

NIKOŃCZUK Piotr¹
KRÓLIKOWSKI Tomasz²

ŚLEDZENIE ODPORNE TRAJEKTORII RUCHU STATKU

W artykule przedstawiono problematykę sterowania odpornego, oraz sterowania ruchem statku po zadanej trajektorii za pomocą regulatora odpornego. Artykuł zawiera wyniki badań symulacyjnych doboru regulatora odpornego za pomocą algorytmów ewolucyjnych oraz śledzenia trajektorii dla kontenerowca o nośności 23 000 ton.

ROBUST SHIP TRAJECTORY TRACE

A paper presents a robust control problematic and ship trajectory trace with robust controller. Text include results of robust controller selection using genetic algorithms and computer simulation for container ship 23000 tons load.

WSTĘP

Statek jako obiekt regulacji jest bardzo trudnym obiektem ze względu na jego nieliniowość oraz silne zmiany współczynników liniowego modelu w zależności od prędkości, kąta położenia steru oraz interakcje pomiędzy sterem a śrubą oraz sterem a kadłubem (szelangiewicz). Istnieją rozwiązania autopilotów opartych na regulatorze PID o zmiennych współczynnikach w zależności od stanu w jakim znajduje się jednostka pływająca. Można jednak zgodnie z teorią sterowania odpornego (*robust control*) znaleźć regulator, który jest w stanie stabilnie sterować statkiem bez potrzeby zmian jego nastaw. Trudność sprawia potrzeba stosowania zaawansowanych metod analizy matematycznej w poszukiwaniu współczynników równania regulatora odpornego. Aby uniknąć tej potrzeby do poszukiwania współczynników można zastosować algorytmy ewolucyjne [2,3,4]. Artykuł przedstawia wyniki badań symulacyjnych śledzenia trajektorii za pomocą regulatora odpornego.

1. IDEA STEROWANIA ODPORNEGO

Biorąc pod uwagę układ ze sprzężeniem zwrotnym pokazany na rysunku 1, to znaczy układ opisany równaniami:

$$\begin{aligned}y &= G(\varepsilon) \\ \varepsilon &= z - F(y)\end{aligned}\tag{1}$$

¹Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, 71-065 Szczecin, Al. Piastów 41, Tel 91 4494746 e-mail: piotr.nikonczuk@zut.edu.pl

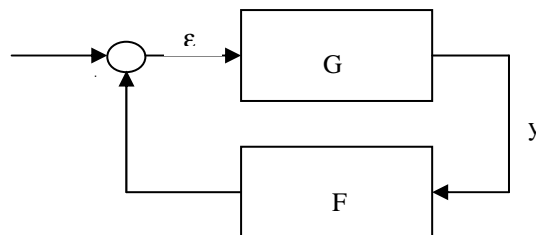
² Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, e-mail: tomasz.krolikowski@tu.koszalin.pl

Gdzie F i G są operacjami opisującymi kolejno obiekt regulacji oraz regulator. Natomiast z i ε są odpowiednio sygnałem zadanym i sygnałem błędu. Równania (1) można zapisać w postaci:

$$z - F(G(\varepsilon)) = \varepsilon \quad (2)$$

lub inaczej:

$$z = \varepsilon + F(G(\varepsilon)) \quad (3)$$



Rys. 1. Schemat układu regulacji

Jeżeli dla $z \in V(F) \subset V$ istnieje rozwiązanie $\varepsilon \in V$ równania (2), to $\varepsilon \in V(F)$. Wynika to z faktu, iż $z \in V(F)$ i $F(G(\varepsilon)) \in V(F)$. Ponieważ każdy ze składników równania (3) należy do $V(F)$, dlatego wykonując dla obydwu stron operację F^{-1} można napisać:

$$F^{-1}(z) = F^{-1}(\varepsilon) + G(\varepsilon) \quad (4)$$

W zbiorze wszystkich funkcji przekształcających przestrzeń wektorową E w przestrzeń Y działania określone są w naturalny sposób. Można więc równanie (4) zapisać następująco:

$$F^{-1}(z) = (F^{-1} + G)(\varepsilon) \quad (5)$$

Zakładając dodatkowo, że $\|(F^{-1} + G)^{-1}\| < \infty$, można dalej napisać:

$$(F^{-1} + G)^{-1}(F^{-1}(z)) = \varepsilon \quad (6)$$

Obliczając normy obydwu stron równania (6) otrzymuje się:

$$\|\varepsilon\| = \|(F^{-1} + G)^{-1}(F^{-1}(z))\| \leq \|(F^{-1} + G)^{-1}\| \|(F^{-1}(z))\| \quad (7)$$

co dalej można zapisać:

$$\|\varepsilon\| \leq \|(F^{-1} + G)^{-1}\| \|F^{-1}(z)\| \quad (8)$$

Ograniczenie $\|F^{-1}(z)\| < \infty$, wynikające z przynależności sygnału do zbioru $V(F)$, jest ograniczeniem naturalnym.

Warunek

$$\|\mathcal{E}\| \leq \|(F^{-1} + G)^{-1}\| < \infty \quad (9)$$

jest często warunkiem wystarczającym istnienia rozwiązania równań (1) w przestrzeniach L^2 lub M dla $z \in V(F)$.

Można dowieść, że równaniu (9) jest równoważny następujący warunek [1]:

$$\|\mathcal{E}\| \leq \left\| (1 + F(s)G(s))^{-1} \right\| \quad (10)$$

Na podstawie powyższych rozważań można sformułować następujące twierdzenie:

Niech C oznacza zbiór regulatorów G , jakie mogą być użyte w omawianym układzie. W teorii optymalizacji H_∞ zakłada się, że $C = RH_\infty$ (regulator dany jest wymierną transmitancją o współczynnikach rzeczywistych i ograniczoną dla $\operatorname{re} s \geq 0$).

Regulator $G^* \in R$ nazywać się będzie optymalnym dla wymuszeń należących do zbioru $V(F)$, jeśli dla każdego $G_1 \in R$ zachodzi:

$$\sup_{z \in V(F)} \|x_{G^*}\| \leq \sup_{z \in V(F)} \|x_{G_1}\| \quad (11)$$

Twierdzenie

Niech operacja F opisująca obiekt i operacje $G \in C$ należące do zbioru regulatorów C przekształcają zbiór sygnałów w przestrzeni Banacha R ($L^2(0, \infty)$ lub M) w siebie. Jeżeli dla regulatora $G^* \in C$ wyrażenie

$$r(G) = \inf_{\operatorname{res} \geq 0} \left| \frac{1}{F(s)} + G(s) \right| \quad (12)$$

osiąga maksimum różne od zera, to układ sterowania opisany równaniami (1) z regulatorem G^* optymalnym jest odporny w sensie klasy sygnałów $R(F)$.

Równanie (12) można zapisać w dziedzinie częstotliwości:

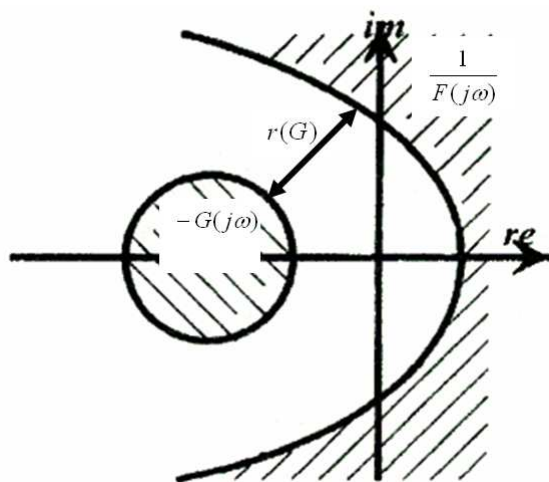
$$\inf_{-\infty < \omega < \infty} \left| \frac{1}{F(j\omega)} + G(j\omega) \right| = r(G) \quad (13)$$

Należy tak dobrać regulator G , aby wartość $r(G)$ była jak największa, a w związku z tym norma sygnału jak najmniejsza. Warunkiem stabilności układu sterowania

ze sprzężeniem zwrotnym jest rozłączność zbiorów ograniczonych widmami $1/F$ oraz $-G$. Geometrycznie oznacza to, że najmniejsza odległość pomiędzy brzegami widm operacji $\frac{1}{F}(j\omega)$ i $-G(j\omega)$ przy tej samej częstotliwości ω jest równa wskaźnikowi $r(G)$.

Geometryczną interpretację doboru regulatora optymalnego przedstawia rys. 2.

Praktycznie oznacza to, że poszukuje się regulatora, który minimalizuje sygnał błędu. Bierze się pod uwagę minimalizację energii sygnału błędu w przestrzeni $L_2(0; \infty)$



Rys. 2. Interpretacja geometryczna doboru regulatora optymalnego

Należy tak dobrać regulator G , aby wartość $r(G)$ była jak największa, a w związku z tym norma sygnału jak najmniejsza. Warunkiem stabilności układu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym jest rozłączność zbiorów ograniczonych widmami $1/F$ oraz $-G$. Geometrycznie oznacza to, że najmniejsza odległość pomiędzy brzegami widm operacji $\frac{1}{F}(j\omega)$ i $-G(j\omega)$ przy tej samej częstotliwości ω jest równa wskaźnikowi $r(G)$.

Geometryczną interpretację doboru regulatora optymalnego przedstawia rys. 2.

Praktycznie oznacza to, że poszukuje się regulatora, który minimalizuje sygnał błędu. Bierze się pod uwagę minimalizację energii sygnału błędu w przestrzeni $L_2(0; \infty)$

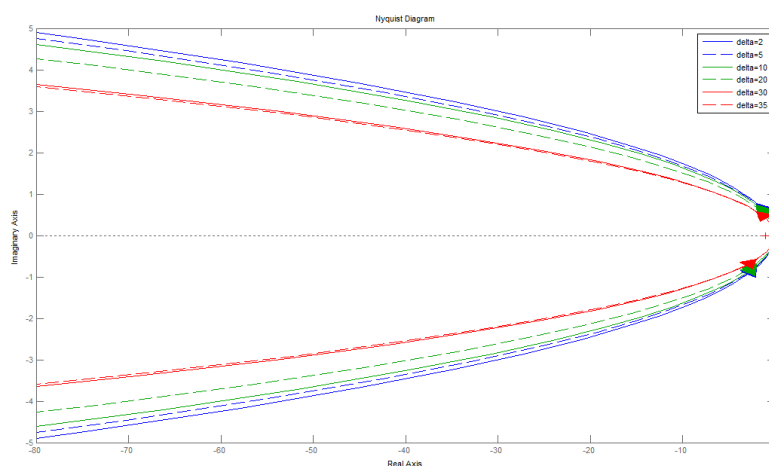
2. DOBÓR AUTOPILOTA W POSTACI REGULATORA ODPORNEGO

Podczas doboru regulatora odpornego należy mieć na uwadze fakt, iż zgodnie z interpretacją geometryczną regulatora optymalnego zbiory ograniczone krzywymi Nyquista operacji $1/F(j\omega)$ oraz $-G(j\omega)$ muszą być rozłączne (rysunek 2). Rozłączność tych krzywych gwarantuje stabilność układu sterowania z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Ponieważ statek zmienia swoje parametry, zmieniają się również jego charakterystyki

częstotliwościowe. Rysunek 3 przedstawia zmienność krzywych w zależności od kąta wychylenia steru dla nośności 23 000 ton.

Podczas doboru regulatora odpornego należy zastosować taką postać obiektu, której charakterystyka częstotliwościowa zapewni stabilność wszystkich innych możliwych postaci obiektu. W przypadku statku taki warunek, zgodnie z rysunkiem 3, spełnia postać obiektu opisana równaniem dla największego kąta wychylenia steru ($\delta = 35^\circ$).

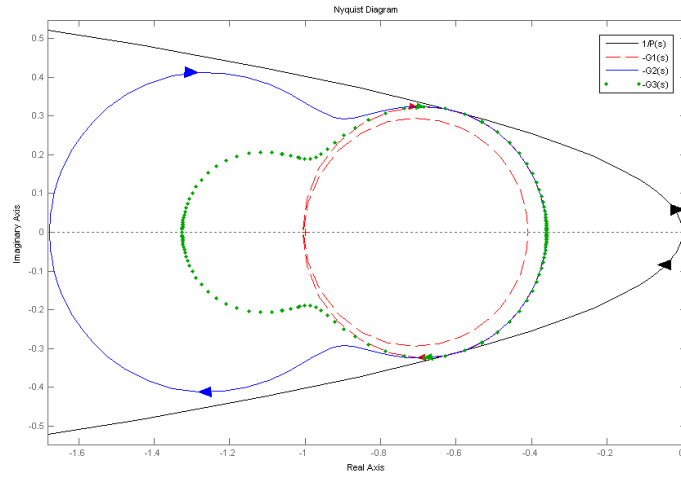
Dla liniowego modelu Nomoto można dobrać współczynniki regulatora odpornego można z użyciem algorytmów ewolucyjnych [2,3]. Podczas obliczeń rozpatruje się minimalizację normy operacji $\|F(j\omega)^{-1} + G(j\omega)\|$ w przedziale częstotliwości od 0 do 0,16 [rad/s]. Nie ma podstaw do rozpatrywania wyższych częstotliwości ze względu na ograniczenie prędkości pracy maszyny sterowej oraz inercję statku. Dla trzech kolejnych prób otrzymani trzy różne transmitancje regulatora odpornego, jednak postaci norm dla rozpatrywanego przedziału częstotliwości są prawie jednolite.



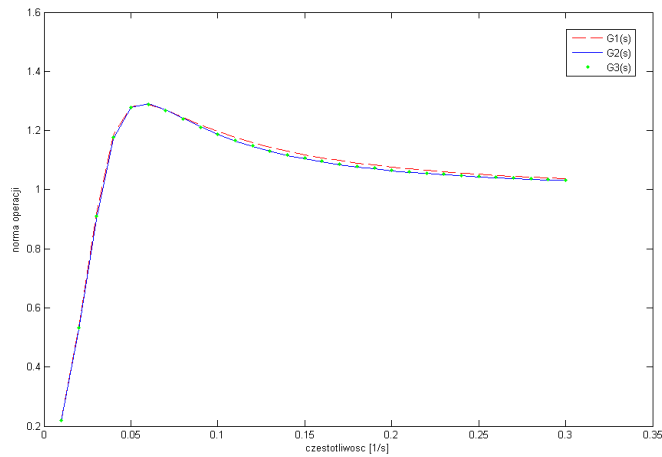
Rysunek 3 Rodzina charakterystyk Nyquista dla statku w zależności od wychylenia steru δ

Na rysunku 4 przedstawiono częstotliwościowe charakterystyki Nyquista dla otrzymanych regulatorów oraz operacji $1/F(j\omega)$. Widać, że zbiory ograniczone operacją odwrotną do modelu statku oraz regulatorów są rozłączne, układ regulacji z tymi regulatorami będzie stabilny. Widać również, że charakterystyki regulatorów pokrywają się w przedziale niskich częstotliwości.

Rysunek 5 przedstawia normę operacji danej równaniem (10) dla otrzymanych regulatorów $G1$, $G2$, $G3$. Z wykresu wynika, iż normy wspomnianych regulatorów prawie się pokrywają. Regulator $G3$ ma najmniejszą wartość normy.

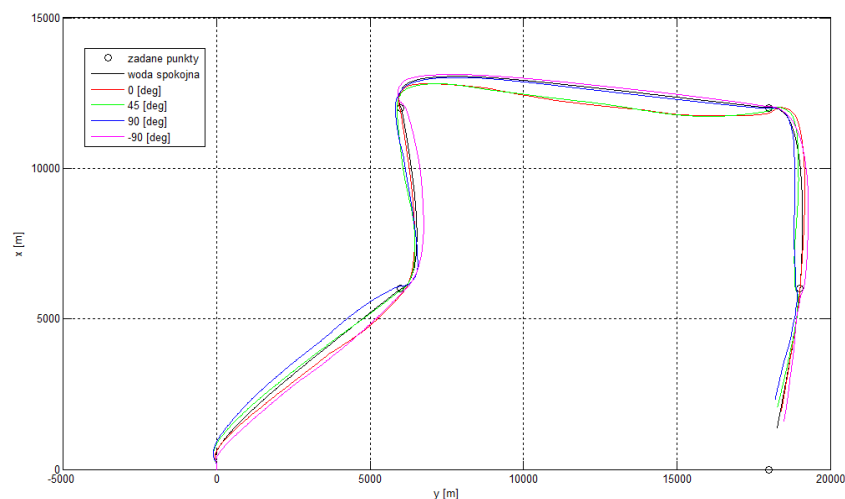


Rysunek 4. Krzywe Nyquista dla regulatorów opisanych równaniami (5.6) i statku.



Rysunek 5. Wartość normy operacji danej równaniem 10 dla otrzymanych regulatorów

Rysunek 6 przedstawia symulację przebytej drogi przez statek w kierunku kolejnych zadanych punktów przy sile wiatru 6^0B oraz różnych kierunkach wiatru podczas śledzenia trajektorii statku za pomocą regulatora $G3$.



Rys. 6. Śledzenie trajektorii ruchu statku przy sile wiatru 6^0B i różnych kierunkach wiatru

Ślady przebytych przez statek dróg przedstawione na rysunku 6 są do siebie zbliżone lub częściowo się pokrywają. Wyniki symulacji wstępnie potwierdzają iż układ śledzenia trajektorii ruchu statku z autopilotem o strukturze regulatora odpornego nie jest wrażliwy na zakłócenia pochodzące od środowiska morskigo.

3. LITERATURA

- [1] Łozowicki A., *Częstotliwościowa metoda optymalizacji układów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1992
- [2] Nikończuk P., Łozowicki A., *Evolutionary algorithms application in a ship autopilot system with optimal controller*. 7th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft Lisbon, Portugal 2006,
- [3] Nikończuk P., *Evolutionary algorithms application for optimal controller design*, Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 17, No. 4C, 2008, str. 88-90,
- [4] Nikończuk P., Królikowski T., *Ewolucyjne metody projektowania regulatorów odpornych*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 4/2010, vol 56, str. 297-300