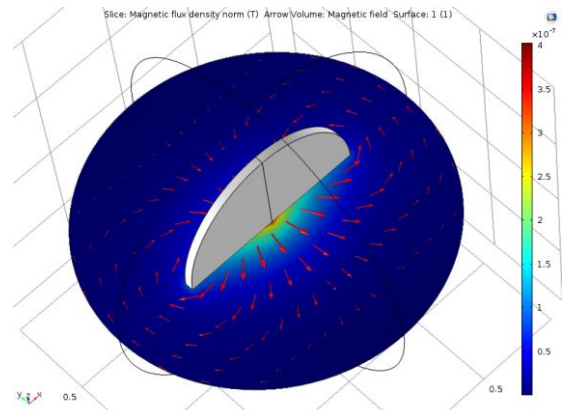
1.2. Wyniki modelowania pola dla cewki płaskiej pełnej

Modelowanie w programie COMSOL cewki płaskiej pełnej jako cewki jednorodnej (rys. 9.) wymaga określenia rozmiaru, kształtu i kierunku przepływu prądu elektrycznego przez uzwojenia cewki [3].



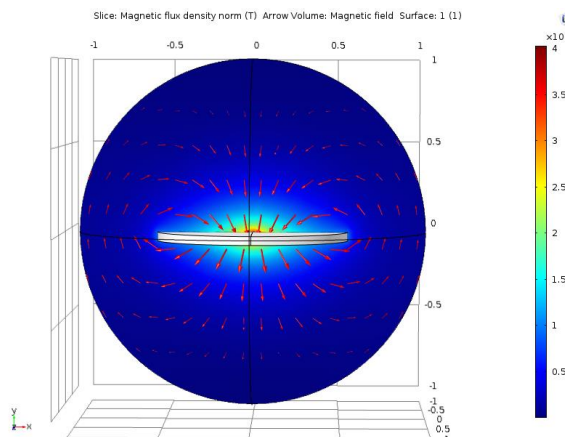
Rys. 9. Definiowanie rozmiaru, kształtu i kierunku przepływu prądu elektrycznego przez cewkę płaską pełną (kołową) [3]

Otrzymany rozkład pola magnetycznego (rys. 10.) generowanego przez cewkę płaską pełną (kołową) umożliwia określenie jego natężenia i zakrzywienia w wybranym punkcie pomiarowym



Rys. 10. Rozkład zakrzywienia i magnitudy pola magnetycznego generowanego przez cewkę pełną – widok z boku [3]

Analiza stopnia zakrzywienia pola magnetycznego (rys. 11.) pozwala na ocenę przydatności tej charakterystyki do wyznaczania odchyleń liniowych helmu pilota z zabudowanym czujnikiem pola od położenia neutralnego (wyznaczonego na osi symetrii cewki).



Rys. 11. Rozkład zakrzywienia i magnitudy pola magnetycznego generowanego przez cewkę pełną – widok z góry [3]

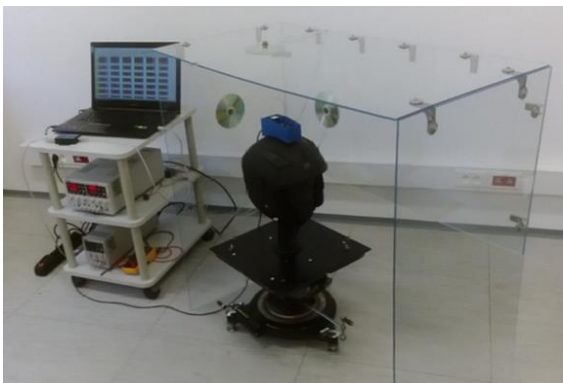
1.3. Możliwości zastosowania cewki pełnej w systemie NSC-1

Dla nahlmowego systemu celowniczego NSC-1 z metodą magnetyczną w ITWL zbudowano model fizyczny cewki płaskiej pełnej (rys. 12.), dla którego generowane pole magnetyczne jest quasi-jednorodne w wąskiej strefie wokół osi symetrii cewki.



Rys. 12. Widok modelu fizycznego cewki płaskiej jednorodnej zbudowanego dla systemu NSC-1 [9]

Do realizacji technicznej układu pomiarowego wykorzystano trzy zabudowane ortogonalnie cewki płaskie pełne (rys. 13.), oraz zintegrowane czujniki pola magnetycznego [1, 2, 10].



Rys. 13. Widok układu pomiarowego z modelem cewki płaskiej kołowej (3 cewki) zbudowanego dla systemu NSC-1 [9]

Opracowany autorski algorytm, umożliwiający wyznaczanie kątów orientacji przestrzennej hełmu pilota względem kabiny statku powietrznego, wykorzystuje m.in. macierz cosinusów kierunkowych. Macierz ta zawiera informacje o kątach: pochylenia, przechYLEnia i odchylenia osi wizowania hełmu pilota względem kabiny statku powietrznego (podobną rolę macierz ta pełni w systemach nawigacji inercyjnej w odniesieniu do położenia statku powietrznego).

Równanie, opisujące relacje pomiędzy macierzami pomiarowymi składowych pola magnetycznego w obu układach a macierzą cosinusów kierunkowych, można przedstawić w postaci:

$$[B_{PO}(A, B, C)] = [M_{SP}^{PO}(A, B, C)]x[B_{SP}(A, B, C)] \quad (8)$$

$$[M_{SP}^{PO}(A, B, C)] = [B_{PO}(A, B, C)]x[B_{SP}(A, B, C)]^{-1} \quad (9)$$

gdzie:

– macierz składowych pola mierzonego w układzie hełmu pilota:

$$[B_{PO}(A, B, C)] = \begin{bmatrix} B_{PO}^x(A) & B_{PO}^x(B) & B_{PO}^x(C) \\ B_{PO}^y(A) & B_{PO}^y(B) & B_{PO}^y(C) \\ B_{PO}^z(A) & B_{PO}^z(B) & B_{PO}^z(C) \end{bmatrix} \quad (10)$$

– macierz składowych pola mierzonego w układzie kabiny:

$$[B_{SP}(A, B, C)] = \begin{bmatrix} B_{SP}^x(A) & B_{SP}^x(B) & B_{SP}^x(C) \\ B_{SP}^y(A) & B_{SP}^y(B) & B_{SP}^y(C) \\ B_{SP}^z(A) & B_{SP}^z(B) & B_{SP}^z(C) \end{bmatrix} \quad (11)$$

– macierz cosinusów kierunkowych hełmu względem kabiny:

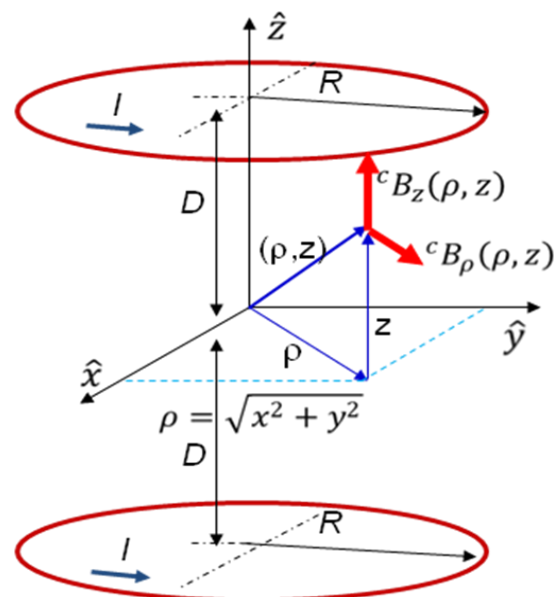
$$[M_{SP}^{PO}(A, B, C)] = \begin{bmatrix} M_{11}(A, B, C) & M_{12}(A, B, C) & M_{13}(A, B, C) \\ M_{21}(A, B, C) & M_{22}(A, B, C) & M_{23}(A, B, C) \\ M_{31}(A, B, C) & M_{32}(A, B, C) & M_{33}(A, B, C) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Badania dokładności wyznaczania położenia kąowego hełmu pilota przy wykorzystaniu zbudowanego w ITWL układu pomiarowego z trzema ortogonalnie zabudowanymi cewkami płaskimi kołowymi (rys. 13.) wykazały, że błędy te rosną w miarę oddalania się od osi symetrii cewki i przekraczają przyjęte wymagania [8].

Wstępne prace analityczne wykazały możliwość opracowania algorytmu korekcji wpływu zakrzywienia pola magnetycznego na błędy wyznaczania położenia kąowego hełmu pilota. Alternatywnym sposobem poprawy dokładności wyznaczania położenia kąowego hełmu pilota w systemie NSC-1 z metodą magnetyczną jest zastosowanie innych rodzajów cewek m.in. cewki Helmholtza (Anti-Helmholtza) i cewki płaskiej dzielonej (pierścieniowej).

2. Komputerowe modelowanie charakterystyki cewki w układzie Helmholtza (Anti-Helmholtza)

Jedną z cewek dedykowanych do wytwarzania jednorodnego pola magnetycznego jest cewka Helmholtza [4, 5, 6, 12]. Stanowi ona połączenie dwóch cewek elektrycznych ustawionych współosiowo i oddalonych od siebie o z góry zadaną odległość (rys. 14.). Przyjmuje się, że w bliskim obszarze do 0,2 promienia cewki względem punktu neutralnego (znajdującego się w środku odległości pomiędzy cewkami) generowane pole magnetyczne można uznać za jednorodne (niejednorodność pola nie przekracza 1%).



Rys. 14. Schemat budowy cewki Helmholtza (Anti-Helmholtza) wykorzystywany do modelowania charakterystyki jej pola [6]

Cewka ta może być wykorzystana w dwóch podstawowych układach: Helmholtza, gdy w obu cewkach prąd płynie w tym samym kierunku, oraz Anti-Helmholtza, gdy kierunki przepływu prądu w uzwojeniach cewek są przeciwne [6].

2.1. Zależności matematyczne dla cewki Helmholtza

Wartość indukcji pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę Helmholtza można przedstawić według [6] w postaci:

$$B_z^{HC} = B_{z,2}^{FC}(\rho, \phi, z - D) + B_{z,1}^{FC}(\rho, \phi, z + D) \quad (13)$$

$$B_\rho^{HC} = B_{\rho,2}^{FC}(\rho, \phi, z - D) - B_{\rho,1}^{FC}(\rho, \phi, z + D) \quad (14)$$

W obszarze zbliżonym do osi symetrii cewki Helmholtza (dla warunków: $R = 2D$ oraz $|\rho| < 0,2R$ i $|z| < 0,2R$) można przyjąć, że generowane pole jest quasi-jednorodne, a składowe pola są określone zależnościami:

$$B_z^{HC} \cong \frac{8\mu I}{5\sqrt{5}R} \quad (15)$$

$$B_\rho^{HC} \cong 0 \quad (16)$$

Jeśli przemieszczenie liniowe helmu pilota przekracza obszar pola jednorodnego, wtedy w pomiarach występują składowe poprzeczne związane z zakrzywieniem pola magnetycznego. Jednym ze sposobów korekcji błędów jest wyznaczenie wartości zakrzywienia pola w punkcie pomiarowym i wprowadzenia poprawek. Do tego celu można wykorzystać cewkę Helmholtza pracującą w układzie przeciwsobnym (jako cewka Anti-Helmholtza).

Dla układu przeciwsobnego (gdy kierunki przepływu prądu są przeciwne) generowane pole magnetyczne w układzie Anti-Helmholtza może być opisane zgodnie z [6] w postaci:

$$B_z^{AHC} = B_{z,2}^{FC}(\rho, \phi, z - D) - B_{z,1}^{FC}(\rho, \phi, z + D) \quad (17)$$

$$B_\rho^{AHC} = B_{\rho,2}^{FC}(\rho, \phi, z - D) + B_{\rho,1}^{FC}(\rho, \phi, z + D) \quad (18)$$

W obszarze zbliżonym do osi symetrii cewki Anti-Helmholtza (dla warunków: $R = 2D$ oraz $|\rho| < 0,2R$ i $|z| < 0,2R$) można przyjąć, że generowane pole zmienia się liniowo, a składowe pola są określone zależnościami:

$$B_z^{AHC} \cong \frac{3\mu I D R^2}{[D^2 + R^2]^{5/2}} \cdot z \quad (19)$$

$$B_\rho^{AHC} \cong \frac{-1,5\mu I D R^2}{[D^2 + R^2]^{5/2}} \cdot \rho \quad (20)$$

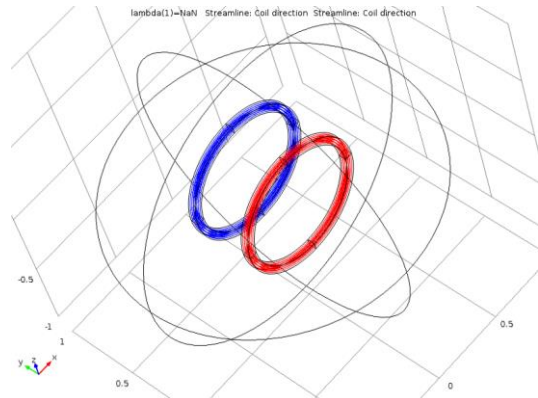
Powyższe zależności zostały wykorzystane do modelowania charakterystyki generowanego pola magnetycznego przez cewkę Anti-Helmholtza w celu wyznaczenia wartości odchylenia liniowego czujnika pola zabudowanego na helmie pilota od punktu neutralnego (znajdującego się na osi symetrii cewki w odległości D).

W opracowanej metodzie wyznaczenie odchyleni liniowych helmu pilota na podstawie znajomości charakterystyki pola cewki Anti-Helmholtza umożliwia określenie zakrzywienia pola magnetycznego generowanego przez cewkę Helmholtza. Analiza wartości magnitudy i zakrzywienia pola oraz wynikające z niej wyznaczenie poprawek w algorytmie korekcji zakrzywienia uzależnione jest także od wartości natężenia przepływającego prądu w uzwojeniach cewki Anti-Helmholtza oraz parametrów określających jej geometrię.

2.2. Wyniki modelowania pola dla cewki Helmholtza

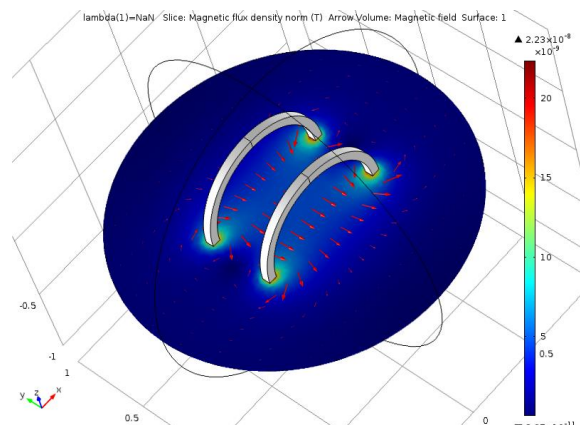
Do modelowania kształtu pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę elektryczną w układzie Helmholtza lub Anti-Helmholtza wykorzystano specjalizowany pakiet symulacyjny COMSOL [3]. Badania w zakresie modelowania pola cewki Anti-Helmholtza potwierdziły jej przydatność do wyznaczenia odchylenia liniowego helmu pilota względem punktu neutralnego na osi symetrii cewki.

Modelowanie charakterystyki pola cewki Helmholtza lub Anti-Helmholtza (rys. 15.) wymaga określenia rozmiaru, kształtu oraz kierunku przepływu prądu elektrycznego przez uzwojenia cewki [3].



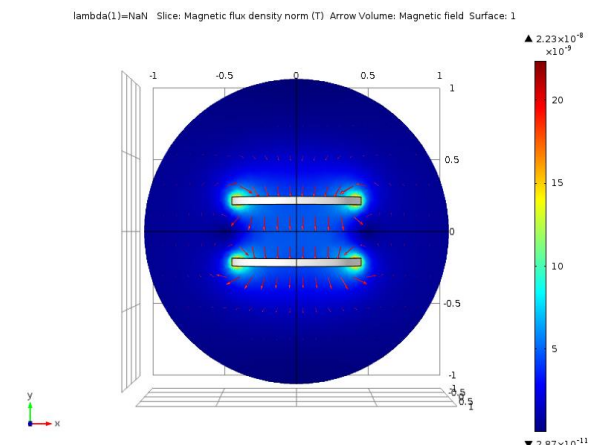
Rys. 15. Definiowanie rozmiaru, kształtu i kierunku przepływu prądu elektrycznego przez cewkę Helmholtza [3]

Otrzymany rozkład pola magnetycznego (rys. 16.) generowanego przez cewkę Helmholtza (lub Anti-Helmholtza) umożliwia określenie jego natężenia i zakrzywienia w wybranym punkcie pomiarowym związanym z położeniem kątowym i liniowym helmu pilota.



Rys. 16. Rozkład zakrzywienia i magnitudy pola magnetycznego generowanego przez cewkę Helmholtza – widok z boku [3]

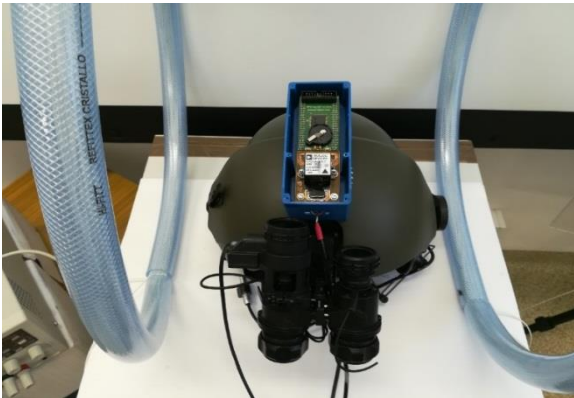
Analiza stopnia zakrzywienia pola magnetycznego (rys. 17.) pozwala na ocenę przydatności tej charakterystyki do wyznaczenia odchyleni liniowych helmu od osi symetrii cewki.



Rys. 17. Rozkład zakrzywienia i magnitudy pola magnetycznego generowanego przez cewkę Helmholtza – widok z góry [3]

2.3. Możliwości zastosowania cewki Helmholtza w systemie NSC-1

W celu realizacji testów w zakresie zakrzywienia wytwarzanego pola magnetycznego zbudowany został model fizyczny cewki Helmholtza (rys. 18.), którego rozmiary określono przy uwzględnieniu wymaganej strefy przemieszczeń liniowych helmu pilota [9].



Rys. 18. Widok układu pomiarowego z modelem cewki Helmholtza zbudowanego dla systemu NSC-1 [9]

Badania modelu fizycznego cewki Helmholtza dla różnych wartości natężenia prądu wykazały, że generowane pole magnetyczne spełnia wymagania co do jednorodności w otoczeniu jej osi symetrii. Potwierdzono, że w obszarze zbliżonym do osi symetrii cewki Helmholtza (dla warunków: $R=2D$ oraz $|\rho| < 0,2R$ i $|z| < 0,2R$) generowane pole jest quasi jednorodne (z dokładnością do 1%). Położenie kątowny helmu pilota z zabudowanym czujnikiem pola magnetycznego dla pola jednorodnego może być wyznaczone przy wykorzystaniu następujących zależności:

- elewacja helmu pilota (kąąt pochylenia helmu względem kabiny):

$$E = \Theta_{SP}^{PO} = ARCTAN \left[\frac{-B_x^{HC}}{\sqrt{(B_y^{HC})^2 + (B_z^{HC})^2}} \right] \quad (21)$$

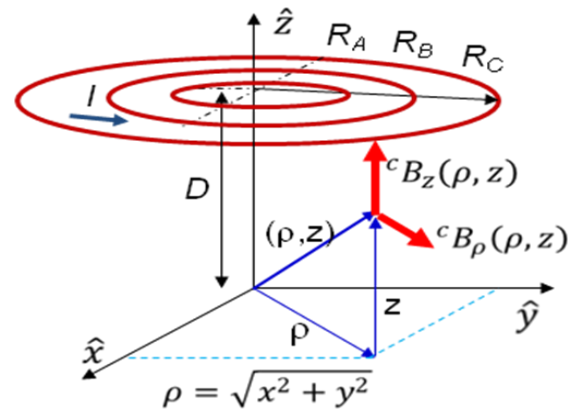
- azymut helmu pilota (kąąt odchylenia helmu względem kabiny):

$$A = \Phi_{SP}^{PO} = ARCTAN \left[\frac{B_y^{HC}}{B_z^{HC}} \right] \quad (22)$$

Wadą rozwiązania z dwoma cewkami w układzie Helmholtza jest trudność z wykorzystaniem ich na pokładzie statku powietrznego. Jedną z cewek można zabudować za głową pilota, ale druga musiałaby być zabudowana z przodu z uwagi na wymagany kierunek pola magnetycznego w celu wyznaczania elewacji i azymutu helmu pilota (podobnie jak wyznaczany jest kąąt pochylenia i przechylenia na bazie pomiaru składowych przyspieszenia ziemskiego).

3. Komputerowe modelowanie charakterystyki cewki płaskiej dzielonej (pierścieniowej)

Jednym z rozwiązań analizowanych w ITWL w zakresie wytwarzania pola magnetycznego przez elementy, które nie byłyby zabudowane z przodu głowy pilota jest zastosowanie cewki płaskiej dzielonej (pierścieniowej), generującej dla małych przemieszczeń helmu pilota jednorodne pole magnetyczne wzdłuż osi symetrii cewki (rys. 19.). Rozwiązanie, bazujące na pomiarze pola generowanego przez poszczególne pierścienie, umożliwia wyznaczenie odchyłań liniowych czujnika od osi symetrii cewki w obszarze pola niejednorodnego oraz wprowadzanie odpowiednich poprawek.



Rys. 19. Schemat budowy cewki płaskiej dzielonej (pierścieniowej) wykorzystywanej do modelowania charakterystyki jej pola [6]

Wydzielenie pierścieni w cewce płaskiej umożliwia kombinację w ich zasilaniu i komponowanie cewek płaskich o różnych rozmiarach oraz cewek pierścieniowych (pierścień środkowy i zewnętrzny).

3.1. Zależności matematyczne dla cewki płaskiej dzielonej

Charakterystyka przestrzenna pola magnetycznego generowanego przez cewkę płaską dzieloną zależy od sposobu zasilania poszczególnych jej pierścieni (tworzących oddzielne trzy cewki: wewnętrzną, środkową i zewnętrzną).

Dla zasilanych pierścieni cewki płaskiej dzielonej o zwiększających się promieniach generowane pole można opisać w postaci:

- składowe pola dla cewki wewnętrznej (zasilany jeden pierścień):

$$B_z^{FCW}(R, D, z, \rho, \phi) = \sum_{R_i=0}^{R_i=R_w} B_z^C(R_i, D, z, \rho, \phi) \quad (23)$$

$$B_\rho^{FCW}(R, D, z, \rho, \phi) = \sum_{R_i=0}^{R_i=R_w} B_\rho^C(R_i, D, z, \rho, \phi) \quad (24)$$

- składowe pola dla cewki środkowej (zasilane dwa pierścienie):

$$B_z^{FCS}(R, D, z, \rho, \phi) = \sum_{R_i=0}^{R_i=R_s} B_z^C(R_i, D, z, \rho, \phi) \quad (25)$$

$$B_\rho^{FCS}(R, D, z, \rho, \phi) = \sum_{R_i=0}^{R_i=R_s} B_\rho^C(R_i, D, z, \rho, \phi) \quad (26)$$

- składowe pola dla cewki zewnętrznej (zasilane trzy pierścienie):

$$B_z^{FCZ}(R, D, z, \rho, \phi) = \sum_{R_i=0}^{R_i=R_z} B_z^C(R_i, D, z, \rho, \phi) \quad (27)$$

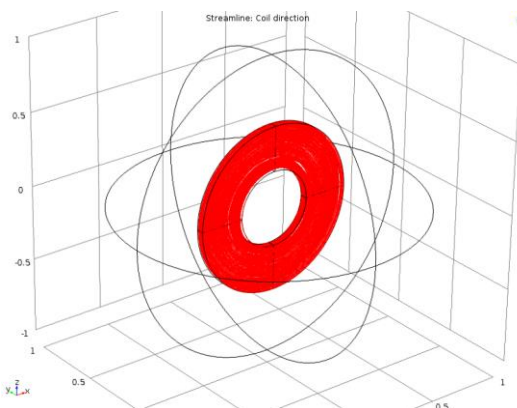
$$B_\rho^{FCZ}(R, D, z, \rho, \phi) = \sum_{R_i=0}^{R_i=R_z} B_\rho^C(R_i, D, z, \rho, \phi) \quad (28)$$

Sektorowa budowa cewki płaskiej dzielonej umożliwia wiele innych kombinacji w zasilaniu poszczególnych jej pierścieni, a stąd generowane pole magnetyczne może posiadać odmienną charakterystykę przestrzenną. Jedną z tych kombinacji jest uzyskanie cewki pierścieniowej o charakterystyce zbliżonej do cewki Helmholtza.

3.2. Wyniki modelowania pola dla cewki płaskiej dzielonej

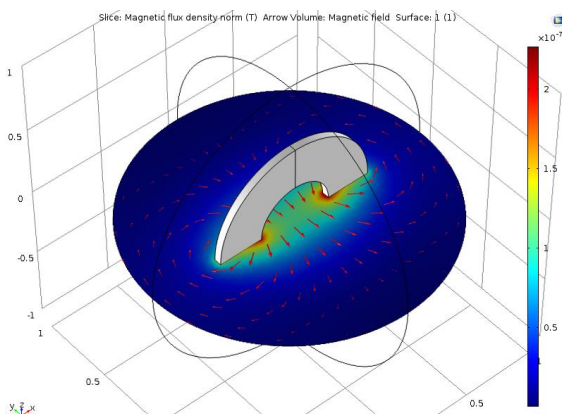
Wyniki modelowania pola magnetycznego generowanego przez cewkę płaską dzieloną dla zasilanych pierścieni o zwiększających się promieniach przedstawiono dla cewki płaskiej pełnej. Zwiększenie promienia zewnętrznego cewki płaskiej dzielonej modelującej cewkę płaską pełną powoduje zmniejszenie zakrzywienia pola magnetycznego w wybranym punkcie pomiarowym.

Modelowanie w programie COMSOL cewki dzielonej jako cewki pierścieniowej (rys. 20.) wymaga określenia rozmiaru, kształtu oraz kierunku przepływu prądu elektrycznego przez uzwojenia cewki [3].



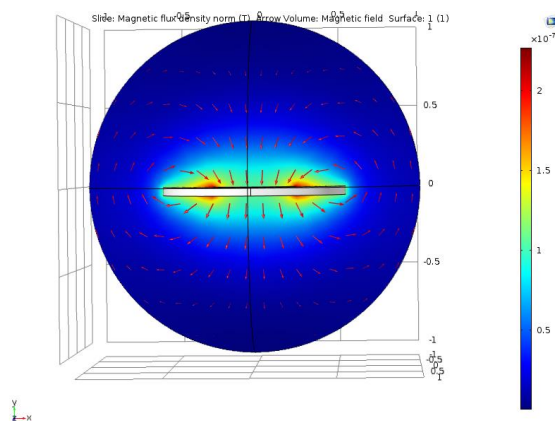
Rys. 20. Definiowanie rozmiaru, kształtu i kierunku przepływu prądu elektrycznego przez cewkę płaską dzieloną (pierścieniową) [3]

Otrzymany rozkład pola magnetycznego (rys. 21.) generowanego przez cewkę pierścieniową umożliwia określenie jego natężenia i zakrzywienia w wybranym punkcie pomiarowym związanym z położeniem kątowym i liniowym helmu pilota.



Rys. 21. Rozkład zakrzywienia i magnitudy pola magnetycznego generowanego przez cewkę dzieloną – widok z boku [3]

Analiza stopnia zakrzywienia pola magnetycznego (rys. 22.) pozwala na ocenę przydatności tej charakterystyki do wyznaczania odchyłek liniowych helmu z zabudowanym czujnikiem pola od położenia neutralnego (znajdującego się na osi symetrii cewki).



Rys. 22. Rozkład zakrzywienia i magnitudy pola magnetycznego generowanego przez cewkę dzieloną – widok z góry [3]

3.3. Możliwości zastosowania cewki dzielonej w systemie NSC-1

Do testów w zakresie wyznaczenia zakrzywienia wytwarzanego pola magnetycznego zbudowany został model fizyczny cewki płaskiej dzielonej (rys. 23.), którego rozmiary określono przy uwzględnieniu wymaganej strefy przemieszczeń liniowych helmu pilota [9].



Rys. 23. Widok modelu fizycznego cewki płaskiej dzielonej (3 pierścienie) zbudowanego dla systemu NSC-1 [9]

Badania modelu fizycznego cewki płaskiej dzielonej (rys. 24.) dla różnych wartości natężenia prądu wykazały, że generowane pole magnetyczne, podobnie jak dla cewki płaskiej pełnej, jest quasi-jednorodne tylko w bliskim otoczeniu jej osi symetrii. Właściwość ta jest zachowana zarówno dla cewki płaskiej pełnej (o różnych promieniach) jak i cewki pierścieniowej (środkowej i zewnętrznej).



Rys. 24. Widok układu pomiarowego z modelem cewki płaskiej dzielonej (3 pierścienie) zbudowanego dla systemu NSC-1 [9]

Położenie kątowe helmu pilota z zabudowanym czujnikiem pola magnetycznego dla pola generowanego przez cewkę płaską dzieloną może być wyznaczone przy wykorzystaniu rachunku kwaternionowego [9] według następujących zależności:

$$\{B_{PO}(FC)\} \circ \{Q_{SP}^{PO}(FC)\} = \{Q_{SP}^{PO}(FC)\} \circ \{B_{SP}(FC)\} \quad (29)$$

gdzie:

– kwaternion składowych pola mierzonego w układzie helmu pilota:

$$\{B_{PO}(FC)\} = \{0, B_{PO}^x(FC), B_{PO}^y(FC), B_{PO}^z(FC)\} \quad (30)$$

– kwaternion składowych pola mierzonego w układzie kabiny:

$$\{B_{SP}(FC)\} = \{0, B_{SP}^x(FC), B_{SP}^y(FC), B_{SP}^z(FC)\} \quad (31)$$

– kwaternion położenia kątowego helmu pilota względem kabiny:

$$\{Q_{SP}^{PO}(FC)\} = \{Q_0^{PO}(FC), Q_X^{PO}(FC), Q_Y^{PO}(FC), Q_Z^{PO}(FC)\} \quad (32)$$

Do wyznaczenia składowych kwaternionu w procesie rozwiązania równania kwaternionowego (29) wykorzystywana jest właściwość kwaternionu unormowanego w postaci:

$$[QO_{SP}^{PO}(FC)]^2 + [QX_{SP}^{PO}(FC)]^2 + [QY_{SP}^{PO}(FC)]^2 + [QZ_{SP}^{PO}(FC)]^2 = 1 \quad (33)$$

Dla korekcji wpływu zakrzywienia pola wymagane jest określenie odchylenia liniowych czujnika względem osi symetrii cewki. W tym celu opracowano autorski algorytm wyznaczania tych odchylenia przy wykorzystaniu danych pomiarowych z czujnika pola dla wybranych kombinacji w zasilaniu pierścieni cewki płaskiej dzielonej. Sposób wyznaczania odchylenia liniowych bazuje na równości modułu generowanego pola magnetycznego mierzonego w układzie związanym z kabiną śmigłowca i w układzie związanym z hełmem pilota.

Podsumowanie

Naukowym aspektem prezentowanej tematyki było przedstawienie magnetycznej metody wyznaczania położenia kąтового hełmu pilota w nahelmowym systemie celowniczym NSC-1 Orion, opracowanym w ITWL dla śmigłowca W-3PL Głuszec.

Przeprowadzone badania symulacyjne i weryfikacyjne miały na celu określenie niedokładności wyznaczania położenia kąтового hełmu pilota względem układu odniesienia związanego z kabiną statku powietrznego, przy zastosowaniu metody magnetycznej (z układem magnetycznym zawierającym cewki płaskie generujące pole magnetyczne o charakterystyce zakrzywionej od osi symetrii).

Zastosowanie cewki płaskiej dzielonej jako cewki pierścieniowej umożliwia otrzymanie charakterystyki niezbędnej do wyznaczenia odchylenia liniowego punktu pomiarowego względem punktu neutralnego (na osi symetrii cewki o jednorodnym polu magnetycznym). Znajomość tych odchyłek pozwala na realizację algorytmu korekcji wpływu zakrzywienia pola magnetycznego i zmniejszenie błędów określania położenia kąтового hełmu pilota względem kabiny.

Wykonane oszacowania błędów w zakresie niedokładności wyznaczania położenia kąтового hełmu pilota przy wykorzystaniu metody magnetycznej wykazały, że możliwe jest korygowanie błędów poprzez wyznaczenie liniowych odchyłek hełmu od położenia neutralnego (wyznaczanego w czasie justowania systemu).

Zaletą opracowanego algorytmu korekcji jest wykorzystanie tych samych danych pomiarowych, które są pobierane z czujnika do wyznaczania położenia kąтового hełmu pilota dla pola zakrzywionego (brak dodatkowych elementów pomiarowych).

Opracowane algorytmy obliczeniowe, w postaci zaimplementowanych aplikacji, znalazły zastosowanie w laboratorium Zakładu Awioniki ITWL do nahelmowego sterowania położeniem kątowym wybranych ruchomych systemów pokładowych (rys. 25.).



Rys. 25. Widok układu pomiarowego z modelem cewki płaskiej dzielonej (3 pierścienie) zbudowanego dla systemu NSC-1 [9]

Bibliografia:

1. ADIS 16405, Analog Devices, Triaxial Inertial Sensor with Magnetometer, datasheet, www.analog.com.
2. Advances in Magnetic Field Sensors, IEEE SENSORS JOURNAL, 2010, vol. 10, nr 6.
3. COMSOL Multiphysics® Modeling Software, www.comsol.com.
4. De Troye D., Chase R., The Calculations and Measurements of Helmholtz Coil Fields, USA Army Research Laboratory, ARL-TN-35, November 1994.
5. Javor E., Anderson T., Design of Helmholtz Coil for Low Frequency Magnetic Field Susceptibility Testing, Naval Undersea Warfare Center, Division Newport 1998.
6. Knoepfel H., Magnetic Fields. A Comprehensive Theoretical Treatise for Practical Use, A Wiley-Interscience Publication, Toronto 2000.
7. Rash C., Helmet Displays in Aviation. Helmet Mounted Display. Design Issues for Rotary-Wing Aircraft, Fort Rucker 2009.
8. Szelmanowski, A., Nahelmowy system celowniczy NSC-1 Orion dla śmigłowców wojskowych ze zintegrowanym systemem awionicznym, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, ISBN 978-83-61021-76-6, Warszawa 2013.
9. Szelmanowski A., Pazur A., Sobielski M., Prusik T., System nahelmowego zobrazowania informacji z głowic obserwacyjno-celowniczych dla wojskowych i cywilnych śmigłowców poszukiwawczo-ratowniczych, Opracowanie wewnętrzne Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2016.
10. Tumanski S., Modern magnetic field sensors – a review, Electrotechnical Review, ISSN 0033-2097, 2013, vol. 89, nr 10.
11. WOLFRAM MATHEMATICA, www.wolfram.com.
12. Youk Hyun, Numerical study of quadruple magnetic traps for neutral atoms: anti-Helmholtz coils and a U-chip, Department of Physics, University of Toronto, Toronto 2004.

Computer modeling of electrical coil characteristics dedicated for helmet-mounted cueing systems with magnetic method

Paper presents the importance of the helmet-mounted cueing systems in the field of flight safety increasing and mission execution effectiveness. There are presented the selected helmet systems used in the foreign and domestic solutions, utilizing the magnetic method. An original method of pilot's helmet angular position determination utilizing the magnetic field from single flat coil and quaternion calculus is presented. The valuable elements are given mathematical relationships describing the characteristics of the magnetic field generated by selected types of electric coils as well as the results of simulation tests and the laboratory experimental verification of a flat coil model (designed in the Air Force Institute of Technology - AFIT) with a given number of coils

Keywords: helmet-mounted cueing systems, magnetic method.

Autorzy:

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

dr inż. **Andrzej Pazur** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, Zakład Awioniki

dr inż. **Mariusz Żokowski** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, Zakład Silników Lotniczych

mgr inż. **Paweł Janik** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, Zakład Awioniki

mgr inż. **Wojciech Paterek** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, Zakład Awioniki