

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

GIROSKOP JAKO STABILIZATOR POŁOŻENIA KĄTOWEGO POKŁADOWYCH CZUJNIKÓW DO WYKRYWANIA I LOKALIZACJI NAWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

W pracy przedstawiono ideę budowy i problemy konstrukcyjne pokładowych urządzeń do wykrywania i lokalizacji położenia kątownego obiektów emitujących pole elektromagnetyczne takich jak nawietrzne linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Przedstawiono sygnały zakłócające pracę urządzeń w warunkach ruchu i sposoby ich redukcji drogą zastosowania filtrów aktywnych a także koncepcję i wstępną analizę zastosowania giroskopu jako stabilizatora położenia kątownego czujników, wpływającego na redukcję zakłóceń wolnozmiennych wywołanych wahaniami urządzenia latającego.

A GYROSCOPE AS A DEVICE FOR STABILIZING THE ANGULAR POSITION OF ON-BOARD SENSORS USED FOR DETECTION AND LOCATION OF OVERHEAD HIGH-VOLTAGE POWER LINES

The paper discusses the problems related to the construction of on-board instruments for detection and location of the angular position of objects emitting an electromagnetic field such as overhead high-voltage power lines. Signals disturbing the operation of devices in motion are presented and analyzed. One of the methods of reducing disturbance signals is the application of active filters. A preliminary analysis was conducted to determine if a gyroscope could be used for stabilizing the angular position of sensors and reducing the slow-varying disturbances caused by the oscillations of the flying vehicle.

1. WPROWADZENIE

Funkcjonowanie współczesnej cywilizacji oparte jest na wykorzystaniu energii w różnorodnych postaciach. Znaczącą część zużywanej energii stanowi energia elektryczna, wytwarzana w elektrowniach przemysłowych i rozprowadzana na znaczne odległości za pomocą nawietrznych elektroenergetycznych linii przesyłowych wysokiego i średniego napięcia a następnie po obniżeniu napięcia w stacjach transformatorowych kierowana do odbiorców. Linie przesyłowe są obiektami o strategicznym znaczeniu dla funkcjonowania gospodarki, stanowią jednak zagrożenie dla nisko latających samolotów, motolotni i innych obiektów latających. W czasie działań wojennych linie te stanowią istotny cel zwłaszcza dla działań lotnictwa, zmierzających poprzez ich zniszczenie lub czasowe wyłączenie do sparaliżowania produkcji zakładów przemysłowych i funkcjonowania innych gałęzi gospodarki.

Powyższe uwarunkowania prowadzą do konieczności opracowania urządzeń pomiarowych umożliwiających niezawodne wykrywanie tych linii i innych obiektów oraz lokalizację ich położenia, czyli określenie odległości i położenia kątownego celu względem obiektu latającego. Jest to warunkiem koniecznym odpowiednio wczesnego ominięcia przeszkód przez obiekty latające, co zmniejsza lub nawet eliminuje ryzyko kolizji a podczas działań wojennych

dokonanie precyzyjnego ataku na linie przesyłowe za pomocą pocisków raketowych, lotniczych bomb kasetowych czy też bezpilotowych aparatów latających.

Zarówno pomyślnie wykonanie ataku na linię przesyłową jak i manewru jej omięcia przez obiekt latający musi być poprzedzone wykryciem celu (przeszkody) i jego lokalizacją oraz naprowadzeniem na cel i jego obezwładnieniem lub przeprowadzeniem manewru omięcia.

Prędkości, z którymi poruszają się aparaty latające i środki napadu powietrznego oraz ich zdolności manewrowe połączone z charakterystykami dynamicznymi układów regulacji sprawiają, że wykrycie i lokalizacja przeszkody (obiektu ataku) musi nastąpić w odległości około 1000 metrów przed celem, wymusza to konieczność budowy bardzo czułych urządzeń pomiarowych, odpornych na działanie sygnałów zakłócających, pochodzących od różnorodnych urządzeń technicznych.

W opracowaniu przedstawiono kolejne problemy występujące w konstrukcji takich urządzeń ze szczególnym uwzględnieniem występujących przy tym sygnałów zakłócających oraz techniki ich redukcji za pomocą filtrów aktywnych, i stabilizatora giroskopowego.

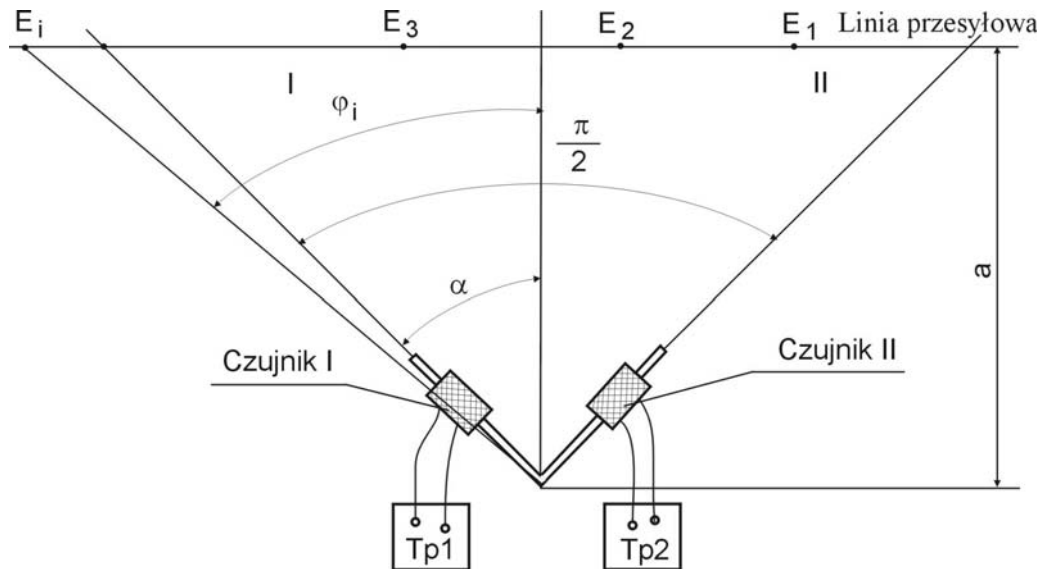
2. BUDOWA UKŁADU POMIAROWEGO I WYNIKI BADAŃ WSTĘPNYCH

Napowietrzne elektroenergetyczne linie przesyłowe wysokiego napięcia emitują pole elektryczne i magnetyczne o częstotliwości 50 Hz. Wartość natężenia pola elektrycznego zmniejsza się bardzo wyraźnie przy oddalaniu się od osi linii w bok oraz przy zbliżaniu się do konstrukcji słupów. Wartości natężenia obu pól są w znacznym stopniu zależne od wysokości nad powierzchnią ziemi, na której dokonywane są pomiary. Ze względu na fakt, że wartość natężenia pola elektrycznego nie jest zależna od obciążenia linii a głównie od wartości jej napięcia, przyjęto, że właśnie natężenie pola elektrycznego jest wielkością umożliwiającą wykrycie i określenie położenia celu (linii napowietrznej).

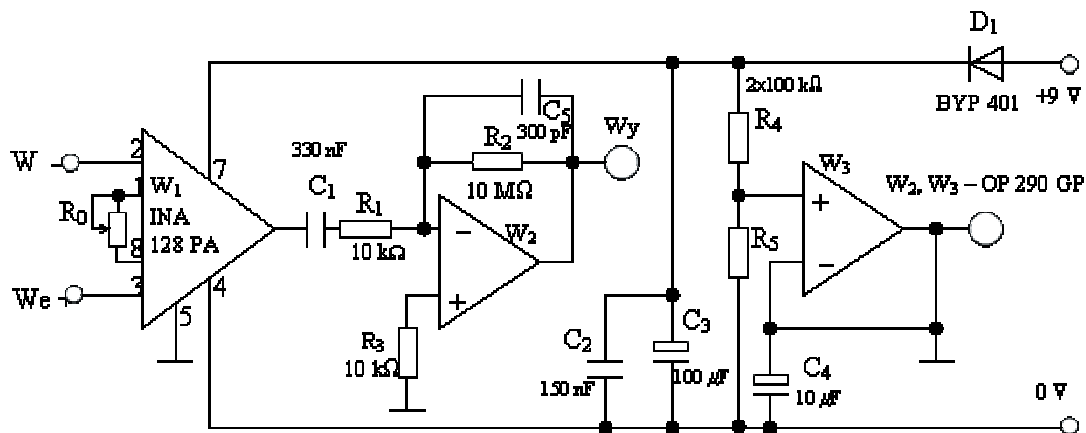
W opracowaniu [3] przedstawiono budowę czujnika o właściwościach kierunkowych, umożliwiającego wykrycie i lokalizację emitującego pole elektryczne urządzenia elektroenergetycznego jak np. linia przesyłowa wysokiego napięcia. W referacie konferencyjnym [6] zaprezentowano koncepcję lokalizacji punktowego i liniowego źródła zmiennego pola elektrycznego o małej częstotliwości (rys. 1).

W każdym przypadku podstawowym elementem układu służącego do lokalizacji położenia kąтового celu jest czujnik składający się z cewki o znacznej indukcyjności, osadzonej na pręcie z materiału ferromagnetycznego. Przemienne sygnały napięciowe o częstotliwości 50 Hz indukowane w dwóch prostopadłych do siebie czujnikach podlegają wzmocnieniu we wzmacniaczach torów pomiarowych TP₁ i TP₂ o wzmocnieniu rzędu 10⁶. Wyprostowane sygnały napięciowe na wyjściach „bliźniaczych” torów pomiarowych podlegają dalszej obróbce w układzie do lokalizacji położenia kąтового celu zgodnie z zasadami przedstawionymi w [6].

Na wstępie przeprowadzono badania, których celem było określenie zależności napięcia wyjściowego od odległości układu pomiarowego względem linii przesyłowej. Ponadto zidentyfikowano zakłócenia pomiarowe i podjęto próbę określenia przyczyn ich powstawania. Badania wstępne prowadzono wykorzystując specjalny wzmacniacz pomiarowy, (rys. 2), którego podstawowym elementem jest układ scalony INA128PA firmy Burr – Brown (W₁).



Rys. 1. Zasada lokalizacji położenia kąowego celu liniowego [6]



Rys. 2. Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego [5]

Badania wpływu odległości linii przesyłowej na wartość napięcia indukowanego w antenie odbiorczej układu pomiarowego przeprowadzono w warunkach terenowych, w pobliżu linii energetycznych średniego i wysokiego napięcia (15 i 110 kV). W każdym przypadku dokonywano pomiaru napięcia na wyjściu przedstawionego na rys. 2 wzmacniacza pomiarowego W_1 lub też przy większych odległościach od źródła sygnału – na wyjściu wzmacniacza W_2 . Na ogół wartości napięć indukowanych w czujniku przyjmują wartości pojedynczych μV . Bardziej szczegółowe wyniki badań wpływu odległości układu pomiarowego od źródła sygnału na wartość napięcia wyjściowego przedstawiono w [3, 5],

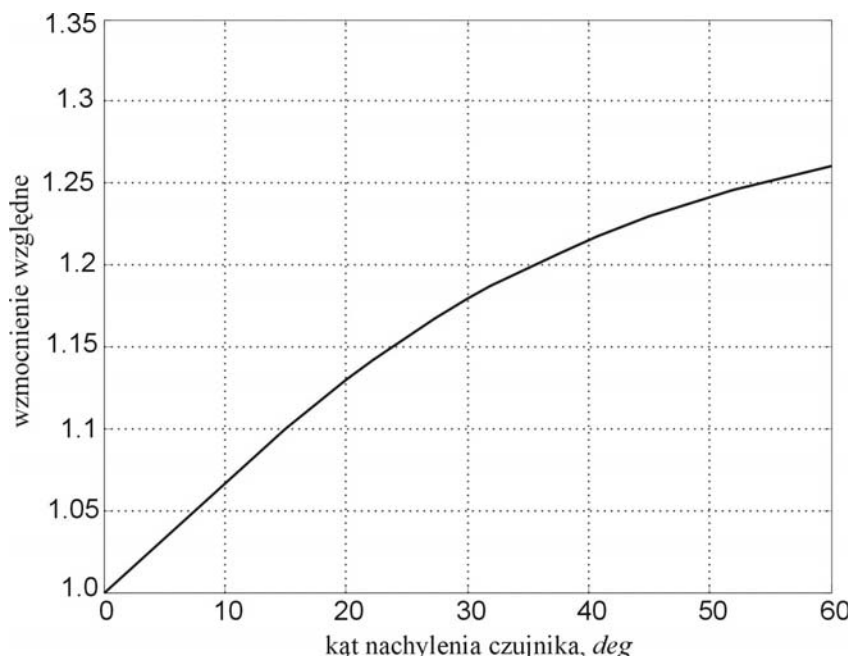
Po przeprowadzeniu badań wstępnych w warunkach statycznych kolejną fazę badań modelu układu przeprowadzono w warunkach ruchu, mając na celu określenie zakłóceń przy tym powstających. Badania prowadzono w takich odległościach od linii, gdzie w warunkach statycznych sygnał był jeszcze mierzalny. W tych warunkach pojawiły się problemy w funkcjonowaniu układu. W sytuacji, gdy badania prowadzono w warunkach szybkiego ruchu i drgań modelu, na wyjściu układu pomiarowego pojawiały się zakłócenia o niewielkiej,

lecz trudnej do określenia częstotliwości i o amplitudzie wielokrotnie większej od amplitudy sygnału użytecznego. W odległości około 60 metrów od napowietrznej linii wysokiego napięcia 110kV amplituda zakłóceń była blisko 100 razy większa od amplitudy sygnału użytecznego.

Analiza występującego zjawiska doprowadziła do przypuszczenia, że napięcie zakłócające o małej częstotliwości (rzędu kilku – kilkudziesięciu Hz) indukowane w antenie może być wywoływane poprzez szybkie przecinanie przez czujnik linii sił ziemskiego pola magnetycznego.

W trakcie badań laboratoryjnych stwierdzono również podatność układu na nieuporządkowane zakłócenia o charakterze wyładowań elektrostatycznych, które powstawały np. w wyniku tarcia tkaniną o obudowę, w której umieszczano urządzenie, a także na skutek tarcia wydobywającego się z dyszy strumienia powietrza ocierającego się o obudowę. Ten ostatni typ zakłóceń może także występować w pracy urządzenia znajdującego się na pokładzie obiektu latającego.

Opisane wyżej sygnały zakłócające mają częstotliwości różniące się od częstotliwości 50 Hz sygnału użytecznego i ich redukcja może być dokonana za pomocą filtrów aktywnych. W trakcie badań wstępnych wyodrębniono jeszcze jeden rodzaj zakłócenia, którego redukcja za pomocą metod elektrycznych jest niemożliwa – okazuje się, że wartość sygnału na wyjściu układu pomiarowego jest w istotny sposób zależna od kąta nachylenia czujnika względem płaszczyzny poziomej (rys. 3).



Rys. 3. Względna zmiana napięcia indukowanego na wyjściu czujnika w funkcji kąta jego nachylenia względem płaszczyzny poziomej (pomiar w odległości 30 m od linii średniego napięcia 15 kV)

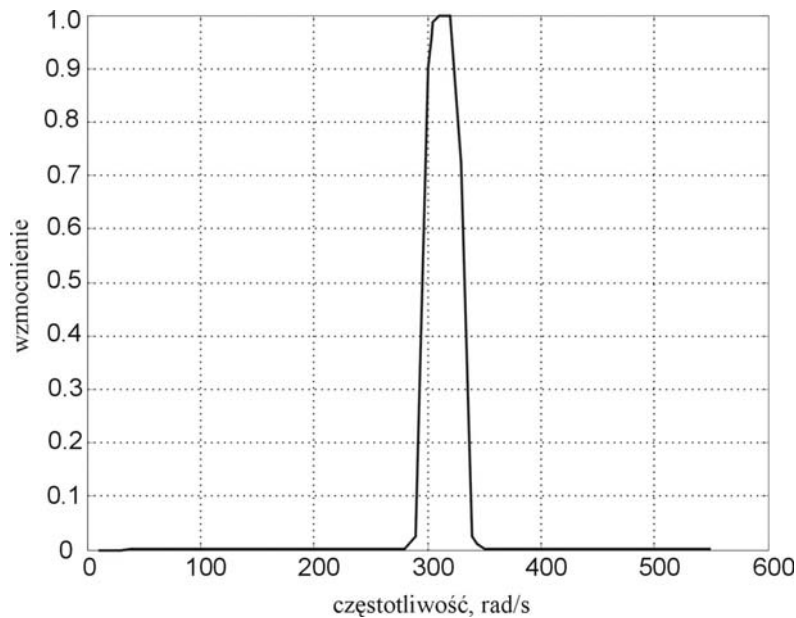
3. REDUKCJA ZAKŁÓCEŃ ZA POMOCĄ FILTRÓW AKTYWNYCH

Wymienione wyżej sygnały zakłócające mają różną, trudną do przewidzenia częstotliwość i zarazem charakteryzują się znaczną amplitudą, przewyższającą wielokrotnie amplitudę sygnału użytecznego, zjawisko to staje się tym bardziej dolegliwe, im większa jest odległość

układu pomiarowego od linii przesyłowej. Celem ich redukcji w trakcie prowadzonych prac zbudowano i zbadano wymienione poniżej laboratoryjne układy modelowe:

- środkowoprzepustowego filtra kwadratowego 50Hz z wielokrotną pętlą sprzężenia zwrotnego;
- dwubiegunowego filtra modelującego zmienne stanu;
- filtra pasmowoprzepustowego Cauera 4 rzędu zbudowanego z układów MF10;
- filtra pasmowoprzepustowego Butterwortha 8 rzędu zbudowanego z układów MF10.

W wyniku badań układów filtrujących najlepsze efekty uzyskano używając filtr Butterwortha 8 rzędu, którego charakterystykę częstotliwościową przedstawiono na rysunku 4. Projektowanie filtru zostało przeprowadzone w oparciu o [1, 2] a założenia konstrukcyjne i szczegółowy schemat przedstawiono w [8].



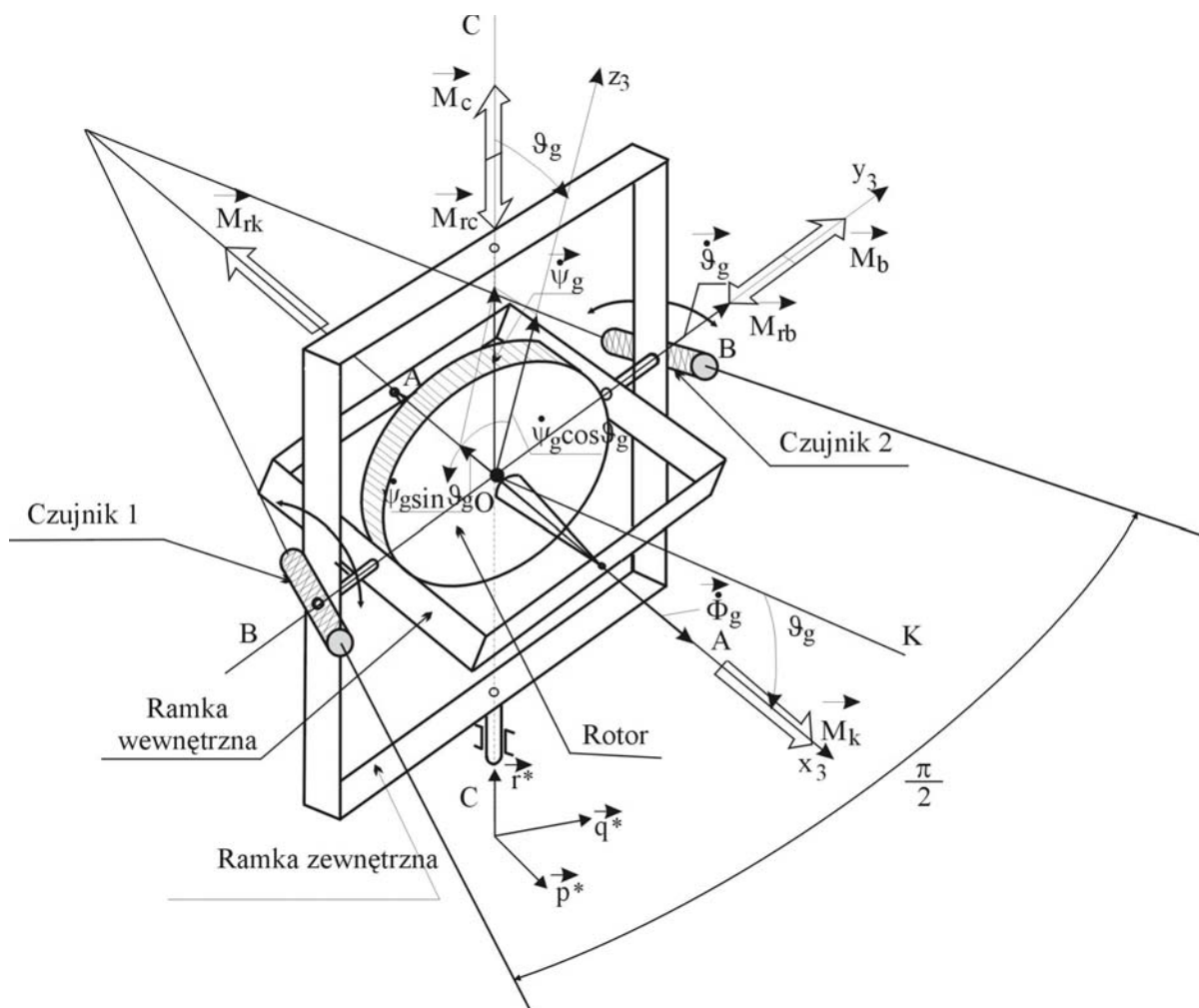
Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa pasmowoprzepustowego filtra Butterwortha 8 rzędu o częstotliwości środkowej $f_0=50\text{Hz}$ i dobroci $Q=10$

4. KONCEPCJA GIROSKOPOWEJ STABILIZACJI POŁOŻENIA CZUJNIKÓW

Do stabilizacji położenia czujników wykorzystany jest giroskop swobodny o trzech stopniach swobody. Wykorzystując rys. 5 i zakładając, że wirnik jest ciałem osiowo-symetrycznym, pominięta jest bezwładność ramek, prędkość obrotów szybkich jest stała i że mamy do czynienia z giroskopem astatycznym (środek masy pokrywa się ze środkiem obrotu ramek), równania ruchu osi giroskopu możemy zapisać w następującej postaci [3]:

$$J_{gk} \frac{d\omega_{gy_3}}{dt} - J_{gk} \omega_{gx_2} \omega_{gz_3} + J_{go} n_g \omega_{gz_3} = M_b - M_{rb} \quad (1)$$

$$J_{gk} \frac{d}{dt} (\omega_{gz_2} \cos \vartheta_g) - (J_{go} \dot{\omega}_{gx_2} + J_{gk} \omega_{gy_1} \omega_{gz_2}) \sin \vartheta_g + \\ - J_{go} n_g (\omega_{gy_1} + \dot{\vartheta}_g) \cos \vartheta_g + J_{gk} \omega_{gy_2} \omega_{gx_1} = M_c - M_{rc} \quad (2)$$



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

gdzie:

$$\begin{bmatrix} \omega_{gx_1} \\ \omega_{gy_1} \\ \omega_{gz_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^* \cos \psi_g + q^* \sin \psi_g \\ -p^* \sin \psi_g + q^* \cos \psi_g \\ \dot{\psi}_g + r^* \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{gx_2} \\ \omega_{gy_2} \\ \omega_{gz_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (p^* \cos \psi_g + q^* \sin \psi_g) \cos \vartheta_g - (r^* + \dot{\psi}_g) \sin \vartheta_g \\ -p^* \sin \psi_g + q^* \cos \psi_g + \dot{\vartheta}_g \\ (p^* \cos \psi_g + q^* \sin \psi_g) \sin \vartheta_g + (r^* + \dot{\psi}_g) \cos \vartheta_g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{gx_3} \\ \omega_{gy_3} \\ \omega_{gz_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (p^* \cos \psi_g + q^* \sin \psi_g) \cos \vartheta_g - (r^* + \dot{\psi}_g) \sin \vartheta_g + \dot{\Phi}_g \\ -p^* \sin \psi_g + q^* \cos \psi_g + \dot{\vartheta}_g \\ (p^* \cos \psi_g + q^* \sin \psi_g) \sin \vartheta_g + (r^* + \dot{\psi}_g) \cos \vartheta_g \end{bmatrix}$$

J_{go}, J_{gk} – momenty bezwładności – odpowiednio: rotora giroskopu względem jego osi podłużnej i osi precesji;

ϑ_g, ψ_g – kąty określające położenie osi giroskopu w przestrzeni (kątem obrotu ramki wewnętrznej i zewnętrznej, odpowiednio);

n_g – prędkość kątowna obrotów własnych giroskopu;

p^*, q^*, r^* – składowe wektora prędkości ruchu podstawy giroskopu;

M_k – moment siły napędzającej rotor giroskopu;

M_{rk} – moment sił tarcia w łożyskowaniu rotora w ramce wewnętrznej oraz oporów aerodynamicznych;

M_b, M_c – momenty sił sterujących ramkami wewnętrzną i zewnętrzną giroskopu, odpowiednio;

M_{rb}, M_{rc} – momenty sił tarcia w łożyskach ramek wewnętrznej i zewnętrznej, odpowiednio.

Rozważane czujniki mocowane są sztywno do ramki wewnętrznej giroskopu tak, by ustawione były w jej płaszczyźnie wzajemnie prostopadle (rys. 5). Pozwala to na stabilne położenie czujników w pierwotnie ustalonym położeniu niezależnie od ruchów podstawy, na której giroskop się znajduje. Jednakże wskutek oddziaływania zakłóceń zewnętrznych, występowania tarcia w łożyskach zawieszenia, bezwładności ramek, wpływu nieliniowości modelu ruchu giroskopu czy też ruchu wirowego Ziemi, czujniki mogą nie zachowywać swego ustalonego położenia w zadanej płaszczyźnie. Należy z tego względu wprowadzić dodatkowe momenty korekcyjne, które będą minimalizować wpływ wspomnianych zakłóceń i tym samym utrzymywać oś giroskopu w zadanym położeniu. Algorytm zmiany momentów korekcyjnych zapiszmy w postaci [3]

$$M_b = -k_b \vartheta_g + k_c \psi_g - h_g \frac{d\vartheta_g}{dt} \quad (3a)$$

$$M_c = -k_c \vartheta_g - k_b \psi_g - h_g \frac{d\psi_g}{dt} \quad (3b)$$

gdzie:

k_b, k_c – współczynniki wzmocnień korektora giroskopu;

h_g – współczynnik tłumienia korektora giroskopu.

Dla zilustrowania działania stabilizacji położenia czujników w zadanej płaszczyźnie, rozpatrzmy przykład symulacji komputerowej przeprowadzonej dla następujących danych liczbowych:

$$J_{gk} = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2, \quad J_{go} = 5.0 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

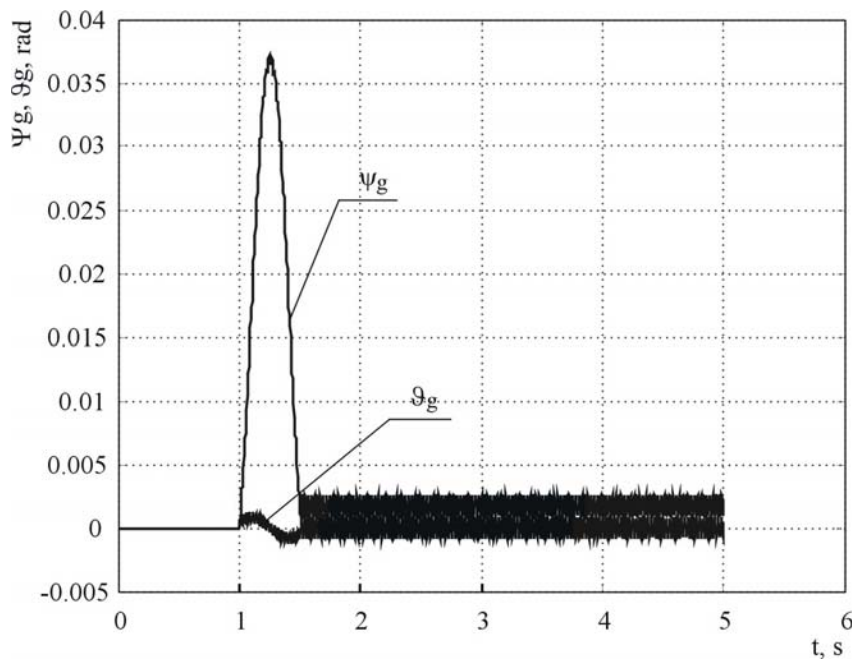
$$n_g = 1000 \text{ rad/s}, \quad \eta_b = \eta_c = 0.01 \text{ Nms}$$

Wartości współczynników korektora giroskopu wyznaczone zostały optymalnie ze względu na minimum błędu średniokwadratowego [3]. Wartość współczynnika przyjęto $k_b = 10$, natomiast pozostałe określono w następujący sposób:

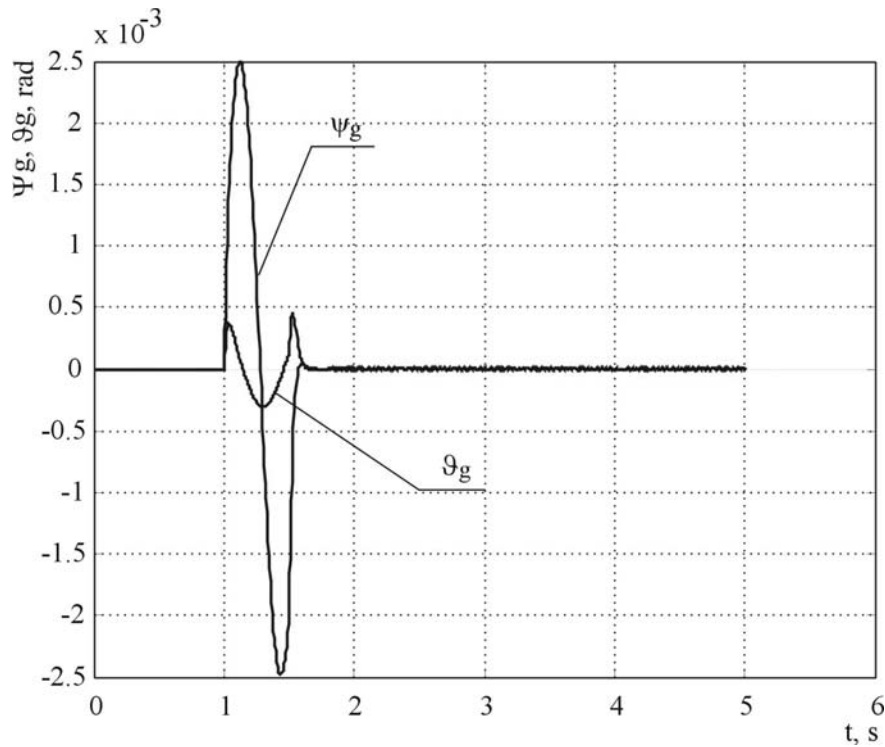
$$k_c = \frac{1}{2} \frac{J_{go}^2 n_g^2}{J_{gk}} \sqrt{2J_{go}^2 n_g^2 + 4J_{gk} k_b}, \quad h_g = \sqrt{2J_{go}^2 n_g^2 + 4J_{gk} k_b}$$

Zakładamy, że czujniki powinny znajdować się w ustalonej płaszczyźnie poziomej, tj. przy ustawieniu ramek pod kątami $\vartheta_{go} = 0$ i $\psi_{go} = 0$. Zakładamy ponadto, że podstawa na której umieszczony jest giroskop uległa w płaszczyźnie pionowej i poziomej kątowym przemieszczeniom o postaci harmonicznej, odpowiednio: $Q = Q_o \sin \nu t$, $R = R_o \cos \nu t$; tym samym prędkości kątowe tego przemieszczenia będą miały postać, odpowiednio: $q^* = Q_o \nu \cos \nu t$, $r^* = -R_o \nu \sin \nu t$. Przyjmujemy, że $Q_o = 0.5 \text{ rad}$; $R_o = 0.25 \text{ rad}$; $\nu = 5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, oraz że przemieszczenie zakłócające pojawia się w chwili czasu $t_p = 1.0 \text{ s}$ i oddziałuje do czasu $t_k = 1.5 \text{ s}$. Zbadajmy wpływ powyższych zakłóceń na stabilną pracę giroskopu.

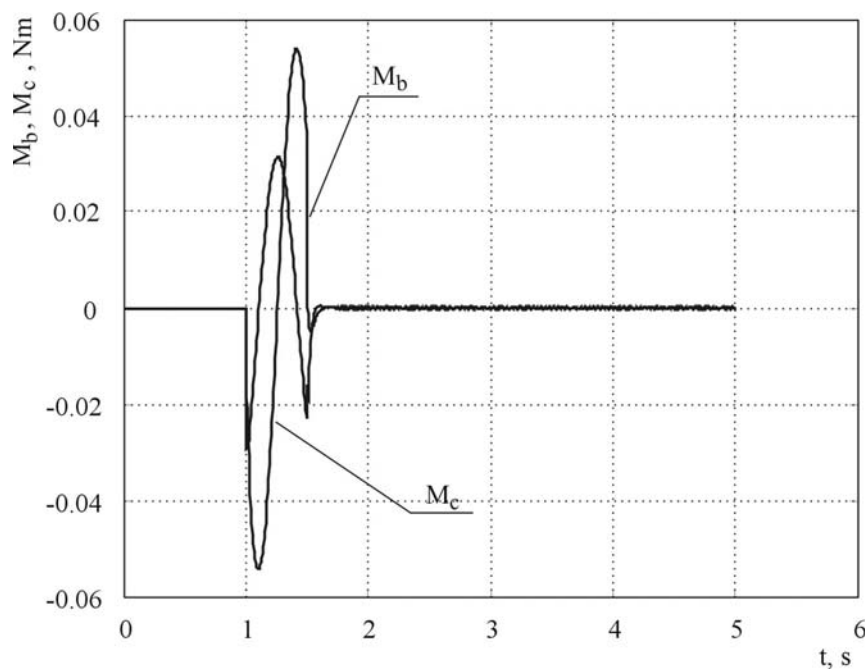
Na rys. 6 pokazane jest oddziaływanie przemieszczenia zakłócającego na stabilizację położenia czujników zarówno bez momentu korekcyjnego (rys. 6), jak i z momentem korekcyjnym (rys. 7). Rys. 7 przedstawia zmiany w funkcji czasu momentów korekcyjnych M_b i M_c . Wartości tych momentów świadczą o technicznej realizowalności stabilizacji giroskopu z przymocowanymi do jego ramek czujnikami.



Rys. 6. Zmiany w funkcji czasu kątów ϑ_g i ψ_g , określających położenie osi giroskopu w przestrzeni bez momentów korekcyjnych



Rys. 7. Zmiany w funkcji czasu kątów ϑ_g i ψ_g , określających położenie osi girokopu w przestrzeni z zastosowaniem momentów korekcyjnych



Rys. 8. Zmiany w funkcji czasu wartości momentów korekcyjnych M_b i M_c

4. PODSUMOWANIE

Wstępne badania wykazały dużą skuteczność stabilizacji położenia kąтового pokładowych czujników do wykrywania i lokalizacji napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia z wykorzystaniem giroskopu mechanicznego o trzech stopniach swobody. W przypadku występowania dużych zakłóceń działających na podstawie giroskopu (np. pokładu obiektu latającego), należy do giroskopowego układu stabilizacji dodać momenty korekcyjne. W kolejnym etapie badań należy sprawdzić możliwość sterowania położeniem samych czujników tak, by z pokładu obiektu latającego mogły wykrywać i lokalizować napowietrzne linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia czy też punktowe źródła promieniowania elektromagnetycznego niskiej częstotliwości.

Literatura

1. Izydorzyc J., Konopacki J.: Filtry analogowe i cyfrowe. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Katowice 2003.
2. MF-10: Universal Monolithic Dual Switched Capacitor National Semiconductor May 2001.
3. Koruba Z.: Dynamika i sterowanie giroskopem na pokładzie obiektu latającego. Monografie, Studia, Rozprawy nr 25. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2001, s. 285.
4. 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.
5. Szmitkowski 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.
6. Tuśnio J., Koruba Z.: Koncepcja określenia położenia kąтового źródła promieniowania elektromagnetycznego małej częstotliwości na przykładzie napowietrznych urządzeń elektroenergetycznych. Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojenia – Waplewo 2006.
7. 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.
8. 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.