

Józef PIETRUCHA
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
Politechnika Warszawska

OSIĄGANIE KRZEPKOŚCI STEROWANYCH OBIEKTÓW LATAJĄCYCH JAKO ZADANIE TEORII MODYFIKACJI

Streszczenie. Celem głównym niniejszej pracy jest prezentacja zarysu teorii modyfikacji. Praca kieruje uwagę na nowy aspekt Dynamiki Lotu, nazwany tutaj "zagadnieniem krzepkości". Wykazano, że zagadnienie to można rozwiązać na gruncie teorii modyfikacji - nie ma zatem potrzeby tworzenia tzw. teorii krzepkości.

ATTAINMENT OF ROBUSTNESS OF CONTROLLED FLYING OBJECTS AS A PROBLEM OF THE MODIFICATION THEORY

Summary. The primary aim of the paper is to present a general outline of the theory of modification. This paper addresses a new aspect of Flight Dynamics, designated here as the "Robust Problem". It has been proved that this problem can be solved in the field of the theory of modification. Therefore, no theory of robustness is needed.

ДОСТИЖЕНИЕ РОБАСТНОСТИ УПРАВЛЯЕМЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ КАК ЗАДАЧА ТЕОРИИ МОДИФИКАЦИИ

Резюме. Основная цель этой работы - представить очерк теории модификации. Работа обращает внимание на новый аспект динамики полета, именованный сюда как "проблема робастности". Доказано, что эта проблема может быть решена с помощью методов теории модификации и поэтому не нужна никакая теория робастности.

1. WSTĘP

Obserwacja kierunków rozwojowych techniki lotniczej wskazuje, że w dziedzinie dynamiki sterowanych obiektów latających (SOL) stosunkowo niedawno pojawiła się i intensywnie się rozwija nowa grupa zagadnień, której hasłem wywoławczym jest "robustness" (w różnych konfiguracjach słownych). Wydaje się, że polskie słowo "krzepkość" jest bardzo dobrym odpowiednikiem tego pojęcia i nie ma żadnego powodu posługiwania się tłumaczeniem dosłownym, jak to się stało w języku rosyjskim ("робастность"). Sprawy związane z pojęciem krzepkości będziemy nazywali "zagadnieniem krzepkości".

Celem niniejszego referatu jest wykazanie, że krzepkość stanowi ważną, ale jedną z wielu własności dynamicznych SOL, a jej osiągnięcie może być traktowane jako zadanie teorii modyfikacji własności dynamicznych złożonych ukła-

dów mechanicznych. Nie istnieje więc konieczność powoływania nowego bytu pn. teoria krzepkości.

2. ELEMENTY TEORII MODYFIKACJI

Na pierwszy rzut oka wydaje się, że z modyfikacją jest trochę tak, jak z panem Jourdinem, który nie wiedział, że mówi prozą. Trudno sobie przecież wyobrazić inżyniera, który nie dokonywałby przeróbek jakiegoś urządzenia, o niezadowolającym go zachowaniu. Przez modyfikację rozumiemy zatem, zgodnie zresztą ze znaczeniem słownikowym i potocznym, takie działania, jak: przeróbka, zmiana, przekształcenie. Z reguły wykonuje się je metodą prób i błędów. Tutaj natomiast chcemy omówić podstawy matematyczne modyfikacji racjonalnej; nadajemy im nazwę Teorii modyfikacji (TModyf).

Przez TModyf w ogóle będziemy rozumieli wiedzę obejmującą teorię modelowania, stateczności, wrażliwości i sterowania, a więc teorie mające już ustalone "prawa obywatelskie". Oczywiście, od razu nasuwa się pytanie, czemu ma służyć taka hybryda?. Aby odpowiedzieć na to pytanie trzeba rozważyć po kolei najistotniejsze cechy poszczególnych teorii. Aby nie sprawiać wrażenia nowego Snerga [1], rozważania będziemy odnosić nie "do wszystkiego", a tylko do szeroko pojętej Mechaniki Lotu. Autor ma wszakże nadzieję, że próba szerszego spojrzenia na wymienione teorie, które same w sobie nie są niczym nowym, może być pożyteczna także w innych dyscyplinach inżynierskich. W każdym razie pierwsza próba była udana [2].

2.1. Teoria modelowania

Najłatwiej można by określić Teorię modelowania (TModel) jako to, co zostaje przez Komitet Organizacyjny Sympozjonu "Modelowanie w Mechanice" przydzielone do tematu 4 (teoria i metody modelowania). Zachodzi jednak obawa, że nie jest to określenie satysfakcjonujące. Tym bardziej, że rzadko trafiają się referaty z tej problematyki (np. [3]). Niewiele daje również parafraza słynnego powiedzenia Feynmana, że TModel to to, o czym myśli modelarz, gdy nie może spać. Sprawę utrudnia fakt, że nie ma praktycznie żadnej monografii na ten temat, jeśli nie liczyć książki [4]. W tej sytuacji za TModel wypada uznać to, co jest tam przedstawione. Należy przy tym odnotować znaczące sukcesy szkoły gliwickiej w zakresie metody grafów (np. [5]).

Gdyby trzeba było jednym zdaniem scharakteryzować najważniejszy rys TModel, to byłoby ono takie: decydujący wpływ na wybór modelu fizycznego, a w konsekwencji na postać modelu matematycznego, ma sformułowanie celu modelowania.

2.2. Teoria stateczności ruchu

Pozornie wygląda na to, że pojęcie stateczności jest tak dobrze znane mechanikom, że pisanie o nim jest stratą czasu. Tym nie mniej podanie kilku uwag może być rzeczą pożyteczną.

Przez Teorię stateczności rozumie się na ogół teorię poświęconą klasycznemu pojęciu stateczności ruchu w sensie Lapunowa (np. [6]). Pamiętamy jednak, że za punkt wyjścia przyjmuje się tam zapis macierzowo-wektorowy układów równań różniczko-

wych. Oznacza to, że badania wymagają zbudowania odpowiedniego modelu matematycznego. Pojęcie stateczności nie jest więc charakterystyczne dla pewnego zjawiska fizycznego, lecz dla jego modelu i wobec tego podlega ono zdefiniowaniu w zależności od tego, jakich cech żądamy od tego modelu.

W zagadnieniach technicznych często poszukuje się tzw. parametrów krytycznych, dla których występuje niedopuszczalny przez przepisy wzrost rozwiązania modelu matematycznego. Przykładem klasycznym takiego parametru w Mechanice Lotu jest prędkość flatteru, którą wyznacza się albo na podstawie modelu liniowego, albo nieliniowego. Otóż w takich sytuacjach badanie stateczności w sensie Lapunowa i wyznaczanie parametrów krytycznych mogą różnić się w sposób istotny (zob.[7], str. 8).

Istnieje wiele pojęć stateczności, niekiedy dość odległych od "macierzystego" pojęcia Lapunowa. Należy więc zachować ostrożność przy stawianiu różnych zadań stabilizacji.

2.3. Teoria wrażliwości

Zauważmy najpierw, że teoria wrażliwości (TWraż), zwłaszcza na początkowym etapie rozwoju, bywała utożsamiana z analizą wrażliwości: it "studies the effects of parameter variations on the behavior of dynamic systems." ([8], str.1). Należy podkreślić, że wrażliwość rozwiązań modelu matematycznego na zmiany jego współczynników jest własnością odmienną od stateczności w sensie Lapunowa, gdyż w tym przypadku nie ulegają zmianie warunki początkowe i brzegowe.

W TWraż pojawia się nowa jakość nieznaną na gruncie teorii stateczności, a mianowicie tzw. zagadnienie odwrotne. Polega ono na wyznaczeniu zmian parametrów obiektu nominalnego przy postulowanych zmianach własności dynamicznych obiektu zmodyfikowanego. Zagadnienie takie nosi także nazwę syntezy modyfikacyjnej [2].

W TWraż istnieje potrzeba precyzyjnego rozróżnienia między dwoma modelami: nominalnym i "nie dokładnościowym" (dalej zwanym "modelem niedokładności", gdyż opisuje on odchylenia od modelu nominalnego). Uważamy, że odpowiadają one modelom: podstawowemu i rozszerzonemu (wg [9], str.13).

2.4. Teoria sterowania

Teoria sterowania (Tster) bywa uważana za wynik połączenia trzech oddzielnych elementów: teorii serwomechanizmów, rachunku wariacyjnego i techniki obliczeniowej (wg [10], str.21). Takie określenie, którego istotnym elementem jest rachunek wariacyjny, sugeruje, że Tster zamyka się w kręgu Zasady Maksimum Pontriagina i Programowania Dynamicznego Bellmana. Tym sposobem tak cenna, z punktu widzenia kształtowania własności dynamicznych SOL, Tster modalnego (np.[11]) pozostaje poniekąd za burtą. Podobnie wygląda sprawa z teorią l-momentów Krejna, a warto zaznaczyć, że można ją stosować do modeli o stałych rozłożonych (np.[12]).

Trzeba jeszcze zwrócić uwagę, że zagadnienie odwrotne w Tster ma zupełnie inny sens niż w TWraż: najpierw przyjmuje się pewne prawo sterowania, a potem szuka się takiego wskaźnika jakości, który to prawo spełnia.

2.5. Wnioski

Tmodyf w Mechanice Lotu nie jest mechanicznym zlepkiem różnych teorii, ale ich spójnym uogólnieniem, gdzie dokonuje się konfrontacja tych teorii i ich wzajemne

wspomaganie. Pogląd ten można już teraz (tzn. przed podaniem przykładu) poprzeć dwiema prostymi ilustracjami; pierwsza dotyczy konfrontacji, druga wspomaganie.

1) Na gruncie T_{Ster} znane jest pojęcie sterowania programowanego ([13], str.139). W związku z tym zasadne byłoby używanie tam pojęcia ruchu programowanego. Okazało się jednak, że w mechanice analitycznej istnieje prawie identyczne pojęcie, ale oznaczające co innego, a mianowicie postulat, który dopiero ma być zrealizowany [14].

2) W dynamice maszyn ważnym zagadnieniem jest wibroizolacja, która w T_{Modyf} może stanowić cel modyfikacji. W ramach wibroizolacji per se trzeba już dobrać konkretną funkcję celu (np. ciśnienie akustyczne). Zwykle chodzi o redukcję tego ciśnienia, co można zrealizować metodami biernymi (T_{Wraź}) lub czynnymi (T_{Ster}).

3. KRZEPKOŚĆ STEROWANYCH OBIEKTÓW LATAJĄCYCH

Nie jest rzeczą łatwą ustalić, kiedy pojęcie krzepkości pojawiło się w literaturze, choć od kilku lat istnieje już monografia [15]. Ale jeszcze trudniej jest znaleźć definicję tego pojęcia, nawet w zacytowanej pracy. W tej sytuacji podamy określenia opisowe, które umożliwią przynajmniej pewną orientację.

3.1. Krzepkość a wrażliwość i niezmienniczość

Należy tu wyraźnie podkreślić, że w literaturze rosyjskiej w ogóle nie używa się słowa "робастность" (pojawia się ono raczej w tłumaczeniach z j. ang. w tygodniku "Авиастроение"). W powszechnym użytku znajduje się natomiast wyrażenie odpowiadające po polsku "mała wrażliwość na zmiany parametrów" - малочувствительность (np.[16], c.421).

Niektórzy autorzy amerykańscy posługują się słowem "robustness" w szacowaniu zmiany jakości sterowania spowodowanej niedokładnością modelu, rezerwując słowo "sensitivity" dla analizy wpływu zakłóceń zewnętrznych ([15], p.43). Tu wszakże pojawia się konfuzja, gdyż w b.ZSRR w tym wypadku stosuje się słowo niezmienniczość (инвариантность - [17]). Co więcej, w monografii [15] czytamy, że "while sensitivity analysis considers very small perturbations of the parameters around a given nominal value, robustness analysis concerns large perturbations." (p. 44). Tymczasem w opracowaniu [2] takie duże zmiany wiąże się z analizą modyfikacyjną globalną.

3.2. Sterowanie krzepkie a sterowanie adaptacyjne

W bieżącej literaturze na temat dynamiki SOL często pojawia się zwrot "sterowanie krzepkie" (the robust control). Odczytawszy je jako takie sterowanie, które nadaje obiektowi sterowanemu własność krzepkości w rozumieniu niezmienniczości, powinniśmy zapytać o różnicę ze sterowaniem od zakłóceń, którego celem jest uniezależnienie obiektu sterowanego od wpływu tych zakłóceń ([18], s.200).

Wyłania się tutaj jednak sprawa merytoryczna o znaczeniu niebagatelnym. Otóż sterowanie adaptacyjne też ma m.in. do spełnienia podobny cel jak sterowanie od zakłóceń, ale za pomocą zmian struktury lub parametrów regulatora [19]. Zachodzi teraz pytanie: czy i pod jakimi warunkami drogi regulator adaptacyjny można zastąpić prostszym regulatorem krzepkim, o ile krzepkość zinterpretujemy jako niewrażliwość?.

3.3. Czym jest krzepkość?

Można by jeszcze próbować szukać innych relacji krzepkości, np. z autonomicznością czy niezawodnością, lub sterowania krzepkiego ze statecznością krzepką (the robust stability), ale już teraz wyłania się pytanie, czym właściwie jest sama krzepkość?. Czy ważną własnością dynamiczną (jak w p. 3.1), czy (tylko) epitetem określającym ważne działania (jak w p. 3.2)?. Rozstrzygnięcie tej kwestii nie jest istotne z punktu widzenia teorii modyfikacji, gdyż radzi sobie w obu przypadkach; w pierwszym po zdefiniowaniu stosownej miary krzepkości; w drugim - po zastosowaniu adekwatnej metody.

3.4. Przykład

Ze względu na brak miejsca, tutaj przytoczymy tylko szkic przykłądu, a szczegóły zostaną podane w trakcie referowania.

Przykład dotyczy oszacowania zmian wskaźnika jakości sterowania spowodowanych pominięciem różnego rodzaju nieliniowości aerodynamicznych (zagadnienie wrażliwości). Modelem fizycznym jest samolot nieodkształcalny o trzech stopniach swobody, a zmienną sterującą - kąt wychylenia steru wysokości (sterowanie czynne).

Rozwiązanie zadania było prezentowane na seminarium w Laboratorium Mechaniki Stosowanej w Besancon 24. paźdz. 1978r. W świetle dotychczasowych ustaleń można stwierdzić, że uzyskano je na gruncie teorii modyfikacji.

4. PODSUMOWANIE

1) Nie ma precyzyjnej definicji pojęcia krzepkości, która byłaby ogólnie przyjęta. Można jednakże ustalić, że pojęcie to stosuje się w tych sytuacjach, gdzie model matematyczny jest niepełny.

2) Celem badania krzepkości jest opracowanie metod projektowania regulatorów z uwzględnieniem modelu niedokładności.

3) Sprawą kluczową jest budowa adekwatnego modelu niedokładności i sformułowanie miary krzepkości.

4) Teoria modyfikacji dostarcza dogodnych metod realizacji zadanych charakterystyk dynamicznych, w tym osiąganie krzepkości sterowanych obiektów latających. Wydaje się zatem, że tzw. "Robust Theory" jest bytem ponad miarę.

Prezentowana praca została wykonana w ramach tzw. własnej pracy badawczej - umowa nr 503/790/3.

LITERATURA

- [1] Wiśniewski A.-Snerg: Jednolita teoria czosoprzestrzeni. "Pusty Obłok", Warszawa, 1990.
- [2] Sprawozdanie z pracy badawczej: Bierna i czynna modyfikacja własności widmowych obiektów odkształcalnych. ITLiMS PW, Warszawa 1984.
- [3] Dietrych J.: Doświadczenie - model - odpowiedzialność - eksperyment. Zb. ref. XXVIII Symp. "Model. w Mech.", PTMTS, Gliwice, 1989, s.9-16.

- [4] Arczewski K., Pietrucha J.: *Mathematical Modelling of Complex Mechanical Systems*. Chichester: Ellis Horwood, 1993.
- [5] Wojnarowski J. i inni: *Modelowanie drgań układów mechanicznych metodami grafów i liczb strukturalnych*. : Skrypt uczelniany nr 1266, Gliwice 1986.
- [6] Demidowicz B.P.: *Matematyczna teoria stabilności*. WNT Warszawa, 1972.
- [7] Gutowski R.: *Podstawy teorii stateczności ruchu układów dyskretnych i ciągłych*. Warszawa: Materiały pomocnicze dla SD i MS, 1981.
- [8] Tomovic R., Vukobratovic M.: *General Sensitivity Theory*. NY: Elsevier, 1972.
- [9] Wierzbicki A.: *Modele i wrażliwość układów sterowania*. WNT, Warszawa, 1977.
- [10] Athans M., Falb P.L.: *Sterowanie optymalne*. Warszawa: WNT, 1969.
- [11] Leitmann G.: *Wprowadzenie do teorii sterowania optymalnego*. WNT Warszawa, 1971.
- [12] Pietrucha J., Szewczyk Z.: *Metoda sterowania modalnego i jej zastosowanie do ustaczniania lotu śmigłowca*. "Mech. Teoret. i Stos.", Nr 4, 1976, ss.571-584.
- [13] Maroński R., Pietrucha J.: *Porównanie metod sterowania modalnego i l-momentów jako sposobów stabilizacji ciągłych układów drgających*. "ZN PRz.", Nr 31, Mechanika, z.12, ss.53-56.
- [14] Gutowski R.: *Mechanika analityczna*. PWN, Warszawa, 1971.
- [15] Lunze J.: *Robust Multivariable Feedback Control*. Berlin: Akademie Verlag, 1988.
- [16] Розенцвер В. Ю. Сутов В. М. Чувствительность систем управления. "Наука", Москва 1981.
- [17] Павлов В. Б. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления. "Наукова Думка", Киев 1971.
- [18] Niederlinski A.: *Układy wielowymiarowe automatyki*. WNT, Warszawa, 1974.
- [19] Gałaj J.: *Analiza wpływu zmienności parametrów autopilota adaptacyjnego na jakość sterowania śmigłowcem w ruchu podłużnym*. Pr. dokt., MEiL, Warszawa, 1979.

Recenzent: Dr hab.inż. Andrzej Buchacz

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1993r

Abstract

The main purpose of the paper is to present an unified approach to the dynamic properties formed of complex mechanical systems. This approach that unites the known theories of modelling, stability, sensitivity, and control, is called the "Theory of Modification". The natural question which immediately arises is: what such hybrid is created for?. Well, such a coherent generalization is motivated by the fact that both the sensitivity theory and the control theory treated the problem of dynamic properties formed as a marginal problem. Besides, the proposed approach employes both the modelling theory and the stability theory in an integral manner.

In order to characterize the area of the theory of modification, we give very brief comments every of the separate theory (Secs. 2.1-2.4; Refs. [1] - [14]).

This paper addresses a new aspect of Flight Dynamics, designated here as the "Robust Problem". It is not an entirely unknown problem in the literature on dynamics of controlled systems. But to date, this problem is still at a stage of intensive research, so there are many confusions about it. Therefore, the author has merely attempted to describe the fundamental relations between the notion "robustness" and the known notions of stability, sensitivity, etc. (Secs. 3.1-3.3; Refs. [15] - [19]).

General considerations are illustrated by an example concerning the rigid model of an aircraft with three degrees of freedom (Sec. 3.4).

Finally, it is concluded that the theory of modification constitutes a convenient base for formulations and solutions of various specific engineering problems. The "Robust Problem" can be also solved in the field of this theory. Therefore, no extra theory of robustness is needed.