



Koncepcja i algorytm manewru ochrony obiektu latającego przed kolizją z napowietrzną linią przesyłową wysokiego napięcia *

Zbigniew KORUBA, Janusz TUŚNIO

*Katedra Technik Komputerowych i Uzbrojenia, Politechnika Świętokrzyska,
Al. 1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce*

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono koncepcję, przybliżony model matematyczny i wstępne obliczenia dotyczące manewru chroniącego nisko latający aparat bezpilotowy lub samosterujący pocisk raketowy przed kolizją z linią przesyłową lub innym napowietrznym urządzeniem elektroenergetycznym. Praca może być wstępem do prac konstrukcyjnych nad systemami sterowania wykorzystywanymi podczas działań bojowych środków napadu powietrznego, a także w cywilnej technice lotniczej.

Słowa kluczowe: mechanika, ochrona, kolizja, obiekt latający, linia przesyłowa

1. WSTĘP

Współcześnie prowadzone działania wojenne wymagają stosowania różnorodnych środków napadu powietrznego, w tym raket samosterujących oraz bezpilotowych aparatów latających. Postępy w zakresie budowy artylerii i przeciwlotniczych pocisków raketowych sprawiły, że przelot aparatu bezpilotowego lub rakiety powinien odbywać się na minimalnej wysokości, nawet rzędu kilkudziesięciu metrów, co w znacznym stopniu zabezpiecza przed wykryciem i zniszczeniem.

* Artykuł był prezentowany na VIII Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 6-8 października 2010 r.

Dodatkowym czynnikiem utrudniającym utratę wspomnianych środków napadu jest lot, w trakcie którego dokonywane są zmiany kursu o charakterze pseudolosowym, dodatkowo utrudniające wykrycie i zniszczenie. Lot na wysokości kilkudziesięciu metrów wiąże się jednak ze znacznym ryzykiem kolizji urządzenia zarówno z wysokimi drzewami, jak i budowlami oraz instalacjami, między którymi ważne miejsce zajmują napowietrzne linie przesyłowe wysokiego napięcia. Stanowią one znaczne zagrożenie dla nisko latających obiektów wojskowych, a także typowo cywilnych, takich jak samoloty sportowe, szybowce czy motolotnie. Poza stwarzanym ryzykiem kolizji mogą one też być źródłem zakłóceń, utrudniających pracę aparatury nawigacyjnej i kontrolno-pomiarowej. Powyższe uwarunkowania sprawiają, że konieczne staje się ich niezawodne wykrywanie i lokalizacja położenia, pozwalające na bezpieczne ich ominięcie przez obiekt latający oraz opracowanie algorytmu działań pozwalających na odpowiednio wczesne ich ominięcie.

Prędkość poruszania się aparatów latających i samosterujących pocisków raketowych nie przekracza na ogół 100 m/s, w związku z czym należy przyjąć, że wykrycie i lokalizacja przeszkody powinny nastąpić z odległości przynajmniej 1000 metrów przed nią. Stanowi to wytyczną do konstrukcji układu wykrywającego i lokalizującego linię napowietrzną. Wykrycie linii przesyłowej następuje, gdy odebrany zostanie sygnał częstotliwości 50 Hz, do pełnej lokalizacji położenia kąтового linii potrzebna jest znajomość kierunku, z którego pochodzi sygnał emitowany przez linię oraz znajomość jej odległości od układu monitorującego.

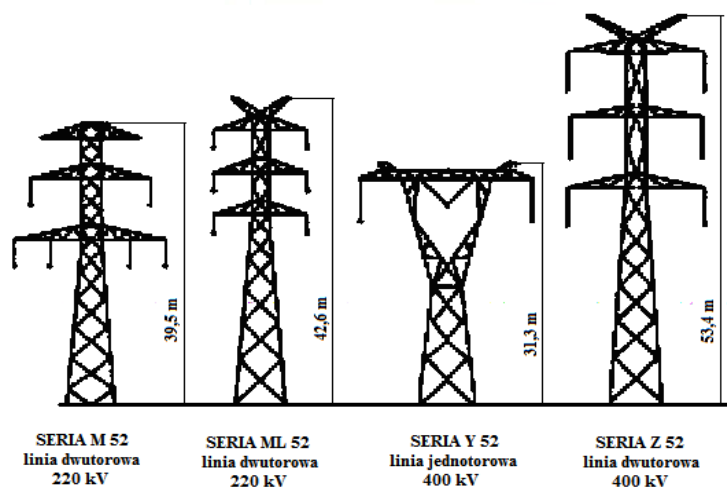
Wyznaczenie odległości linii wymaga znajomości napięcia, pod którym się ona znajduje, zakładając jednak, że istotnym zagrożeniem dla lotu rozważanego obiektu są linie wysokie (powyżej 30 m). Wstępne obliczenia można ograniczyć do linii 220 lub nawet 400 kV, przyjmując, że każdy manewr uniknięcia kolizji powinien doprowadzić do zwiększenia wysokości lotu powyżej przyjętej maksymalnej przewidywanej wysokości linii, czyli ok. 65 m. Przy tak przyjętym założeniu wystarczająca jest znajomość kierunku, na którym znajduje się przeszkoda; rozpoczęcie manewru omijania następuje po sygnale układu potwierdzającego znalezienie się środka napadu w pobliżu rozpatrywanej instalacji. W przypadku linii wysokich (najwyższych napięć) celowe może się okazać rozważenie manewru polegającego na przelocie obiektu latającego poniżej przewodów linii stanowiącej przeszkodę.

W opracowaniu przedstawiono koncepcję i uproszczony model matematyczny manewru obiektu latającego, chroniącego przed kolizją z napowietrzną linią przesyłową wysokiego napięcia.

2. CHARAKTERYSTYKA LINII PRZESYŁOWYCH JAKO ZAGROŻENIA LOTU, ICH WYKRYWANIE I LOKALIZACJA

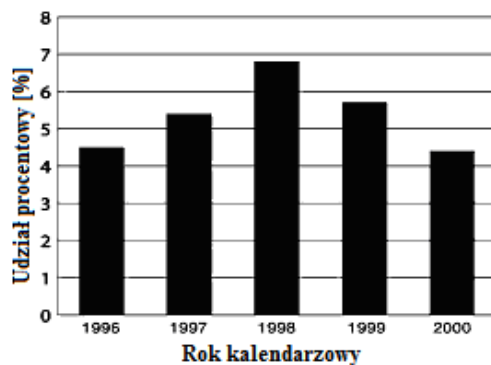
Z punktu widzenia bezpieczeństwa lotów w aspekcie możliwej kolizji obiektu napowietrzne linie przesyłowe są instalacjami o zróżnicowanych wymiarach geometrycznych, z których największe znaczenie mają wysokość zawieszenia linii, wysokość słupów, a także ich konstrukcja i odległości między nimi. Wysokość słupów jest na ogół proporcjonalna do wartości napięcia linii. Na ogół wysokość słupów linii wysokiego napięcia mieści się w granicach 30-65 metrów [3], przy czym większe wysokości dotyczą linii najwyższych napięć. Przykładowe kontury słupów wysokiego napięcia 220 i 400 kV pokazano na rys. 1.

Słupy o konstrukcji kratowej mają większe wysokości od słupów o konstrukcji rurowej; istotny wpływ na widoczność i wykrywalność linii ma jej otoczenie. Z pokładu obiektów latających lepiej dostrzegalne są linie o tradycyjnej konstrukcji prowadzone przez tereny leśne ponad przecinkami, zaś bardzo słabo widoczne są nowoczesne tzw. linie nadleśne, prowadzone na dużych wysokościach ponad koronami drzew. Na skutek słabej widoczności linie przesyłowe stanowią zagrożenie dla nisko latających samolotów, śmigłowców i innych obiektów cywilnych i wojskowych.



Rys. 1. Przykładowe kontury słupów wysokiego napięcia 220 i 400 kV, na podstawie [3]

Fig. 1. Sample contours of the high-tension pylons 220 and 400 kV based on [3]



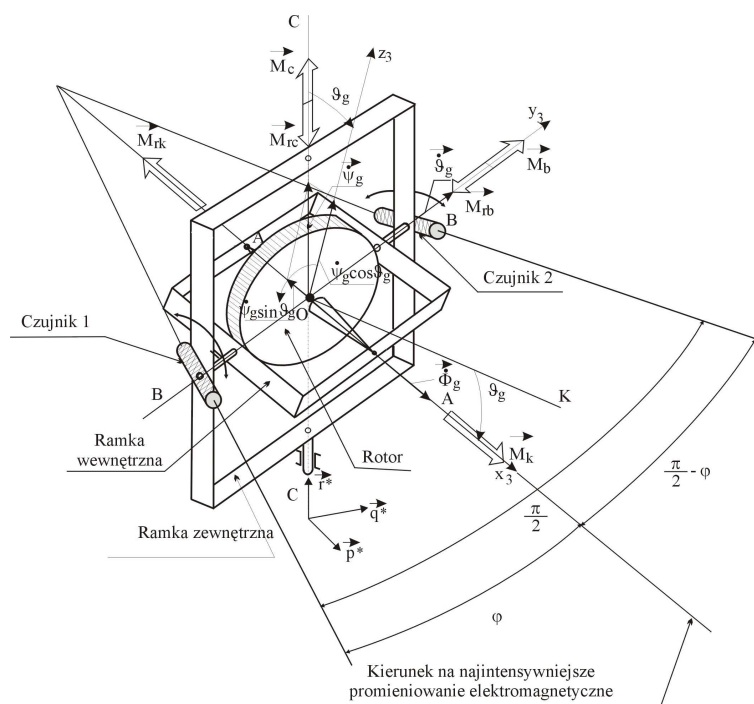
Rys. 2. Udział kolizji komercyjnych śmigłowców z liniami przesyłowymi (%) w USA w latach 1996-2000 (całkowita liczba wypadków 934) [5]

Fig. 2. The share of commercial helicopter collision with transmission lines (%) in the U.S. in the years 1996-2000 (total number of accidents 934) [5]

O znaczeniu problemu dla lotnictwa cywilnego świadczy przedstawiony na rys. 2 procentowy udział kolizji śmigłowców z liniami przesyłowymi w USA [5]; większość takich kolizji prowadzi w konsekwencji do śmierci lub kalectwa ludzi oraz znacznych strat materialnych. Brak jest danych dotyczących wypadków lotnictwa wojskowego, spodziewać się jednak należy, że jest to również problem istotny zarówno w odniesieniu do aparatów latających pilotowanych przez człowieka, jak i bezałogowych czy też nisko latających manewrujących pocisków rakietowych.

3. ALGORYTM OMIJANIA LINII WYSOKIEGO NAPIĘCIA PRZEZ OBIEKT LATAJĄCY

Napowietrzne linie przesyłowe emitują pole elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz, wartości natężenia obu składowych pola elektromagnetycznego (pola elektrycznego i magnetycznego) w miarę oddalania się od osi linii bardzo szybko maleją. Wykrycie obecności linii i pomiar natężenia obu składowych pola wymagają użycia wzmacniaczy o wzmacnieniu rzędu 140 dB oraz specjalnych czujników, opisanych między innymi w opracowaniach [1, 2]. Lokalizacja położenia kąтового linii, istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa lotu wymaga zastosowania dwóch czujników o właściwościach kierunkowych, którymi są niektóre czujniki pola magnetycznego.



Rys. 3. Schemat koncepcji lokalizacji położenia kątownego linii przesyłowej

Fig. 3. Schematic concept of angular location of transmission line

Oprócz metody lokalizacji położenia linii opisanej w pracy [6] duże nadzieje autorzy pokładają w czujnikach kierunkowych typu fluxgate oraz magnetoindukcyjnych [1]. W ogólnym przypadku w metodach tych w dwóch wzajemnie prostopadłych czujnikach (w naszym przypadku umieszczonych na ramce wewnętrznej giroskopu, jak to jest pokazane na rys. 3) indukowane są przebiegi napięciowe o wartości skutecznej zależnej od natężenia pola magnetycznego (metoda fluxgate) lub częstotliwości zależnej od natężenia pola (metoda magnetoinduktywna).

Wyjściowe przebiegi napięciowe czujników podlegają wzmocnieniu, a następnie są doprowadzane do układu obróbki [6, 7], gdzie na podstawie relacji wzajemnych pomiędzy przebiegami określone jest położenie kątowe φ linii przesyłowej względem toru obiektu latającego. Odpowiednie skierowanie czujników umożliwia naprowadzenie obiektu na linię oraz lot równoległy do niej (gdy dwusieczna kąta zawartego pomiędzy osiami czujników jest prostopadła do osi linii przesyłowej) lub też lot ponad osią linii przesyłowej (gdy obiekt latający wraz z zespołem czujników znajduje się ponad jej osią).

Jak już wcześniej wspomniano, rozważane czujniki mocowane są sztywno do ramki wewnętrznej giroskopu tak, by ustawione były w jej płaszczyźnie wzajemnie prostopadle (rys. 3). Pozwala to na stabilne, ustalone położenie czujników niezależne od prędkości kątowych p^* , q^* , r^* pokładu obiektu latającego, na którym giroskop się znajduje. Dodatkowo, giroskop jest sterowany momentami przykładanymi do jego ramek, przez co staje się elementem wykonawczym ciągłego wyznaczania linii najintensywniejszego promieniowania elektromagnetycznego, tj. położenia linii wysokiego napięcia. Układ automatycznego sterowania giroskopu działa w ten sposób, by jego oś stanowiła dwusieczną kąta prostego, jaki tworzą ze sobą osie czujników rozmieszczonych na ramce wewnętrznej giroskopu (rys. 3). Dzięki temu utrzymywana będzie na stałym poziomie wartość kąta $\varphi = \pi/2$, czyli równość napięć w obu torach pomiarowych a tym samym wartości ich ilorazu $u_2/u_1 = 1$.

Momenty sterujące przykładane do ramek giroskopu powinny zatem zmieniać się według następującego prawa [2]:

$$M_b = -k_b(\vartheta_g - \varepsilon) + k_c(\psi_g - \sigma) - h_g \left(\frac{d\vartheta_g}{dt} - \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (1a)$$

$$M_c = -k_c(\vartheta_g - \varepsilon) - k_b(\psi_g - \sigma) - h_g \left(\frac{d\psi_g}{dt} - \frac{d\sigma}{dt} \right) \quad (1b)$$

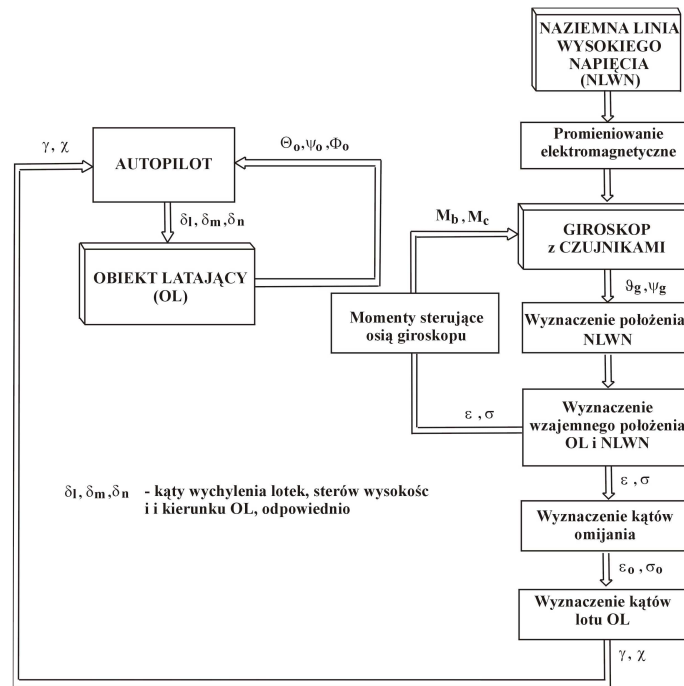
gdzie: k_b, k_c – współczynniki wzmocnień regulatora giroskopu;

h_g – współczynniki tłumienia regulatora giroskopu;

ϑ_g, ψ_g – kąty odchylenia ramki wewnętrznej i zewnętrznej giroskopu, odpowiednio;

ε, σ – kąty określające położenie linii obserwacji najintensywniejszego promieniowania elektromagnetycznego (kąty pożądane).

Schemat funkcjonalny działania układu omijania NLWN przez OL przedstawiony jest na rys. 4. Na podstawie wyznaczonej linii obserwacji najintensywniejszego promieniowania elektromagnetycznego, obliczany jest kąt omijania ε_o naziemnej linii wysokiego napięcia. Przy założonym przewyższeniu R_o lotu OL nad NLWN. Informacje o położeniu zarówno LONPE, jak i kąta omijania przekazywane są do autopilota OL, gdzie wypracowywany jest odpowiedni manewr.

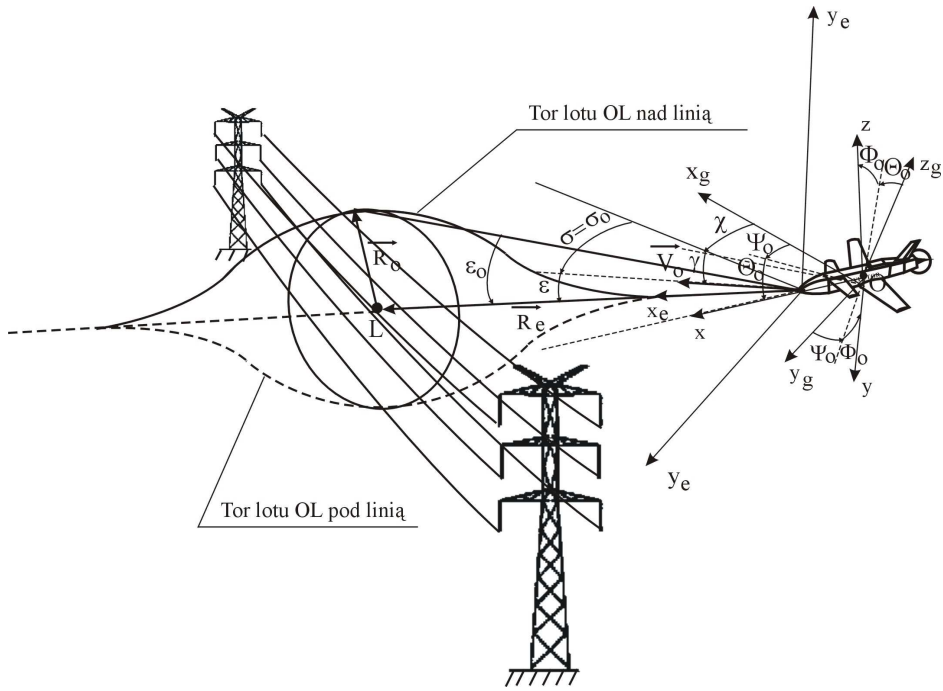


Rys. 4. Schemat funkcjonalny działania układu omijania NLWN przez OL

Fig. 4. Functional diagram of the system to circumvent high voltage overhead power lines by flying object (FO)

Na rys. 5 natomiast pokazany jest widok ogólny manewru omijania NLWN przez OL wraz z przyjętymi układami współrzędnych i odpowiednimi wielkościami liniowo-kątowymi. Oznaczają one następująco:

- Φ_o, Θ_o, Ψ_o – kąty przechylenia, pochylenia i odchylenia, odpowiednio;
- χ, γ – kąty lotu OL (kąty odchylenia i pochylenia wektora prędkości OL);
- \vec{V}_o – wektor prędkości lotu OL;
- \vec{R}_e – wektor wzajemnej odległości OL i źródła najintensywniejszego promieniowania elektromagnetycznego;
- \vec{R}_o – wektor bezpiecznej odległości przelotu OL nad/pod NLWN.



Rys. 5. Widok ogólny omijania NLWN przez OL

Fig. 5. General view of the avoidance of overhead high voltage power lines by FO

Kąty ε , σ określające położenie linii obserwacji najintensywniejszego promieniowania elektromagnetycznego wyznaczymy z następującego układu równań [4]:

$$\frac{dR_e}{dt} = -V_o [\cos(\varepsilon - \gamma) \cos \sigma \cos \chi + \sin \sigma \sin \chi] \quad (2a)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{V_o [\cos(\varepsilon - \gamma) \sin \sigma \cos \chi - \cos \sigma \sin \chi]}{R_e} \quad (2b)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_o \sin(\varepsilon - \gamma) \cos \chi}{R_e \cos \sigma} \quad (2c)$$

Warunki początkowe dla układu równań różniczkowych (2) są następujące:

$$R_e(0) = \sqrt{(x_{Oo} - x_{Lo})^2 + (y_{Oo} - y_{Lo})^2 + (z_{Oo} - z_{Lo})^2} \quad (3a)$$

$$\sigma(0) = \arcsin \frac{y_{Lo} - y_{Oo}}{R_{eo}} \quad (3b)$$

$$\varepsilon(0) = \operatorname{arctg} \frac{z_{Lo} - z_{Oo}}{x_{Lo} - x_{Oo}} \quad (3c)$$

Założmy dodatkowo, że proces omijania NLWN zachodzi w płaszczyźnie pionowej. Równania (2) uproszczą się wówczas do postaci

$$\frac{dR_e}{dt} = -V_o \cos(\varepsilon - \gamma) \quad (4a)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_o \sin(\varepsilon - \gamma)}{R_e} \quad (4b)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = a_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4c)$$

Omijanie LWN, zgodnie z rys. 5, nastąpi w przypadku, gdy:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_o - \varepsilon \quad (5)$$

$$\varepsilon_o = \pm \operatorname{arctg} \frac{R_o}{R_e} \quad (6)$$

Jeśli OL będzie omijał LWN, przelatując nad nią, wówczas we wzorze (6) znak będzie „+”, jeśli natomiast pod nią, znak będzie „-”.

Na podstawie wzorów (5) i (6) mamy

$$\frac{d\varepsilon^*}{dt} = \pm \frac{R_o}{R_e^2} \frac{dR_e}{dt} - \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (7)$$

Algorytm zbliżania się OL do punktu S bezpiecznego przelotu nad NLWN przyjmujemy według metody proporcjonalnej nawigacji [4]

$$\frac{d\chi}{dt} = a_\sigma \frac{d\sigma}{dt} \quad (8a)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = a_\varepsilon \frac{d\varepsilon^*}{dt} \quad (8b)$$

gdzie:

a_σ, a_ε – stałe współczynniki proporcjonalnej nawigacji.

W autopilocie OL wypracowywane są kąty lotu χ i γ zgodnie z algorytmem opisanym wzorami (8) i przekazywane do organów wykonawczych sterowania.

4. WNIOSKI

Przedstawione w niniejszej pracy rozważania teoretyczne i algorytm omijania naziemnej linii wysokiego napięcia małej częstotliwości przez obiekt latający pozwalają na zaprojektowanie pilota automatycznego zapewniającego uniknięcie kolizji z tego rodzaju linią. Obiektem latającym narażonym na wspomnianą kolizję może tu być zarówno śmigłowiec, samolot sportowy, bezzałogowy aparat latający, motolotnia, jak i nisko lecący manewrujący pocisk raketowy. Z tego względu badania symulacyjne możliwości wykonania opisywanego w pracy manewru należy przeprowadzić dla konkretnego obiektu latającego, uwzględniając jego specyfikę i warunki w jakich wypełnia on swoje zadanie. Należy podkreślić, że przedstawiony algorytm omijania NLWN może znaleźć szczególne zastosowanie w coraz powszechniej wykorzystywanych bezzałogowych aparatach latających, wykonujących swoje misje m.in. nad obszarami z przebiegającymi nad nimi liniami wysokiego napięcia.

Problem omówiony w niniejszym opracowaniu jest częścią projektu nr ON514001534 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2008-2010.

LITERATURA

- [1] Caruso M.J., Smith C.H., Bratland T., Schneider A., *New Perspective on Magnetic Field Sensing*, Honeywell, Inc. 5/98, 1998.
- [2] Gaines R.B., *Method and Apparatus for Detecting a Power Line*, United States Patent Number 5.548.279, 20 August, 1996.
- [3] *Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka*, Informator Grupy Kapitałowej Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA, Operator SA, wydanie 3, Warszawa, 2005.
- [4] Koruba Z., Osiecki J. W., *Budowa, dynamika i nawigacja wybranych broni precyzyjnego rażenia*, podręcznik akademicki, Politechnika Świętokrzyska, s. 484, Kielce, 2006.
- [5] Monsoo P., *Millimeter-Wave Polarimetric Radar Sensor for Detection of Power Lines in Strong Clutter Background*, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in University of Michigan, 2003.
- [6] Tuśnio J., Koruba Z., Detecting and locating overhead power lines in the aspect of aerial vehicle safety, *Polish Journal of Environmental Studies*, pp. 105-109, vol. 17, No. 3C, 2008.
- [7] Tuśnio J., Budowa i badania bloków funkcjonalnych układu do wykrywania i lokalizacji położenia linii przesyłowej wysokiego napięcia jako źródła promieniowania elektromagnetycznego małej częstotliwości, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, s. 164-166, r. 85, nr 11/2009, 2009.

Concept and Algorithm of Flying Object Protection Manoeuvre Against Collision with Overhead High Voltage Transmission Line

Zbigniew KORUBA, Janusz TUŚNIO

Abstract. In the paper are presented: the concept, approximate mathematical model and preliminary calculations of low-flying manoeuvre that protects the camera or missile before collision with an overhead high voltage transmission line or other electricity device. Presented work can be an introduction to construction works on the control systems used during the robbery of a combat aircraft as well as in civil aerospace.

Keywords: mechanics, protection, collision, flying object, transmission line

