Jerzy KLAMKA
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice

Stan badań w zakresie teorii sterowania

Prof. dr hab. inż. Jerzy KLAMKA

Członek rzeczywisty PAN. Profesor w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej, oraz w Instytucie Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN w Gliwicach. Prace naukowe w dziedzinach: teoria układów dynamicznych, teoria sterowania, wykorzystanie mechaniki kwantowej w informatyce. Sformułował kryteria badania sterowalności dla układów dynamicznych z opóźnieniem oraz warunki sterowalności dla układów dynamicznych o parametrach rozłożonych.

e-mail: jerzy.klamka@polsl.pl

Streszczenie

Niniejsze opracowanie poświęcone jest analizie aktualnego stanu badań oraz perspektywom rozwoju teorii sterowania w uczelniach i instytutach naukowych. Celem opracowania jest podjecie próby wytyczenia głównych kierunków działalności naukowo-badawczej oraz ich koordynacja. Teoria sterowania jest uprawiana w kilkunastu ośrodkach krajowych, w większości w wyższych uczelniach technicznych oraz w instytutach badawczych Polskiej Akademii Nauk. W artykule rozpatrywane są zarówno skończenie wymiarowe układy dynamiczne liniowe ciągłe i dyskretne jak i nieliniowe układy dynamiczne. W przypadku układów liniowych wyróżnia się miedzy innymi układy osobliwe oraz w przypadku układów dyskretnych układy o wielu zmiennych niezależnych. Przedstawione są także układy nieskończenie-wymiarowe opisane równaniami różniczkowymi cząstkowymi oraz skończenie wymiarowe układy dynamiczne z różnego typu opóźnieniami zarówno w stanie, jak i w sterowaniu.

Słowa kluczowe: układy dynamiczne, układy liniowe, układy z opóźnieniami, układy o parametrach rozłożonych, układy nieliniowe, układy o parametrach rozłożonych.

State of research in control theory

Abstract

The presented paper is devoted to analysis of research in the domain of control theory and development perspectives of control theory in technical high schools and research institutes of the Polish Academy of Sciences. The main research directions in mathematical control theory are pointed out. It should be stressed that control theory is developed in several universities and institutes. The paper contains many remarks and comments concerning control theory of finite-dimensional dynamical systems both for linear continuous-time and discrete-time as well as nonlinear dynamical systems. In the case of linear systems there are distinguished, among others, singular systems and in the case of discrete-time systems - systems with many independent variables. Moreover, infinite-dimensional dynamical systems and systems with different types of delays in the state variables and in the admissible controls are also considered. There are also presented in the paper: linear finite-dimensional dynamical systems, multidimensional systems and automatic control, distributed parameter dynamical systems, shape optimisation, dynamical systems with delays, special flying machines, nonlinear dynamical systems, multi-criterion optimisation.

Keywords: dynamical systems, linear systems, delayed systems, distributed parameter systems, nonlinear systems.

1. Układy liniowe skończenie wymiarowe

Liniowe układy skończenie wymiarowe ciągłe i dyskretne są najczęściej spotykanymi modelami matematycznymi wykorzystywanymi od wielu lat w teorii sterowania. W okresie ostatnich kilku lat znacznie wzrosło zainteresowanie wybranymi klasami liniowych skończenie wymiarowych układów dynamicznych. W przypadku liniowych układów dynamicznych równania stanu, równania wyjścia a także przestrzeń stanów układu, przestrzeń wejść (sterowań dopuszczalnych) oraz przestrzeń wyjść (odpowiedzi) są przestrzeniami liniowymi. Prowadzone badania naukowe dotyczą liniowych układów dynamicznych stacjonarnych oraz niestacjonarnych, zarówno ciągłych jak i dyskretnych. Z matematycznego, a ściślej rzecz biorąc z algebraicznego punktu widzenia liniowe układy dynamiczne zarówno ciągłe jak i dyskretne posiadają strukturę półgrupy operatorów liniowych a zatem ich teorie są podobne [5]. W przypadku układów liniowych ciągłych oraz dyskretnych dysponuje się wzorem na postać rozwiązania równania stanu, co znacznie ułatwia badanie własności tych układów.

Wśród liniowych układów dyskretnych rozpatruje się układy o jednej zmiennej niezależnej, tak zwane układy typu 1D oraz układy dyskretne o dwóch lub ogólnie o wielu zmiennych niezależnych to znaczy układy typu 2D lub ogólnie typu mD [4]. Modelami matematycznymi liniowych układów dyskretnych o wielu zmiennych niezależnych są liniowe równania różnicowe wielu zmiennych, przy czym rozróżnia się kilka podstawowych rodzajów różnicowych równań stanu z odpowiednio zadanymi warunkami brzegowymi. Analizuje się układy dyskretne opisane modelem typu Roessera i układy dyskretne przedstawione modelem ogólnym.

Ponadto wśród układów liniowych rozpatruje się układy dynamiczne bez opóźnień oraz układy z opóźnieniami w sterowaniu lub we współrzędnych stanu, a także układy hybrydowe ciągło-dyskretne. W klasie układów liniowych wyróżnia się podklasę tak zwanych układów osobliwych, to znaczy układów dynamicznych, dla których różniczkowe lub różnicowe równania stanu zawierają osobliwą, nieodwracalną macierz przy operatorze pochodnej lub przy operatorze różnicowym w równaniach stanu [4]. Osobliwe układy dynamiczne zdefiniowane są w podprzestrzeni liniowej przestrzeni stanów wyznaczonej przez układ liniowych równań algebraicznych. W przypadku układów osobliwych warunki początkowe powinny spełniać dodatkowe ograniczenia liniowe wyznaczające podprzestrzeń liniową dopuszczalnych warunków początkowych w przestrzeni stanów. Ze względu na liniowość układu dynamicznego, także w tym przypadku znane są wzory na postać rozwiązania równań stanu zarówno w przypadku układów ciągłych, jak i w przypadku układów dyskretnych.

Należy także podkreślić, że sterowalność liniowego układu dynamicznego z nieograniczonymi sterowaniami dopuszczalnymi umożliwia w oparciu o odpowiednio zdefiniowaną macierz sterowalności efektywne wyznaczenie tak zwanego sterowania minimalno - energetycznego, przeprowadzającego układ dynamiczny z zadanego stanu początkowego do zadanego stanu końcowego w ustalonym czasie oraz z minimalną energią sterowania.

Wyróżnioną klasę układów liniowych stanowią ciągłe układy dynamiczne, opisane liniowymi różniczkowymi równaniami stanu niecałkowitego rzędu, oraz układy dyskretne opisane różnicowymi równaniami stanu niecałkowitego rzędu [6]. Układy takie nazywane są również układami ułamkowymi opisującymi wiele zjawisk fizycznych. W przypadku ciągłych układów ułamkowych wykorzystuje się znane z literatury różne definicje pochodnych niecałkowitego rzędu, natomiast w ułamkowych układach dyskretnych stosuje się potęgi niecałkowitego rzędu operatorów różnicowych. Wykorzystując wzory na postacie rozwiązań równań stanu analizuje się podstawowe własności układów ułamkowych takie jak: stabilność, obserwowalność, sterowalność, oraz stabilizowalność [6].

Specyficzną klasę układów dynamicznych stanowią układy dodatnie, dla których warunki początkowe, sterowania dopuszczalne, współrzędne stanu oraz odpowiedzi są wektorowymi lub skalarnymi sygnałami o wartościach nieujemnych. Układy dodatnie zarówno ciągłe jak i dyskretne, mimo liniowych równań stanu i liniowych równań wyjścia są faktycznie układami nieliniowymi, gdyż zbiory wartości występujących w nich sygnałów nie są przestrzeniami liniowymi lecz stożkami dodatnimi. Rozróżnia się układy dodatnie oraz wewnętrznie dodatnie oraz formułuje się algebraiczne warunki konieczne i wystarczające na to, aby układ dynamiczny był układem dodatnim lub wewnętrznie dodatnim.

Dodatnie układy dynamiczne reprezentują wiele rzeczywistych zjawisk biologicznych i chemicznych oraz opisują liczne procesy ekonomiczne i demograficzne. Rozpatruje się również ogólniejsze klasy układów dynamicznych, dla których wszystkie występujące w nich sygnały mają wartości w ustalonych stożkach.

Badania w zakresie wszystkich wyżej wymienionych klas liniowych skończenie wymiarowych układów dynamicznych obejmują problemy [2, 5]:
1. sterowalności i obserwowalności,
2. istnienia i wyznaczania realizacji oraz minimalnej realizacji,
3. stabilności w tym odpornej stabilności,
4. stabilizowalności w tym odpornej stabilizowalności,
5. punktowej degeneracji i punktowej zupełności,
6. syntezy różnego typu obserwatorów stanu,
7. syntezy sterowania modalnego,
8. identyfikacji parametrycznej i nieparametrycznej.
9. analizy układów o własnościach chaotycznych

Ostatnio prowadzone są także badania w zakresie układów dynamicznych na skalach czasowych. Stworzono matematyczne podstawy teorii układów liniowych i nieliniowych na skalach czasowych. Rozszerzono także na skale czasowe różne podejścia i metody stosowane dla układów liniowych i nieliniowych. Zbadano realizacje oraz minimalne realizacje, równoważność dynamiczną, oraz redukowalność układów na skalach czasowych. Rozszerzono metody wielomianowe znane dla układów nieliniowych z czasem ciągłym i z czasem dyskretnym. Rozszerzono twierdzenia rachunku wariacyjnego na zagadnienia na skalach czasowych. Stworzono teorię liniowych układów różniczkowo-algebraicznych określonych w podprzestrzeniach liniowych, dla których w szczególności podano kryteria sterowalności i obserwowalności.

Tematyka prowadzonych badań dotyczących układów na skalach czasowych obejmuje:
1. liniowe i nieliniowe układy sterowania na skalach czasowych,
2. liniowe układy różniczkowo-algebraiczne,
3. układy różniczkowe z opóźnieniami,
4. układy różniczkowe niecałkowitego rzędu,
5. inkluzje różniczkowe,
6. sterowanie optymalne i rachunek wariacyjny.

Badania w zakresie stochastycznych układów liniowych zarówno ciągłych jak i dyskretnych koncentrowały się głównie na problematyce stabilności stochastycznej, sterowalności stochastycznej, obserwowalności stochastycznej oraz stabilizowalności układu stochastycznego poprzez dobór odpowiedniego sprzężenia zwrotnego od współrzędnych stanu lub od wyjścia. Wykorzystując teorię procesów stochastycznych, metody analizy funkcjonalnej oraz postacie rozwiązań stochastycznych równań stanu uzyskano warunki wystarczające dla różnych rodzajów stabilności stochastycznej oraz sterowalności stochastycznej dla stosunkowo szerokiej klasy liniowych układów dynamicznych.

Badania w obszarze liniowych układów dynamicznych prowadzone są w wielu ośrodkach, w tym między innymi w Instytucie Badań Systemowych PAN, w Instytucie Matematycznym PAN, w Akademii Górniczo Hutniczej, w Politechnice Białostockiej, w Politechnice Gdańskiej, w Politechnice Poznańskiej, w Politechnice Śląskiej, w Politechnice Warszawskiej, w Politechnice Wrocławskiej, oraz w Uniwersytecie Zielonogórskim.

2. Wielowymiarowe układy regulacji i sterowania

W obszarze teorii sterowania liniowymi stacjonarnymi wielowymiarowymi układami dynamicznymi o wielu wejściach i wielu wyjściach, w skrócie układami dynamicznymi MIMO uzyskano w ostatnim okresie wiele nowych rezultatów [1]. W szczególności dotyczy to zagadnień sterowania i regulacji liniowymi układami MIMO, w których występuje konieczność odwracania dynamicznego modelu obiektu sterowania, w różnych aspektach i dla różnych celów. Dotyczy to zwłaszcza układów sterowania z obiektami o niejednakowej liczbie wejść m i wyjść l które wymagają stosowania pseudoinwersji wymiernych macierzy transmitancji operatorowych, macierzy wielomianowych, a także macierzy liczbowych o niejednakowej liczbie wierszy i kolumn. W szczególności uzyskano następujące rezultaty:

Na bazie sterowania minimalnowariancyjnego obiektami MIMO, wyznaczono nowy zbiór nieminimalnofazowych zer transmisyjnych tak zwane zera sterownicze, (ang. *control zeros*), które powodowały niestabilność tych układów. Przedstawiono także różne sposoby wykonywania pseudoinwersji macierzy wielomianowych, które dają nowe spojrzenia na problemy występujące między innymi w zagadnieniach syntezy układów sterowania minimalnowariancyjnego [1].

Wyjaśniono zagadnienia występujące przy dynamicznym odprzęganiu zarówno blokowym jak i diagonalnym wielowymiarowych układów MIMO zarówno o jednakowej jak i niejednakowej liczbie wejść i wyjść $m > l\text{-}1$, mające nieminimalnofazowe tak zwane „skrośne" zera transmisyjne (ang. *interconnection transmission zeros*) dla celów sterowania w pętli otwartej i w zamkniętych układach sterowania wielofunkcyjnego MCS (ang. *multipurpose control systems*).

Opracowano i przebadano nową „otwarto-zamkniętą" strukturę wielowymiarowych układów regulacji stałowartościowej z wielowymiarowymi regulatorami optymalnymi LQR/LQG i modalnymi, ważnymi w układach regulacji adaptacyjnej, które z natury rzeczy nie mają akcji całkujących i powodują w stanach ustalonych statyczne odchyłki regulacji, często zaskakująco duże i zmieniające się po każdej zmianie którejkolwiek z wartości zadanych. Użycie dodatkowego sprzężenia zwrotnego od wektora wartości zadanych, proporcjonalnego do odwrotności macierzy wzmocnień obiektu, dla obiektów MIMO zarówno o jednakowej jak i niejednakowej liczbie wejść i wyjść $m>l\text{-}1$, pozwoliło wyeliminować bądź istotnie ograniczyć wartości statycznych odchyłek regulacji [1].

Zbadano i opracowano metody statycznego odprzęgania wielowymiarowych układów MIMO o jednakowej i niejednakowej liczbie wejść i wyjść $m>l\text{-}1$ dla celów sterowania w pętli otwartej, które mogą być wykorzystywane w systemach automatyki wspomaganych komputerowo, na przykład przy sterowaniu statkami wiertniczymi, promami morskimi podczas manewrów w portach, bezzałogowymi obiektami latającymi.

Podjęto także próbę kompensacji nieliniowości występujących w nieliniowych obiektach MIMO poprzez funkcje odwrotne do znanych funkcji występujących w nieliniowych równaniach stanu, ulokowane w nieliniowym sprzężeniu zwrotnym od wektora stanu obiektu. Znaleziono skuteczny sposób syntezy takiego wielowymiarowego układu i uzyskano dwa obiecujące przykłady pełnej kompensacji dla nieliniowych modeli obiektów 6-tego rzędu o 3 wejściach i 3 wyjściach, które po takiej kompensacji stały się, dodatkowo, całkowicie odprzęgnięte dynamicznie.

W przedstawionych powyżej zagadnieniach istotną rolę odgrywają pseudoinwersje lub inwersje statycznych macierzy „wzmocnień" wielowymiarowych obiektów sterowania zarówno ciągłych jak i dyskretnych, które w przyjętym wielomianowym ujęciu można wyznaczać nawet wtedy, gdy pewne elementy macierzy wzmocnień są nieskończone.

Prowadzone są także prace w zakresie predykcyjnego sterowania wielowymiarowymi obiektami dynamicznymi z ograniczeniami wektora sterowań, wektora stanu oraz wektora wyjść, zarówno dla obiektów liniowych jak i obiektów nieliniowych. Realizowane są prace o charakterze podstawowym w zakresie struktur algorytmów regulacji predykcyjnej. Opracowano struktury zintegrowanej predykcyjnej regulacji i bieżącej optymalizacji (dostrajania) punktów pracy, dla procesów liniowych i nieliniowych. Zaproponowano nowe struktury regulacji predykcyjnej dla obiektów nieliniowych, w tym nowe struktury modelowania neuronowego dla celów predykcji wielokrokowej, algorytmy dla modeli nieliniowych z liniową dynamiką. Opracowano nadrzędny sterownik predykcyjny wielozadaniowy (kontrola ograniczeń oraz optymalność) dla obiektów z warstwą regulacji bezpośredniej z regulatorami określonymi liniowymi prawami regulacji (podobnie jak w regulatorach typu PID).

Badania w obszarze wielowymiarowych układów regulacji i sterowania prowadzone są w Akademii Górniczo-Hutniczej, w Politechnice Rzeszowskiej, w Politechnice Śląskiej, Politechnice Warszawskiej oraz w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym,

3. Układy o parametrach rozłożonych

Układy dynamiczne o parametrach rozłożonych reprezentowane są równaniami różniczkowymi cząstkowymi, opisującymi dynamikę różnorodnych procesów przestrzennych. Stanowią one obszerną i ważną zarówno z punktu widzenia badań teoretycznych jak i aplikacyjnych klasę układów dynamicznych. Podstawowymi modelami matematycznymi dynamiki układów o parametrach rozłożonych są różnego rodzaju równania różniczkowe cząstkowe głównie typu parabolicznego oraz typu hiperbolicznego określone w danym obszarze przestrzennym, z odpowiednio zadanymi warunkami brzegowymi oraz warunkami początkowymi [5].

W przypadku układów dynamicznych o parametrach rozłożonych, przestrzeniami stanów są nieskończenie wymiarowe przestrzenie funkcyjne, a zatem biorąc pod uwagę wymiarowość przestrzeni stanów są to układy dynamiczne nieskończenie wymiarowe. W zależności od potrzeb jako przestrzeń stanów przyjmuje się do rozważań przestrzeń metryczną lub bardziej wyspecjalizowane przestrzenie takie jak przestrzeń Banacha lub przestrzeń Hilberta, czy też przestrzenie Sobolewa. Często jednak elementy „optymalne” przynależne do danej przestrzeni nie mogą być zrealizowane technicznie. Stąd konieczność prowadzenia rozważań w różnych przestrzeniach stanów.

Badania w zakresie układów dynamicznych o parametrach rozłożonych wymagają zastosowania zaawansowanego aparatu matematycznego analizy funkcjonalnej, topologii, teorii operatorów oraz teorii równań różniczkowych cząstkowych. W szczególności przydatne są metody i algorytmy wykorzystujące rezultaty z zakresu liniowych nieograniczonych operatorów różniczkowych oraz teorii półgrup operatorów liniowych. Przykładowo zastosowanie półgrup operatorów liniowych określonych w przestrzeniach Hilberta daje zwarty i elegancki schemat rozważań, szczególnie w przypadku operatorów samosprzężonych z widmem punktowym.

Przy badaniu stabilności układów o parametrach rozłożonych, ich stabilizowalności, sterowalności, oraz obserwowalności wykorzystuje się również spektralną teorię samosprzężonych operatorów liniowych w odniesieniu do generatorów półgrup oraz metodę ograniczonej perturbacji generatora półgrupy. Specyficzne zbieżności ciągów funkcjonałów powiązane z metodą rozwinięć asymptotycznych znajdują między innymi zastosowania w mechanice ciała stałego i mechanice płynów.

Stosowane są także metody aproksymacji układów dynamicznych o parametrach rozłożonych przez układy łańcuchowe złożone z szeregowo połączonych układów dynamicznych skończenie wymiarowych. Dotyczy to głównie układów dynamicznych o parametrach rozłożonych, których modelami matematycznymi są liniowe równania różniczkowe cząstkowe typu parabolicznego z odpowiednio zdefiniowanymi warunkami brzegowymi, gwarantującymi samosprzężoność związanego z równaniem cząstkowym operatora różniczkowego. W praktyce inżynierskiej do rozwiązywania zadań z zakresu układów o parametrów rozłożonych stosuje się szeroko także różnego typu komputerowe procedury symulacyjne wykorzystujące metody linii, metody siatek, oraz metody elementów skończonych.

W ostatnich latach prowadzi się badania nad podstawami matematycznymi półgrupy złożonej (ang. *implemented semigroup*) oraz jej wykorzystaniem w teorii sterowania układów o parametrach rozłożonych. W szczególności okazało się, że jest ona naturalnym narzędziem do badania własności nieskończenie wymiarowych różniczkowych oraz algebraicznych równań Lapunowa i Sylvestera. Równania te występują w różnorodnych zagadnieniach teorii sterowania i systemów, miedzy innymi w problemach badania stabilności, syntezy obserwatorów, syntezy sterowania oraz rozprzęgania dla nieskończenie wymiarowych liniowych układów sterowania.

W ostatnich latach prowadzi się badania nad podstawami matematycznymi tak zwanej półgrupy złożonej (ang. *implemented semigroup*) oraz jej wykorzystaniem w teorii sterowania układów o parametrach rozłożonych. W szczególności okazało się, że jest ona naturalnym narzędziem do badania własności nieskończenie wymiarowych różniczkowych oraz algebraicznych równań Lapunowa i Sylvestera. Równania te występują w różnorodnych zagadnieniach teorii sterowania i systemów, miedzy innymi w problemach badania stabilności, syntezy obserwatorów, syntezy sterowania oraz rozprzęgania dla nieskończenie wymiarowych liniowych układów sterowania.

Badania w zakresie liniowych i nieliniowych nieskończenie wymiarowych układów dynamicznych o parametrach rozłożonych prowadzi się w Instytucie Badań Systemowych PAN, w Instytucie Matematycznym PAN, w Akademii Górniczo-Hutniczej, w Politechnice Rzeszowskiej, w Politechnice Śląskiej, w Politechnice Wrocławskiej, w Uniwersytecie Zielonogórskim oraz w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym.

4. Optymalizacja kształtu

Problemy optymalizacji kształtu dla struktur mechanicznych stanowią oddzielną, wyróżnioną klasę problemów związanych z układami o parametrach rozłożonych. W tego typu problemach argumentem optymalizacji jest dziedzina określoności równania różniczkowego cząstkowego lub nierówności wariacyjnej opisującej własności statyczne lub dynamiczne danej struktury mechanicznej. Problemy takie są z natury rzeczy wysoce nieliniowe i ich analiza stwarza ogromne trudności teoretyczne i obliczeniowe. Z drugiej strony mają one wielkie znaczenie praktyczne, gdyż między innymi pozwalają na minimalizację zużytego w danej strukturze mechanicznej materiału.

Prace prowadzone w ostatnich latach koncentrowały się w dużym stopniu na opracowaniu teoretycznych podstaw i zbadaniu zakresu możliwych zastosowań tzw. *metody pochodnej topologicznej*. Metoda ta pozwala na optymalny wybór miejsca „dziur” w badanym materiale oraz wyznaczenie kierunku poprawy przy optymalizacji kształtu danej struktury mechanicznej. Okazuje się, że metoda ta jest szczególnie efektywna w połączeniu z metodą zbiorów poziomicowych. Prowadzone badania wskazują na możliwość zastosowania metody pochodnej topologicznej dla szerokiej klasy problemów optymalizacji kształtu, w tym między innymi:
- elastycznych problemów kontaktowych,
- optymalizacji struktur kompozytów,
- analizy wrażliwości wartości własnych,
- analizy pęknięć występujących w strukturach,
- analizy rozwiązań przy niepewnych danych.

Badania w zakresie optymalizacji kształtu, prowadzi się w Instytucie Badań Systemowych PAN oraz w Instytucie Matematycznym PAN.

5. Układy dynamiczne z opóźnieniami

Układy dynamiczne z opóźnieniami reprezentowane równaniami różniczkowymi zwyczajnymi z opóźnieniami stanowią wyodrębnioną szeroką klasę układów dynamicznych. Układy dynamiczne z opóźnieniami są układami nieskończenie wymiarowymi, gdyż stanem układu jest odcinek trajektorii. Nieskończenie wymiarowymi przestrzeniami stanów w przypadku układów dynamicznych z opóźnieniami są najczęściej przestrzenie funkcyjne Sobolewa, lub funkcyjne przestrzenie Hilberta co wynika bezpośrednio z analizy gładkości trajektorii czasowych tych układów [3, 5].

Ogólnie wśród układów dynamicznych z opóźnieniami wyróżnia się układy dynamiczne z opóźnieniami we współrzędnych stanu oraz z układy dynamiczne z opóźnieniami w sterowaniu. Ponadto w układach dynamicznych z opóźnieniami występuje kilka podstawowych rodzajów opóźnień, takich jak: stałe opóźnienia skupione w tym opóźnienia pojedyncze lub opóźnienia wielokrotne, zmienne opóźnienia skupione w tym opóźnienia pojedyncze lub opóźnienia wielokrotne oraz opóźnienia rozłożone występujące jako funkcja podcałkowa w całce Stieltjesa [5].

Należy również zaznaczyć, że w przypadku układów dynamicznych z opóźnieniami występują różne definicje przestrzeni stanów zależne w istotny sposób od rodzaju opóźnienia w różniczkowym równaniu stanu. Rozpatruje się między innymi stany chwilowe oraz stany zupełne układów dynamicznych z opóźnieniami. Zatem układy dynamiczne z opóźnieniami charakteryzuje bardzo duża różnorodność ich modeli matematycznych co znacznie utrudnia opracowanie zwartej, jednolitej teorii tych układów.

Przy analizowaniu układów dynamicznych z opóźnieniami podobnie jak w przypadku układów o parametrach rozłożonych wykorzystuje się teorię półgrup operatorów liniowych oraz metody i twierdzenia zaczerpnięte bezpośrednio z teorii równań różniczkowych zwyczajnych z różnego typu opóźnieniami. Zasadniczą trudnością przy analizowaniu liniowych układów dynamicznych z opóźnieniami jest to, że w tym przypadku liniowy generator półgrupy, którego widmo jest czysto punktowe, nigdy nie jest operatorem samosprzężonym, a ponadto nie można dokładnie wyznaczyć jego widma punktowego zawierającego zespolone być może wielokrotne wartości własne. Zatem bezpośrednie przeniesienie metod teorii spektralnej oraz wyników znanych dla nieskończenie wymiarowych układów o parametrach rozłożonych na nieskończenie wymiarowe układy dynamiczne z opóźnieniami we współrzędnych stanu nie jest możliwe.

W zakresie układów dynamicznych z opóźnieniami zarówno liniowych jak i semiliniowych prowadzono w ostatnim okresie badania obejmujące zagadnienia stabilności, stabilizowalności, sterowalności względnej, sterowalności absolutnej, obserwowalności oraz sterowania optymalnego. Wykorzystując znane z nieliniowej analizy funkcjonalnej twierdzenia o punktach stałych odwzorowań nieliniowych oraz twierdzenia o nieliniowych operatorach pokrywających uzyskano w ostatnim okresie nowe warunki sterowalności względnej w ustalonym przedziale czasowym dla wybranych klas nieliniowych układów z opóźnieniami. Sterowalność względna układu dynamicznego umożliwia w oparciu o odpowiednio zdefiniowaną macierz sterowalności względnej wyznaczenie tak zwanego sterowania minimalno-energetycznego przeprowadzającego układ z stanu początkowego do zadanego stanu końcowego w ustalonym czasie.

Badania w zakresie układów dynamicznych z opóźnieniami prowadzi się w Akademii Górniczo-Hutniczej, w Politechnice Białostockiej, w Politechnice Śląskiej, oraz w Politechnice Wrocławskiej.

6. Bezzałogowe, autonomiczne aparaty latające

Pojęcie bezzałogowych pojazdów powietrznych, UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*), albo Bezzałogowych Aparatów Latających (BAL), odnosi się do wszystkich pojazdów poruszających się w powietrzu bez załogi na pokładzie. Dotyczy to pojazdów zdalnie sterowanych z nadajników naziemnych lub latających autonomicznie.

Od początku rozwoju techniki, potrzeby wojska były czynnikiem napędzającym rozwój bezzałogowych pojazdów powietrznych (BAL). Pierwsze takie pojazdy były używane w czasie drugiej wojny światowej jako ruchome cele strzelnicze dla operatorów dział przeciwlotniczych. Na początku lat pięćdziesiątych zaczęto poszukiwać pojazdów powietrznych, które umożliwiłyby rozpoznanie i podgląd obszarów należących do nieprzyjaciela bez narażania ludzi. Od tamtego czasu prowadzone są badania na temat bezzałogowych aparatów latających. Z początku zagadnieniem tym zajmowały się tylko duże firmy zbrojeniowe i lotnicze. Obecnie, dzięki minimalizacji urządzeń elektronicznych, integracji i dostępności odbiorników GPS oraz inercyjnych systemów nawigacyjnych, możliwe jest budowanie bezzałogowych pojazdów latających o niewielkich rozmiarach, a przez to stosunkowo tanich i łatwych w eksploatacji.

Ze względu na budowę bezzałogowe pojazdy powietrzne można podzielić na dwie kategorie, samoloty (ang. *fixed-wing aircrafts*) i śmigłowce ogólnie zwane pojazdami VTOL (ang. *vertical take-off and landing*).

Spośród wielu dostępnych obecnie bezzałogowych pojazdów latających, śmigłowce mają największe możliwości manewrowania i są najbardziej wszechstronne. Potrafią startować i lądować nie używając pasa startowego, co szczególnie przydaje się w terenie zalesionym lub zabudowanym. Śmigłowiec może zrealizować zawis (ang. *hovering*) w danym miejscu w powietrzu i prowadzić stałą i wnikliwą obserwację z dowolnej odległości.

Dużym atutem samolotów jest siła nośna skrzydeł, dzięki której mogą pokonywać szybciej duże odległości przy mniejszym zużyciu paliwa niż śmigłowce. Jednakowoż potrzebują one pasa startowego i lądowiska, muszą znajdować się w ciągłym ruchu, co utrudnia wnikliwą obserwację z bliskiej odległości. Bezzałogowe, autonomiczne pojazdy latające doskonale nadają się do wykorzystania jako systemy pomiarowe w trudno dostępnych miejscach bez konieczności narażania ludzi na niebezpieczeństwo. Powoduje to duże zainteresowanie ich w szerokim zastosowaniem.

Przykładem bezzałogowego pojazdu latającego jest quadrokopter lub quadrotor wyposażony w cztery silniki. Rozwiązanie to jest niezwykle innowacyjne, a jednocześnie nadaje się do komercjalizacji. Dotyczy ono koncepcji oraz metody budowy i implementacji systemu umożliwiającego autonomiczne loty bezzałogowego cztero-śmigłowego aparatu o niewielkich rozmiarach, który w zależności od odpowiedniego wyposażenia może wykonywać rozmaite, ściśle określone zadania. Elementarną funkcją braną tu pod uwagę jest możliwość stabilnego i autonomicznego utrzymywania się w powietrzu oraz możliwość nawigacji, rozumianej jako autonomiczna lub nadzorowana zmiana pozycji zadanej przez operatora.

Zupełnie nowe, dalsze perspektywy rozwoju tego rodzaju aparatów latających związane są z rozwiązywaniem problemów sterowania z wykorzystaniem tak zwanych systemów agentowych. Ogólnie system agentowy składa się z pewnej liczby jednostek (agentów) współpracujących ze sobą w celu rozwiązania postawionego problemu. Działania agentów zwykle opierają się na własnej zdolności do podejmowania decyzji oraz realizacji określonych akcji bez interwencji użytkownika, jak również charakteryzują się możliwością wymiany informacji z użytkownikiem oraz innymi agentami lub procesami, a także zdolnością do postrzegania i reakcji na zmiany zachodzące w środowisku.

Jako jedno przykładowe zastosowanie tego rodzaju systemów można wskazać zadanie prowadzenia nawigacji na morzu. Do kierowania ruchem statku można zastosować system agentowy, którego poszczególne składniki (agenty) mogą być umieszczane na statkach operujących na danym akwenie, na stacjach brzegowych, ale też i na platformach mobilnych (śmigłowcach-robotach) patrolujących akwen (zwłaszcza w momentach jego większego zatłoczenia). Istotną cechą takiego systemu jest możliwość automatycznej komunikacji i wymiany danych pomiędzy platformami systemu w celu wyznaczania optymalnego sterowana ruchem poszczególnych statków oraz umożliwienia lepszej koordynacji ruchu wszystkich statków na takim akwenie.

Badania w zakresie bezzałogowych, autonomicznych aparatów latających prowadzi się w Politechnice Gdańskiej, Politechnice Poznańskiej oraz w Politechnice Śląskiej.

7. Układy nieliniowe

Analiza nieliniowych układów sterowania oraz nieliniowych układów regulacji jest trudna przede wszystkim ze względu na brak analitycznych postaci rozwiązań różniczkowych równań stanu układu dynamicznego. Najczęściej stosowaną metodą jest metoda linearyzacji modelu matematycznego układu nieliniowego wokół wybranego punktu pracy w przestrzeni stanów. Linearyzację wykorzystuje się przy badaniach lokalnej stabilności, lokalnej obserwowalności oraz lokalnej sterowalności układów nieliniowych.

W obszarze sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi tworzone są nowe algorytmy całkowania wstecz (adaptive backstepping) ze zmniejszoną liczba adaptowanych parametrów, oraz odporne algorytmy sterowania nieliniowego, także przy zmiennych oraz nieznanych wzmocnieniach sterowań. Zagadnienia te znajdują zastosowania w sterowaniu układami mechatronicznymi, zwłaszcza w robotyce i automatyce napędu. Prowadzone są prace z zakresu sterowania adaptacyjnego z wykorzystaniem modeli rozmytych i/lub sieci neuronowych zmienianych przez algorytmy uczenia. Stosuje się także nieliniowe sterowanie nadążające za modelem.

W zakresie badania analitycznych układów nieliniowych, to znaczy układów z analitycznymi funkcjami w równaniach stanu oraz równaniach wyjścia wykorzystuje się szeroko metody geometryczne, a w szczególności metody oparte na teorii algebr Liego. Algebry Liego są między innymi stosowane w linearyzacji układów nieliniowych, w badaniach sterowalności oraz obserwowalności, a także przy stabilizowalności układu poprzez dobór odpowiedniego sprzężenia zwrotnego od stanu lub od wyjścia. Rezultaty merytoryczne teorii nieliniowych układów dynamicznych znajdują szerokie zastosowania w sterowaniu robotami, a zwłaszcza manipulatorami mobilnymi, gdzie wykorzystuje się metodę endogenicznej przestrzeni konfiguracyjnej.

W zakresie nieliniowych układów dynamicznych specjalną klasę stanowią semiliniowe układy dynamiczne. W semiliniowych układach dynamicznych zarówno ciągłych jak i dyskretnych, różniczkowe lub różnicowe równania stanu układu zawierają część liniową oraz część nieliniową. Ogólnie część liniowa oraz część nieliniowa mogą zależeć zarówno od współrzędnych stanu, jak i od sterowań. Analiza semiliniowych układów dynamicznych prowadzona jest w zasadzie za pomocą tych samych metod, jakie stosuje się w przypadku nieliniowych układów dynamicznych. Zatem w praktyce stosuje się metody linearyzacji układu, lub metody oparte na algebrach Liego.

Osobną wyróżnioną klasę nieliniowych układów dynamicznych stanowią układy biliniowe, występujące między innymi w zagadnieniach z zakresu szeroko rozumianej biotechnologii. W biliniowych układach dynamicznych zarówno ciągłych jak i dyskretnych, równania stanu zawierają iloczyny współrzędnych stanu oraz sterowań dopuszczalnych. Z punktu widzenia teorii równań różniczkowych lub równań różnicowych są to równania liniowe, natomiast z punktu widzenia teorii sterowania są to układy nieliniowe, na dodatek stosunkowo trudne do analizy. W przypadku układów biliniowych nie stosuje się linearyzacji równań stanu, natomiast ze względu na analityczność prawych stron równań stanu do ich badania wykorzystuje się między innymi metody i twierdzenia z zakresu geometrii różniczkowej a w szczególności metody algebr Liego.

Badania w zakresie nieliniowych układów dynamicznych prowadzi się w Instytucie Badań Systemowych PAN, w Politechnice Gdańskiej, w Politechnice Łódzkiej, w Politechnice Wrocławskiej, w Politechnice Poznańskiej, oraz w Politechnice Śląskiej.

8. Optymalizacja wielokryterialna

Optymalizacja wielokryterialna jest ważną dziedziną badań zarówno w zakresie układów skończenie wymiarowych, jak i układów nieskończenie wymiarowych [3]. W przeciwieństwie do zadań skończenie wymiarowych, dla których optymalizacja wielokryterialna jest stosunkowo dobrze rozwinięta, dla zadań nieskończenie wymiarowych w przestrzeniach funkcyjnych z częściowym porządkiem wprowadzonym przez stożek, analiza teoretyczna jest trudna i daleka od kompletności.

Prowadzone badania wykorzystujące metody nieliniowej analizy funkcjonalnej związane były między innymi z:
- stabilnością rozwiązań i punktów równowagi w optymalizacji wektorowej,
- oszacowaniem błędów,
- zasadą wariacyjną typu Ekelanda dla zadań optymalizacji wektorowej.

W analizie stabilności i wrażliwości dla nieliniowych zadań optymalizacji prowadzi się badanie lokalnych własności rozwiązań tych zadań traktowanych jako funkcje parametru. Przy tym przez stabilność rozumie się lokalną lipschitzowość, a wrażliwość odnosi się do własności różniczkowalności. Obecność ograniczeń nierównościowych powoduje, że takie zadania są niegładkie. W analizie stabilności i wrażliwości zasadniczą rolę odrywają tak zwane zadania stowarzyszone (*accessory problems*), a co za tym idzie warunki optymalności drugiego rzędu. Poza aspektami teoretycznymi analiza stabilności i wrażliwości może znaleźć zastosowania między innymi w następujących zagadnieniach:
- oszacowaniach błędów wynikających z niepełnych danych,
- oszacowaniach prędkości aproksymacji,
- badaniu zbieżności pewnych iteracyjnych metod optymalizacji,
- sterowaniu hierarchicznym,
- korekcie „*on line*" trajektorii optymalnych.

Prowadzone prace dotyczyły:
- warunków optymalności drugiego rzędu, w tym dla zadań syngularnych i rozwiązań typu bang-bang.
- regularności rozwiązań,
- analizy stabilności i wrażliwości dla zadań z ograniczeniami stanu.

Badania w zakresie optymalizacji wielokryterialnej, prowadzi się w Politechnice Łódzkiej, w Politechnice Śląskiej, Instytucie Badań Systemowych PAN oraz w Instytucie Matematycznym PAN.

9. Podsumowanie

Niniejsze opracowanie poświecone jest analizie aktualnego stanu badań oraz perspektywom rozwoju teorii sterowania w uczelniach oraz w instytutach naukowych. Celem opracowania jest podjecie próby wytyczenia głównych kierunków działalności naukowo-badawczej oraz ich koordynacja. Teoria sterowania jest uprawiana w kilkunastu ośrodkach krajowych, w większości w wyższych uczelniach technicznych oraz w instytutach badawczych Polskiej Akademii Nauk. Niniejsze opracowanie jest rozszerzoną wersją referatu wygłoszonego na plenarnym posiedzeniu Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie w dniu 26 listopada 2010 roku. Opracowanie powstało przy aktywnym współudziale członków sekcji teorii sterowania Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk. Pragnę w tym miejscu serdecznie podziękować wszystkim, którzy aktywnie włączyli się do przygotowania niniejszego opracowania, a są to Panowie Profesorowie: Prof. dr hab. inż. Stanisław Bańka, Prof. dr hab. inż. Mikołaj Busłowicz, Prof. zw. dr hab. inż. Ryszard Gessing, Prof. zw. dr inż. Henryk Górecki, Prof. zw. dr hab. inż. Tadeusz Kaczorek, Prof. dr hab. inż. Zdzisław Kowalczuk, Prof. dr hab. inż. Kazimierz Malanowski, Prof. dr hab. inż. Wojciech Mitkowski, Prof. dr hab. inż. Dariusz Uciński.

10. Literatura

[1] Bańka S.: Sterowanie wielowymiarowymi układami dynamicznymi Ujęcie wielomianowe. seria Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, Tom 11, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2007.
[2] Busłowicz M.: Odporna stabilność układów dynamicznych liniowych stacjonarnych z opóźnieniami. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok, 2002.
[3] Górecki H.: Optymalizacja i sterowanie systemów dynamicznych. seria Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, Tom 9. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2006.
[4] Kaczorek T.: Positive 1D and 2D Systems. Springer-Verlag, London, 2001.
[5] Klamka J.: Controllability of Dynamical Systems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holandia, 1991.
[6] Ostalczyk P.: Zarys rachunku różniczkowo-całkowego ułamkowego rzędu. seria Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, Tom 12 Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2008.

otrzymano / received: 03.09.2011
przyjęto do druku / accepted: 03.10.2011 *artykuł recenzowany*