

dr inż. Janusz Tuśnio
 dr hab. inż. Zbigniew Koruba
 Politechnika Świętokrzyska

LOKALIZACJA CELU I NAPROWADZENIE LATAJĄCEGO ŚRODKA NAPADU NA PUNKTOWE ŹRÓDŁO PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO MAŁEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

W opracowaniu przedstawiono koncepcję, model matematyczny oraz szacunkowe obliczenia dotyczące lokalizacji położenia kąтового punktowych urządzeń elektroenergetycznych. Rozpatrywana jest także możliwość naprowadzania obiektu latającego na tego rodzaju urządzenia.

LOCATING THE SOURCES OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC RADIATION AS POTENTIAL AIR-ATTACK TARGETS

The work discusses the new concept, mathematical model and estimates for locating the angular position of electromagnetic equipment. The considerations include guiding flying vehicles onto equipment of this type.

1. WPROWADZENIE

W warunkach prowadzonych współcześnie działań wojennych lotnictwu wojskowemu stawiany jest szereg zadań, do których między innymi należy niszczenie lub obezwładnianie celów emitujących pole elektromagnetyczne. W zakresie wysokich częstotliwości emitowanych sygnałów celami takimi są na przykład stacje radiolokacyjne czy też radiowe i telewizyjne stacje nadawcze, w zakresie zaś bardzo niskich częstotliwości – linie przesyłowe wysokiego napięcia i inne obiekty, takie jak elektrownie czy też stacje transformatorowe. Ponieważ obiekty takie w warunkach wojennych mogą być chronione przed zniszczeniem, celowym jest, by atak dokonywany był przez samonaprowadzane środki napadu powietrznego. W każdym przypadku warunkiem dokonania pomyślnego ataku jest wykrycie i lokalizacja celu oraz prawidłowe naprowadzenie środka napadu powietrznego na cel.

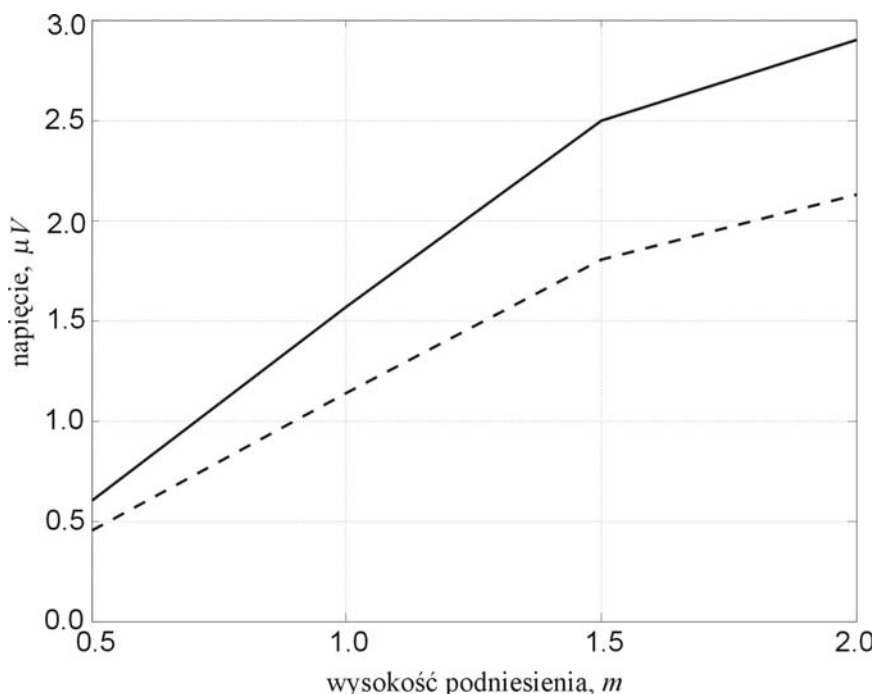
W przypadku gdy celem ataku jest napowietrzna linia przesyłowa wysokiego napięcia lub inne urządzenie elektroenergetyczne, wykrycie celu następuje, gdy pokładowe urządzenie monitorujące odbierze sygnał o częstotliwości 50 Hz świadczący o obecności celu w pewnej odległości. Pełna lokalizacja celu wymaga znajomości kierunku, z którego pochodzi emitowany sygnał a także odległości celu od urządzenia monitorującego.

Określenie odległości celu wymaga dokładnej znajomości jego właściwości (głównie napięcia, pod którym się on znajduje). W przypadku, gdy atak na cel następuje z wykorzystaniem pocisków raketowych z głowicami bojowymi uruchamianymi przez programowany zapalnik czasowy, znajomość odległości celu jest niezbędna, jednak w sytuacji, gdy naprowadzanie na cel odbywa się w sposób automatyczny i atak następuje w chwili bezpośredniego zbliżenia do celu, wystarczająca jest znajomość kierunku, na którym znajduje się cel, zadziałanie głowicy bojowej następuje po sygnale układu potwierdzającego znalezienie się środka napadu w strefie bliskiej lub pośredniej względem atakowanego urządzenia.

W opracowaniu przedstawiono zasady lokalizacji położenia kąowego napowietrznych urządzeń elektroenergetycznych, o charakterze punktowym oraz naprowadzania na nie środków napadu powietrznego.

2. CHARAKTERYSTYKA NIEKTÓRYCH WŁAŚCIWOŚCI OBIEKTÓW ATAKU

Naziemne urządzenia elektroenergetyczne i linie przesyłowe wysokiego napięcia emitują pole elektryczne i magnetyczne o częstotliwości 50 Hz. Natężenie pola elektrycznego jest proporcjonalne do napięcia elektrycznego występującego w urządzeniu lub linii przesyłowej i jest stałe w czasie (zależy od odległości od źródła pola i konfiguracji elementów ekranujących, np. uziemionych konstrukcji wsporczych linii, słupów przesyłowych itp.).



Rys. 1. Przykładowa zależność napięcia wyjściowego czujnika od wysokości podniesienia (linia wysokiego napięcia 110 kV, linia ciągła – odległość 20 m, linia przerywana – odległość 40 m) [4]

Natężenie pola magnetycznego jest proporcjonalne do natężenia prądu elektrycznego przepływającego i zmienia się wraz z jego zmianami. Wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego bardzo szybko maleją przy oddalaniu się od źródła promieniowania lub w bok od osi linii przesyłowej oraz w nieco mniejszym stopniu przy zbliżaniu się do konstrukcji kratownicy słupa, co jest spowodowane jej właściwościami ekranującymi. Silne działanie ekranujące posiadają również obiekty budowlane oraz drzewa i krzewy znajdujące się w sąsiedztwie linii przesyłowej, wydaje się jednak, że działanie takie nie ma większego znaczenia, gdy obiekt jest wykrywany, śledzony i atakowany z wysokości przewyższającej wysokość masztów linii czy też innego urządzenia emitującego pole elektryczne małej częstotliwości. Przeprowadzone badania [4] wykazały też, że wartość natężenia emitowanego pola elektrycznego bardzo silnie maleje w trakcie zbliżania się czujnika do powierzchni gruntu (rys. 1).

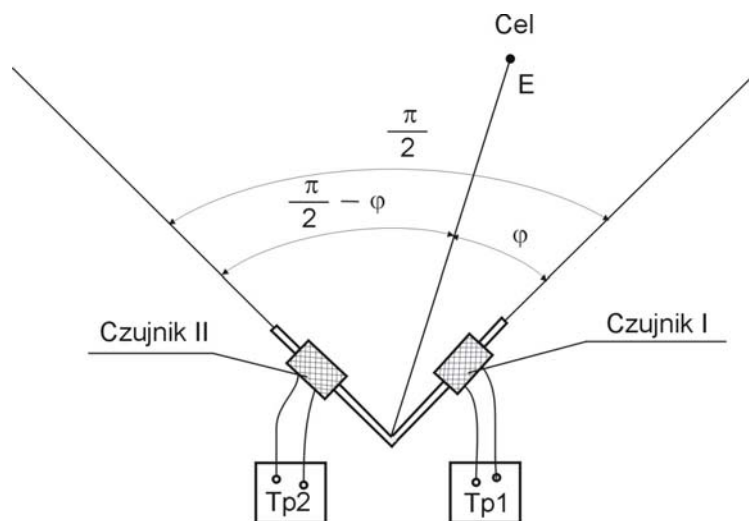
Ze względu na fakt, że wartość natężenia pola elektrycznego nie jest zależna od wartości prądu płynącego przez urządzenie a głównie od wartości napięcia, przyjęto, że właśnie natężenie pola elektrycznego jest wielkością umożliwiającą określenie położenia celu. Wykrycie celu następuje wtedy, gdy pokładowe urządzenie monitorujące odbierze sygnał o częstotliwości 50 Hz świadczący o obecności w pewnej odległości czynnej linii wysokiego napięcia lub innego urządzenia elektroenergetycznego. Do pełnej lokalizacji celu o charakterze punktowym

niezbędna jest znajomość kierunku, z którego pochodzi sygnał emitowany przez cel, a także jego odległość od urządzenia monitorującego.

Realizacja tak sformułowanych zadań wymaga opracowania i wykonania czujników o właściwościach kierunkowych, wzmacniaczy pomiarowych o znacznym wzmacnieniu (przekraczającym 10^6) oraz ze względu na zakłócenia małej częstotliwości - zespołów filtrów pasmowych wysokiego rzędu i znacznej dobroci (o bardzo stromych charakterystykach amplitudowych i bardzo wąskich pasmach przepustowych) [7].

3. WYKRYWANIE I LOKALIZACJA POŁOŻENIA KĄTOWEGO CELU PUNKTOWEGO

Schematycznie zasadę wykrywania i lokalizacji celu przedstawiono na rys. 3 [5]. Cel punktowy będący źródłem zmiennego pola elektrycznego o natężeniu E znajduje się wewnątrz kąta prostego, pod którym rozmieszczone są względem siebie dwa czujniki o właściwościach kierunkowych. Każdy z czujników składa się z cewki o znacznej indukcyjności, osadzonej na pręcie z materiału ferromagnetycznego. Przemienny sygnał napięciowy o częstotliwości 50 Hz indukowany w każdym czujniku podlega wzmacnieniu, filtracji w zespole filtrów pasmowo-przepustowych, mającej na celu eliminację sygnałów zakłócających, a następnie zostaje doprowadzony do prostownika idealnego (przetwornika AC/DC). Napięcia u_1 i u_2 na wyjściach „bliźniaczych” torów pomiarowych podlegają pomiarowi oraz obróbce w torach pomiarowych Tp_1 i Tp_2 zgodnie z dalej opisanymi zasadami.



Rys. 2. Schemat koncepcji lokalizacji położenia kąтового celu punktowego [5]

W opracowaniu [5] wyprowadzono zależność wiążącą wartości napięć u_1 i u_2 na wyjściach czujników z kątem odchylenia linii celu φ od osi czujnika I:

$$\frac{u_1}{\cos \varphi} = \frac{u_2}{\sin \varphi} \Rightarrow \frac{u_2}{u_1} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

Uzyskana zależność (1) wskazuje, że w układzie przedstawionym na rys. 2 możliwe jest określenie położenia kąтового celu punktowego poprzez pomiar napięć na wyjściach prostowników

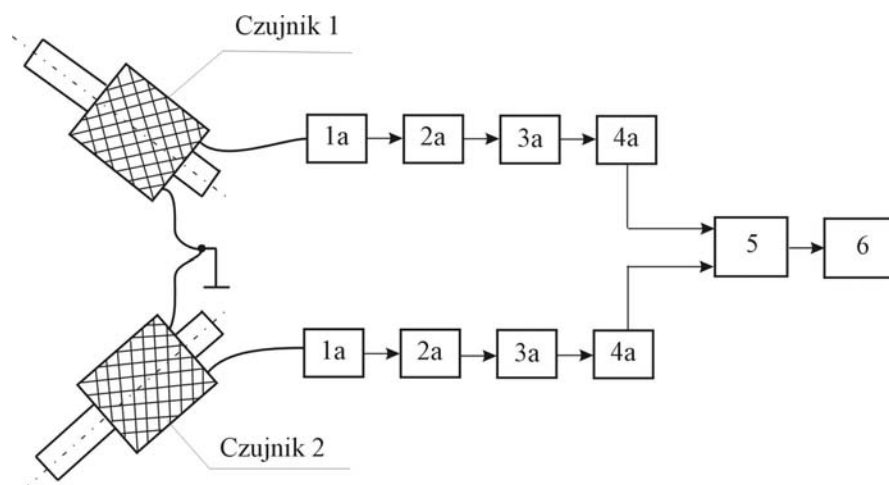
padłych do siebie czujników o właściwościach kierunkowych oraz wyznaczenie ich ilorazu. Chwilowa wartość kąta φ może być znaleziona w wyniku przeprowadzenia operacji:

$$\varphi = \arctg \frac{u_2}{u_1} \quad (2)$$

Jeżeli dwusieczna kąta zawartego pomiędzy zespołem czujników pokrywa się z osią obiektu latającego atakującego cel i linią łączącą obiekt latający z celem to w tym przypadku zachodzi:

$$\varphi = \frac{\pi}{4} = \arctg 1 \quad (3)$$

Utrzymanie lotu obiektu w kierunku celu wymaga w tym przypadku takiego jego sterowania, by utrzymywać na stałym poziomie wartość kąta $\varphi = \pi/4$, czyli dążyć do równości napięć w obu torach pomiarowych a tym samym wartości ich ilorazu $u_2/u_1 = 1$.



Rys. 3. Schemat blokowy układu umożliwiającego lokalizację celu punkowego

Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy układu umożliwiającego lokalizację celu punkowego położonego w części płaszczyzny ograniczonej przez linie osi czujników. Układ ten zawiera dwa identyczne tora wzmacniaczy i filtrów. Napięcia generowane na wyjściach czujników o właściwościach kierunkowych doprowadzone są do wstępnych wzmacniaczy pomiarowych 1a i 1b o znacznym wzmacnieniu (przekraczającym 10^6). Celem eliminacji zakłóceń elektrycznych i wyodrębnienia sygnałów użytecznych wzmacnione wstępnie sygnały doprowadzono do dwóch zespołów filtrów pasmowoprzepustowych 2a i 2b o częstotliwości środkowej 50Hz. Poprawna realizacja zadania wymaga, by były to filtry o bardzo ostrych charakterystykach i wąskim paśmie przepustowym; w trakcie prowadzonych badań wykorzystano zespoły filtrów Butterwortha 8 rzędu o dobroci $Q = 10$ [7]. Po przeprowadzeniu filtracji sygnały w obu torach pomiarowych zostają wzmacnione we wzmacniaczach końcowych 3a i 3b a następnie wyprostowane w pełnookresowych prostownikach „idealnych” 4a i 4b. Kolejnym blokiem funkcjonalnym jest układ 5 dzielący przez siebie sygnały z torów pomiarowych (wykonujący operację $y = u_2/u_1$). Uzyskany iloraz podlega konwersji w generatorze funkcyjnym 6 realizującym funkcję wyjściową zgodnie z zależnością (2).

4. ZASADA NAPROWADZANIA ŚRODKA NAPADU POWIETRZNEGO NA CEL

Warunkiem pomyślnego rozwiązania problemu jest znajomość właściwości dynamicznych środka napadu a także charakterystyk zastosowanego układu pomiarowego wykrywającego i lokalizującego położenie celu. Spełnienie tych warunków umożliwia opracowanie strategii działania układu, którego zadaniem jest wykrycie, śledzenie i naprowadzenie na cel oraz dokonanie ataku. Atakowanie celów takich jak linie przesyłowe czy stacje transformatorowe odbywa się najczęściej za pomocą rozpadających się u celu kaset zawierających przewodzące włókna kompozytowe, zwanych potocznie bombami grafitowymi. W przypadku gdy atakowany cel ma charakter liniowy (np. linia przesyłowa), użycie do ataku obiektu latającego wymaga takiej optymalizacji toru jego lotu, by zapewnić równoczesne trafienie celu jak największą liczbą kaset; pierwsza trafiająca w cel kasetka powoduje bowiem jego wyłączenie a tym samym sprawia, że niemożliwe jest automatyczne naprowadzenie dalszych kaset na cel nieczynny.

W ogólnym przypadku sterowany środek napadu powietrznego jest wielowymiarowym obiektem regulacji. Rozpatrywany obiekt latający, służący niszczeniu naziemnych urządzeń elektroenergetycznych ma co najmniej dwie wielkości regulowane – wysokość lotu i kąt odchylenia względem linii celu, jest też układem autonomicznym, tzn. regulacja wysokości lotu i kąta odchylenia nie wpływają na siebie wzajemnie w sposób istotny (z niewielkim błędem można w analizie zaniedbać sprzężenia skrośne).

Regulacja kąta odchylenia obiektu od linii celu może odbywać się z wykorzystaniem zależności (2) i (3) i zmierzać do zapewnienia wartości zadanej ilorazu $u_2/u_1 = 1$ (w przypadku gdy zadaniem układu automatycznej regulacji jest doprowadzenie obiektu do celu po najkrótszej drodze). Wydaje się też możliwa realizacja procesu regulacji z wykorzystaniem jako wartości zadanej różnicy $u_2 - u_1 = 0$. Taki sposób mógłby znacznie uprościć budowę układu sterowania, ponieważ w miejsce układu dzielącego (rys. 3) możliwe byłoby wprowadzenie prostego wzmacniacza różnicowego. Dodatkowym atutem takiego sposobu jest fakt, że w znacznej odległości od celu wartości uchybu są niewielkie, umożliwiając dość łagodną regulację a ze zmniejszaniem odległości od celu, ze względu na wydatny wzrost natężenia pola elektrycznego wartość uchybu wydatnie rośnie, co może przyczynić się do przyspieszonej reakcji w pobliżu celu.

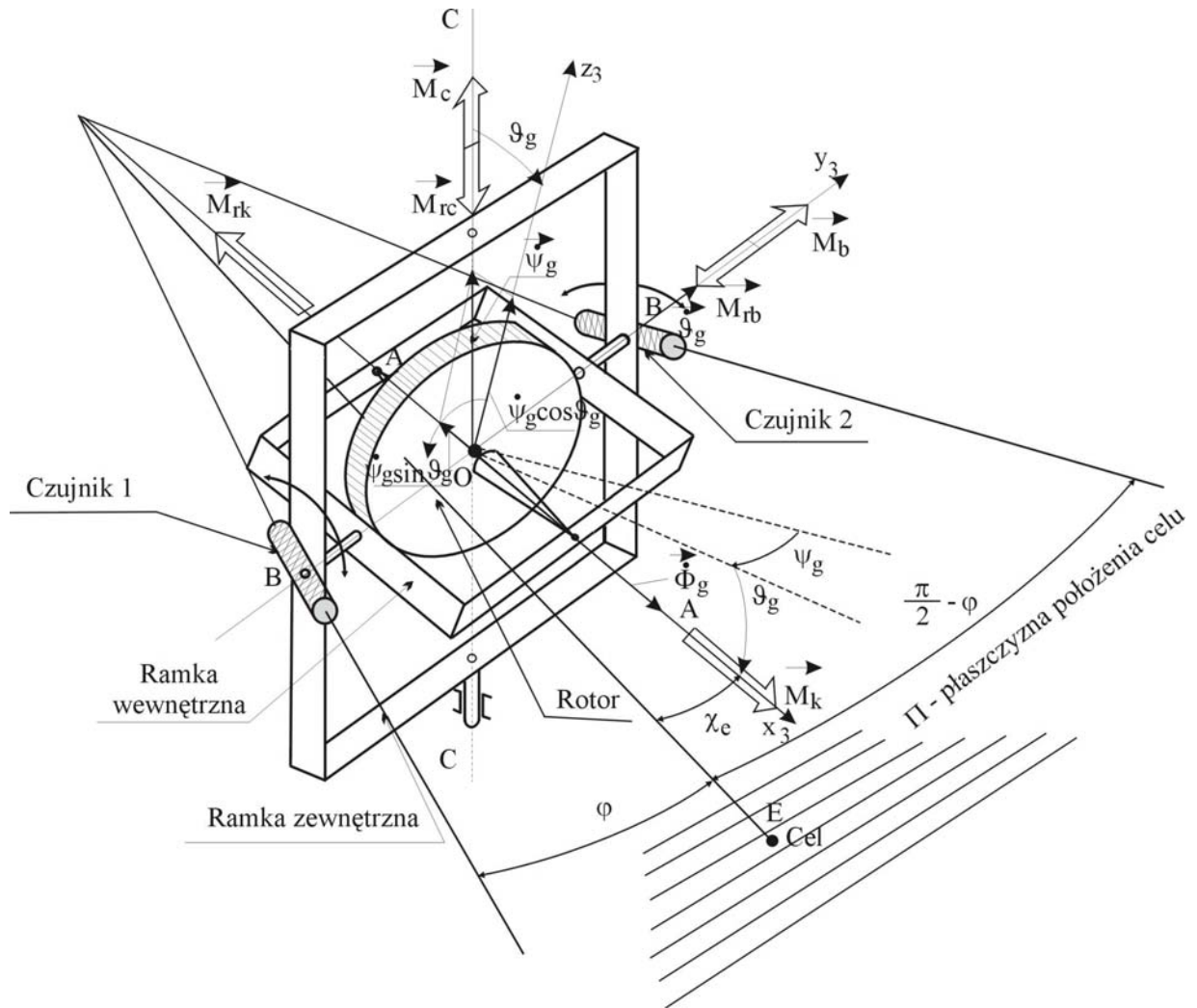
Na rys. 4 przedstawiony jest uproszczony schemat koncepcji sterowania samonaprowadzającym obiektem latającym na źródło promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez nieruchomy punktowy cel naziemny.

Wzajemne położenie punktowego celu naziemnego (PCN) emitującego promieniowanie elektromagnetyczne i obiektu latającego (OL), czyli tzw. linię obserwacji celu (LOC), określimy z następujących równań [3]:

$$\frac{dr}{dt} = -V_b [\cos(\varepsilon - \gamma_b) \cos \sigma \cos \chi_b + \sin \sigma \sin \chi_b] \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{V_b [\cos(\varepsilon - \gamma_b) \sin \sigma \cos \chi_b - \cos \sigma \sin \chi_b]}{r} \quad (4b)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_b \sin(\varepsilon - \gamma_b) \cos \chi_b}{r \cos \sigma} \quad (4c)$$



Rys. 5. Widok ogólny rozmieszczenia czujników na giroskopie sterowanym wraz z przyjętymi układami współrzędnych

Elementem wykonawczym ciągłego wyznaczania LOC, tj. położenia PCN, jest sterowany giroskop mechaniczny wraz z rozmieszczonymi na jego ramce wewnętrznej czujnikami, w ten sposób, by oś giroskopu stanowiła dwusieczną kąta prostego jaki ich osie ze sobą tworzą (rys. 5). Układ automatycznego sterowania giroskopu ma za zadanie tak zmieniać położenie osi obrotów szybkich, by ta wskazywała punkt o największej intensywności promieniowania (cel), czyli pokrywała się z LOC. Dzięki temu utrzymywana będzie na stałym poziomie wartość kąta $\varphi = \pi/4$, 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]:

$$M_b = -k_b(\vartheta_g - \varepsilon) + k_c(\psi_g - \sigma) - h_g \left(\frac{d\vartheta_g}{dt} - \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (6a)$$

$$M_c = -k_c(\vartheta_g - \varepsilon) - k_b(\psi_g - \sigma) - h_g \left(\frac{d\psi_g}{dt} - \frac{d\sigma}{dt} \right) \quad (6b)$$

Problemem do rozwiązania pozostaje ustawienie osi giroskopu zgodnie z kierunkiem linii obserwacji celu, tuż po wykryciu celu. Może bowiem zaistnieć sytuacja, w której odchylenie osi giroskopu od zadanego kierunku będzie znaczące (duża niezgodność warunków początkowych). Układ automatycznej regulacji może wówczas wypracować sterowania, które okażą się technicznie nierealizowalne lub doprowadzą giroskop do utraty stabilności.

Aby oś giroskopu przemieścić do pokrycia się z LOC, należy przyłożyć do jego ramek odpowiednie momenty sił sterujących giroskopem [1]. Najdogodniej jest najpierw zażądać, aby od danego początkowego położenia $\vartheta_g(t_o) = \vartheta_{go}$ i $\psi_g(t_o) = \psi_{go}$ oś giroskopu poprowadzić do położenia: $\vartheta_{go}(0) = \varepsilon_o$ i $\psi_{go}(0) = \sigma_o$ za pomocą $M_{bo} = \text{const}$ i $M_{co} = \text{const}$. Z tego położenia wyznaczone uprzednio i opisane wyrażeniami (6) momenty M_b i M_c , będą utrzymywać oś giroskopu na zadanym torze, tj. wzdłuż linii obserwacji celu. Zatem sterujemy osią giroskopu w dwóch etapach: etap pierwszy – działamy stałymi momentami oraz po osiągnięciu $\vartheta_g = \varepsilon_o$ i $\psi_g = \sigma_o$ przechodzimy do etapu drugiego – działamy momentami opisanymi równaniami (6).

W pierwszym etapie przy warunkach początkowych $\ddot{\vartheta}_{go} = 0$, $\dot{\vartheta}_{go} = 0$, $\ddot{\psi}_{go} = 0$, $\dot{\psi}_{go} = 0$ otrzymujemy następujące rozwiązania równań technicznych (uproszczonych liniowych) [2]:

$$\vartheta_g(t) = \vartheta_{go} + \frac{\Omega(\eta_c M_{bo} + M_{co})}{J_{gk} \omega_{go}^2} \left[t - \frac{2h_g^*}{\omega_{go}^2} \left(1 - e^{-h_g^* t} \cos \omega_g^* t \right) - \frac{(\omega_g^*)^2 - (h_g^*)^2}{\omega_{go}^2 \omega_g^*} e^{-h_g^* t} \sin \omega_g^* t \right] \quad (7a)$$

$$\psi_g(t) = \psi_{go} + \frac{\Omega(\eta_b M_{co} - M_{bo})}{J_{gk} \omega_{go}^2} \left[t - \frac{2h_g^*}{\omega_{go}^2} \left(1 - e^{-h_g^* t} \cos \omega_g^* t \right) - \frac{(\omega_g^*)^2 - (h_g^*)^2}{\omega_{go}^2 \omega_g^*} e^{-h_g^* t} \sin \omega_g^* t \right] \quad (7b)$$

gdzie:

$$\omega_g^* = \sqrt{\omega_{go}^2 - (h_g^*)^2}, \quad \omega_{go}^2 = (1 + \eta_b \eta_c) \Omega^2, \quad h_g^* = \frac{\Omega}{2} (\eta_b + \eta_c), \quad \Omega = \frac{J_{go} n_g}{J_{gk}}.$$

Przy dużych wartościach h_g^* i niewielkim czasie ruchu w etapie pierwszym możemy zastosować przybliżenie:

$$\vartheta_g(t) \approx \vartheta_{go} + \frac{\Omega(\eta_c M_{bo} + M_{co})}{J_{gk} \omega_{go}^2} t \quad (8a)$$

$$\psi_g(t) \approx \psi_{go} + \frac{\Omega(\eta_b M_{co} - M_{bo})}{J_{gk} \omega_{go}^2} t \quad (8b)$$

Narzucamy teraz czas, w ciągu którego oś giroskopu ma przejść od położenia $\vartheta_{go}, \psi_{go}$ do położenia $\vartheta_g = \varepsilon_o, \psi_g = \sigma_o$. Oznaczmy ten czas przez t_g . Wówczas z powyższych równości (wprawdzie przybliżonych) otrzymamy:

$$\vartheta_{go} + \frac{\Omega(\eta_c M_{bo} + M_{co})}{J_{gk} \omega_{go}^2} t_g = \varepsilon_o \quad (9a)$$

$$\psi_{go} + \frac{\Omega(\eta_b M_{co} - M_{bo})}{J_{gk} \omega_{go}^2} t_g = \sigma_o \quad (9b)$$

Jest to układ dwóch równań z dwiema niewiadomymi M_{bo} i M_{co} . Stąd otrzymujemy:

$$M_{bo} = \frac{\eta_b (\varepsilon_o - \vartheta_{go}) + J_{go} n_g (\sigma_o - \psi_{go})}{t_g} \quad (10)$$

$$M_{co} = \frac{\eta_c (\sigma_o - \psi_{go}) - J_{go} n_g (\varepsilon_o - \vartheta_{go})}{t_g} \quad (11)$$

Jeśli zechcemy przemieścić oś giroskopu ze znanego położenia początkowego $\vartheta_{go}, \psi_{go}$, w ciągu określonego czasu t_g , do zadanego położenia, odpowiadającego położeniu linii obserwacji celu, wówczas należy do ramek wewnętrznej i zewnętrznej giroskopu przyłożyć momenty sterujące M_{bo} i M_{co} , opisane równaniami (10) i (11). Po upływie czasu t_g , sterujemy giroskopem zgodnie z algorytmem opisanym wzorami (6).

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawione zostały jedynie wstępne rozważania na temat możliwości naprowadzania obiektu latającego na cel punktowy emitujący źródło promieniowania elektromagnetycznego małej częstotliwości. Kluczowym elementem proponowanego systemu jest sterowany giroskop mechaniczny. Wobec powyższego, od dokładności działania giroskopu silnie zależeć będzie precyzja lokalizacji i samonaprowadzania OL na nieruchomy cel naziemny emitujący wspomniane promieniowanie. Ponadto, zastosowanie giroskopu zapewnia niezawodność działania, stabilność naprowadzania w warunkach oddziaływania zakłóceń zewnętrznych a także prostotę i niewysokie koszty tegoż systemu. W przypadku pozytywnych wyników badań symulacji komputerowej i przeprowadzonego eksperymentu w warunkach laboratoryjnych, może się on okazać nową skuteczną metodą samonaprowadzania niektórych rodzajów broni precyzyjnego rażenia, takich jak np. bomby kierowane, czy też bezzałogowe aparaty latające.

LITERATURA

1. Koruba Z.: Zagadnienie odwrotne dynamiki w sterowaniu giroskopem swobodnym w bezpilotowym aparacie latającym. Biuletyn WAT – Fizyka Lotów i Uzbrojenie, Warszawa, styczeń 1 (557) 1999.

2. Koruba Z.: Dynamika i sterowanie giroskopem na pokładzie obiektu latającego. Monografie, Studia, Rozprawy nr 25. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2001, s. 285.
3. Koruba Z., Osiecki J. W.: Budowa, dynamika i nawigacja wybranych broni precyzyjnego rażenia. Podręcznik akademicki, W. PŚk, Kielce 2006, ISBN 83-88906-17-8, s. 484.
4. Szmirkowski J, Tuśnio J. i inni: Metoda i urządzenie do monitorowania zagrożeń porażenia prądem elektrycznym w warunkach prowadzenia akcji ratowniczych. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2003 r.
5. Tuśnio J., Koruba Z.: Koncepcja określenia położenia kąowego źródła promieniowania elektromagnetycznego małej częstotliwości na przykładzie napowietrznych urządzeń elektroenergetycznych VI Międzynarodowa Konferencja Uzbrojenia – Waplewo 2006.
6. Tuśnio J.: Wykrywanie i lokalizacja napowietrznych urządzeń elektroenergetycznych w aspekcie konstrukcji i eksploatacji aparatów latających Mat. Konf. II Międzynarodowej Konferencji „Naukowe Aspekty Bezpilotowych Aparatów Latających”. Kielce – Cedzyna 10 – 12 maja 2006 r.
7. Tuśnio J., Koruba Z.: Generation and reduction of slow-varying disturbances affecting the operation of systems for detection and location of electromagnetic fields from overhead power lines - 8th Conference on Active Noise and Vibration Control Methods MARDiH – Kraków – Krasiczyn, Poland 11 – 14. 06. 2007. ISBN 83-89772-41-8.