

Sterowanie w technice morskiej

Wprowadzenie

Od momentu wprowadzenia do przemysłu regulatora typu PID wymyślono wiele rodzajów kontrolerów i metod sterowania. Coraz to bardziej zaawansowane technicznie procesy petrochemiczne wymusiły poszukiwanie nowych algorytmów sterowania. Tendencja ta została zaobserwowana również w sterowaniu statkami, a przede wszystkim skomplikowanymi obiektami jednostkami, takimi jak platformy wiertnicze oraz kablownce. Własności konstrukcyjne i eksploatacyjne tych jednostek wymusiły pewne specyficzne wymagania odnoszące się do układów sterowania ich ruchem. Dla tego typu jednostek instytucje klasyfikacyjne wprowadzają dodatkowe przepisy związane z pozycjonowaniem dynamicznym na podstawie rezolucji IMO (MSC/Circ. 645). W definicjach tej rezolucji pozycjonowanie dynamiczne (*ang. Dynamic Positioning, DP*) jest określone dla dwóch przypadków, dotyczy zarówno pozycjonowania statku (*DP-vessel*), jak i instalacji pozycjonowania dynamicznego (*DP-system*). Statek pozycjonowany dynamicznie jest określony jako jednostka, która posiada odpowiednie środki, aby utrzymać jego zadaną pozycję bez względu na zakłócenia w postaci falowania, wiatru. Natomiast środkami do osiągnięcia tego celu są system energetyczny, ster strumieniowy oraz wspomniany *DP-system* jako jednostka sterująca zawierająca algorytm. Utrzymanie stałej pozycji jest osiągnięte za pomocą skomplikowanych algorytmów – programów komputerowych. I w tym właśnie aspekcie sporo do powiedzenia mają matematycy oraz automatycy.

Oprócz utrzymywania określonej długości i szerokości geograficznej obiektu, nie lada wyzwaniem dla firm produkujących autopiloty jest również opracowanie algorytmu utrzymującego kurs statku względem zadanej trajektorii. W *Przepisach Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich, część VIII – Urządzenia Elektryczne i Automatyka* w punkcie 5.5.17 stawia się autopilotom wymaganie, aby utrzymanie wyznaczonego kursu statku było z maksymalną pojedynczą amplitudą $1,5^\circ$ i dokładnością do $\pm 1^\circ$. Wymagania Towarzystw Klasyfikacyjnych oraz norma ISO 11674:2000 (*Ships and marine technology – Heading control systems*) skupiają się na aspektach funkcjonalnych, takich jak maksymalne myśzkowanie, niezawodność, bezpieczeństwo czy miejsce zainstalowania systemu DP. Jednakże na działanie algorytmu składa się teoria sterowania ściśle powiązana z matematyką.

Regulatory w przemyśle morskim znajdują zastosowanie do utrzymania stałego kursu statku, jego pozycji, zadanej temperatury w chłodni i lepkości paliwa, stałej prędkości obrotowej wału korbowego, jak również do innych skomplikowanych procesów. Oprócz manetek, sensorów, paneli operatorskich, układów wykonawczych sercem sterowania jest oprogramowanie, a uściślając algorytm. W tej dziedzinie mogą się wykazać matematycy i teoretycy sterowania, którzy na licznych konferencjach przedstawiają udoskonalone metody strojenia i identyfikacji obiektów. W ubiegłym wieku wprowadzono dwie zasadnicze koncepcje sterowania: regulator typu PID oraz predykcyjny, które postaram się przybliżyć w dalszej części artykułu.

Sterowanie PID – klasyczne

Począwszy od 1942 roku, kiedy to naukowcy Ziegler i Nichols wymyślili metodę strojenia regulatora PID, jest on najbardziej powszechnym kontrolerem. Regulatory tego typu znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle morskim. Typowy regulator PID o jednym stopniu swobody można nastroić tak, aby umożliwiał śledzenie wartości zadanej lub był nastrojony na redukcję zakłóceń. Regulator ten można opisać równaniem (1):

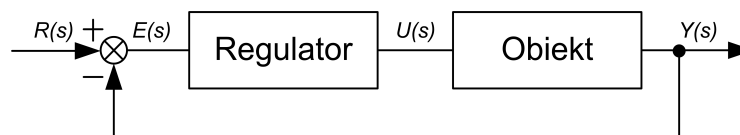
$$U(s) = E(s) \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad (1)$$

gdzie uchyb $E(s)$ jest zdefiniowany jako

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (2)$$

Do nastrojenia regulatora są człony: proporcjonalny K_p , całkujący K_i oraz różniczkujący K_d . W zależności od ich ustawienia projektant decyduje o przeregulowaniu układu, uchybie od wartości zadanej oraz o tym, jak szybko wartość wyjściowa $Y(s)$ powinna osiągnąć wartość zadaną $R(s)$. Regulatory bez członu różniczkującego są nazywane regulatorami typu PI.

Rys. 1 ilustruje koncepcję sterowania. Jest to tak zwana pętla sprzężenia zwrotnego.



Rys. 1 Układ regulacji

Zarówno struktura, jak i idea równania (1) jest doskonale znana teoretykom i praktykom. Regulator ten jest prosty, łatwy do strojenia i przede wszystkim odporny na zakłócenia.

Rozwój techniki oraz potrzeba sterowania coraz to bardziej skomplikowanymi procesami spowodowała modyfikację równania (1) i wprowadzenie dodatkowych członów b , c oraz filtru członu różniczkującego N :

$$U(s) = K_p (b \cdot R(s) - Y(s)) + \frac{K_i}{s} (R(s) - Y(s)) + \frac{sK_d (c \cdot R(s) - Y(s))}{1 + \frac{s \cdot K_d}{K_p \cdot N}} \quad (3)$$

W przeciwieństwie do klasycznego regulatora PID (1) regulator o dwóch stopniach swobody (3) można nastroić tak, aby odpowiedź na skok jednostkowy była szybka i bez przeregulowania, jak również, aby regulator bardzo dobrze tłumił zakłócenia. Metody strojenia tego regulatora zostały przedstawione między innymi w publikacjach wybitnego szwedzkiego automatyka – Karla Johana Åströma.

Zanim projektant zdecyduje się na wybór metody strojenia regulatorów, powinien uzyskać (matematyczny) model obiektu. Jest to tak zwana identyfikacja. Im dokładniejszy model, innymi słowy im bardziej matematyczny opis zbliżony jest do fizycznego procesu, tym większej efektywności działania regulatora można się spodziewać. Jednak niektóre z regulatorów posiadają lepsze własności adaptacyjne, natomiast inne gorsze. Wspomniany Karl Johan Åström oszacował, że regulatory PID to prawie 90 % regulatorów stosowanych w przemyśle. Jednakże bardziej skomplikowane procesy wymagają zaawansowanej teorii sterowania, np. sterowania predykcyjnego.

Sterowanie predykcyjne

W literaturze naukowej występuje wiele rodzajów algorytmów określanych mianem sterowania predykcyjnego, różnią się one opisem modelu, jak również funkcją kosztów, dla przykładu:

- uogólniona regulacja predykcyjna (ang. *Generalized Predictive Control, GPC*) zaproponowana przez Clarke'a et al. (1987) w czasopiśmie naukowym „Automatica”, 23(2):137–148. Ten typ regulatora nie znalazł szerokiego zastosowania w przemyśle.

- regulacja predykcyjna z modelem odpowiedzi skokowej (ang. *Dynamic Matrix Control – DMC*), Cutler i Ramaker (1979), szerzej zastosowana w przemyśle niż GPC,

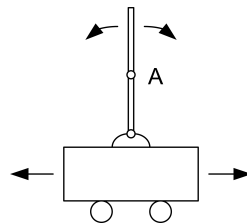
- regulacja predykcyjna oparta na modelu (ang. *Model Based Predictive Control*). Trudno przypisać ją do jednego autora, podwaliny tego i dwóch pierwszych algorytmów stworzył Kalman, publikując w 1960 roku koncepcję *Linear Quadratic Gaussian (LQG)*, a rozwinięcie algorytmu zaproponował Richalet w artykule z 1979 roku.

Generalnie rzecz ujmując, zasada działania tych algorytmów polega na przewidywaniu trajektorii sygnału wyjściowego. Optymalizacja funkcji kosztów sprowadza się do minimalizacji różnicy pomiędzy przewidywaną trajektorią wyjściową modelu, a przyszłymi wartościami wielkości zadanej. Matematycznie ideę sterowania predycyjnego opisuje się w uproszczeniu jako minimalizację dyskretnej funkcji:

$$J = \sum_1^{Hp} [\hat{y}(k+i) + w(k+i)] \quad (4)$$

gdzie: \hat{y} jest przewidywaną trajektorią statku, w trajektorią zadaną, natomiast Hp jest tak zwanym horyzontem predykcji. W zależności od metody minimalizacji równania (4) uzyskujemy różnego rodzaju algorytmy. Często stosowaną metodą optymalizacji są klasyczne algorytmy gradientowe, programowanie liniowe, metody sztucznej inteligencji. Powyższą funkcję można opisać również za pomocą liniowych nierówności macierzowych.

Wyobraźmy sobie nawigatora, który przewiduje/uwzględnia, co się może stać na jego wyznaczonej trajektorii i podejmuje odpowiednie czynności, tak aby przemieścić się z macierzystego portu do portu przeznaczenia w jak najkrótszym czasie. W dużym uproszczeniu nawigatora można opisać jako doskonały regulator predycyjny. O ile człowiek potrafi sterować statkiem, o tyle nie potrafi on już kontrolować innych procesów. Każdy, kto próbował utrzymać w równowadze patyk na dłoni w pozycji pionowej, wie, jakie trudne jest to zadanie. Uczeni nazywają tego typu model odwróconym wahadłem. Zostało one przedstawione na rys. 2.



Rys. 2 Odwrócone wahadło

Należy przy tym zaznaczyć, że jeśli wahadło w punkcie A jest usztywnione, to człowiek może je utrzymać w pionie. Natomiast jeśli w punkcie A zostanie umieszczony przegub z miernikiem kąta wychylenia, to utrzymanie w pionie wahadła jest niemożliwe dla człowieka, zaś kontroler radzi sobie z tym bez trudu. Z tym samym zagadnieniem spotykają się naukowcy z NASA, którzy poszukują metod sterowania rakieta podczas startu. Model odwróconego wahadła można opisać matematycznie jako:

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 1} \quad (5)$$

Powyżej opisane regulatory znajdują zastosowanie zarówno na dużych statkach morskich, jak również na małych jednostkach, takich jak jachty i łodzie motorowe. Problemem jeszcze bardziej skomplikowanym jest regulacja kursu łodzi podwodnych, których pozycja jest opisywana za pomocą trzech zmiennych.

Sztuczna inteligencja

Instytucje klasyfikacyjne raczej skupiają się na opracowaniu wymagań dotyczących funkcjonowania całego systemu, prób funkcjonalnych oraz niezawodności z punktu widzenia ciągłości pracy urządzenia oraz stopnia utrzymywania wartości zadanej, podczas gdy gro matematyków i automatyków wymyśla coraz to nowsze i doskonalsze algorytmy.

Obecnie prowadzi się badania nad wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji do wyznaczania trajektorii statku oraz sterowania odpornego (*ang. robust control*) do utrzymywania kursu przez autopiloty. Nie sposób jest wymienić wszystkich kierunków rozwoju metod strojenia. Jak szacuje irlandzki naukowiec Aidan O'Dwyer, recenzent mojej pracy dyplomowej, wymyślono około 600 różnego rodzaju metod strojenia regulatorów PI oraz setki struktur regulatorów. Niemożliwym jest zaprezentowanie wszystkich głównych kierunków rozwoju, jednakże jednym z szeroko stosowanych narzędzi optymalizacyjnych jest sztuczna inteligencja. Zaliczyć można do niej zasadniczo trzy dziedziny: algorytmy ewolucyjne, sieci neuronowe oraz tak zwaną logikę rozmytą (*ang. fuzzy logic*). Ta ostatnia została rozreklamowana na przykład przez producentów sprzętu AGD sprzedających pralki automatyczne wyposażone w tzw. sztuczną inteligencję.

Sztuczną inteligencję można zastosować zarówno do utrzymywania stałej wartości zadanej (na przykład prędkość obrotowa wału, temperatura chłodni, kurs), jak również do poszukiwania optymalnej trajektorii statku. Zaawansowane badania zostały przeprowadzone przez członka Rady Technicznej PRS, p. prof. R. Śmierzchalskiego. W swoich publikacjach zasugerował stosowanie algorytmów ewolucyjnych do wyznaczania trajektorii statku w sytuacjach kolizyjnych. Nowoczesne techniki umożliwiają wspomaganie decyzyjne dla nawigatorów, uwzględniając warunki pogodowe oraz obiekty znajdujące się w pobliżu. W algorytmach wyznaczania kursu statku zostały też uwzględnione wytyczne podane w *Międzynarodowych Przepisach o Zapobieganiu Zderzeniom na Morzu* (konwencja COLREG). Niewątpliwie klasyczne metody gradientowe nie zawsze są w stanie znaleźć optymalną trasę. Powodzenie klasycznych technik jest zależne od określenia punktów startowych oraz wypukłości funkcji kosztów.

Na kanwie badań przeprowadzonych w Irlandii miałem przyjemność zaprezentowania artykułu pt. *Two degree of freedom PID controller design using genetic algorithms* na 11 międzynarodowej konferencji *Methods and Models in Automation and Robotics* (MMAR 2005). W artykule przedstawiłem strojenie regulatora PID o dwóch stopniach swobody określonego przez równanie (3) za pomocą algorytmów genetycznych. Jako kryterium jakości sterowania uwzględniłem:

- zapas wzmocnienia 6 dB i fazy 45°,
- zapas wzmocnienia 14 dB i fazy 45°,
- zapas modułu 0,6 oraz
- maksymalną wartość funkcji wejścia (ang. *maximum peak of the input sensitivity function*).

Osoby zainteresowane tematem odsyłam do strony <http://www.prs.pl/page570.html>, na której umieściłem prezentację oraz abstrakt artykułu.

Czy można udoskonalać w nieskończoność?

Na początku wieku firma *Samsung Heavy Industries* opracowała zintegrowany system nawigacyjny *NARU 2000* oraz system sterowania statkiem *SSAS 21*. System *NARU* wyznacza optymalną trajektorię statku, uwzględniając warunki pogodowe oraz inne obiekty na morzu, podczas gdy *SSAS 21* monitoruje pracę urządzeń siłowni i ich stan techniczny. Wyposażenie jednostki w wyżej wymienione systemy umożliwia sterowanie bezzałogowym statkiem przez Internet. O ile sterowanie jednostką w wodzie, na jej powierzchni a nawet w powietrzu jest technicznie możliwe, o tyle utrzymanie bezawaryjnej pracy obiektu stoi pod znakiem zapytania. Moim zdaniem wprowadzenie do eksploatacji bezzałogowych statków handlowych, pomimo technicznych możliwości, nie nastąpi wcześniej. Chociaż, patrząc na niezawodność wahadłowców odbywających podróże w przestrzeń kosmiczną, można się spodziewać, iż również docelowo statki handlowe będą mogły funkcjonować bez załogi. Jednym z czynników umożliwiających postęp techniczny jest niewątpliwie rozwój technik sterowania kursem statku.

W nawiązaniu do wcześniej wspomnianego systemu DP warto zaznaczyć, iż Inspektorat Elektryczny i Automatyki przygotowuje się do opracowywania przepisów pozycjonowania dynamicznego.

Daniel Czarkowski