



Politechnika Poznańska
Wydział Elektryczny
Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Estymacja zmiennych stanu i parametrów układu
dwumasowego przy pomocy rozmytych filtrów Kalmana**

Autor: mgr inż. Krzysztof Drózdź

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Szabat

Promotor pomocniczy: dr inż. Dariusz Janiszewski

Poznań - Wrocław 2017

STRESZCZENIE

W wielu układach przemysłowych, zarówno w klasycznym napędzie jak i w robotyce, podczas projektowania struktury sterowania należy uwzględnić charakterystykę części mechanicznej. Jej pominięcie może doprowadzić do powstania oscylacji zmiennych stanu, obniżenia niezawodności układu a w szczególnych przypadkach nawet do utraty stabilności całego układu sterowania. Jako przykład można tutaj różne układy zaczynając od napędów taśmociągów, walcarek czy maszyn papierniczych przez nowoczesne serwonapędy, ramiona robotów po napędy dysków twardej czy MEMS (*micro electromechanical systems*). Czynnikiem utrudniającym sterowanie takiego typu obiektu jest brak informacji o wszystkich zmiennych stanu obiektu i zewnętrznych zakłóceniach jak również zmienność jego parametrów. W celu efektywnego sterowania takim obiektem konieczne jest użycie jednej z zaawansowanych struktur sterowania – w niniejszej pracy wybrano strukturę adaptacyjną.

W celu realizacji zaawansowanej struktury sterowania konieczna jest informacja o wszystkich zmiennych stanu układu napędowego. Jednakże ich pomiar w wielu przypadkach jest utrudniony czy wręcz niemożliwy. Czynnikiem dodatkowo utrudniającym sterowanie jest zmiana parametrów obiektu. W takim przypadku należy estymować wybrane parametry i na ich podstawie przestrajac zarówno strukturę sterowania jak i estymator. W literaturze istnieje szereg metod estymacji zmiennych stanu np. obserwatory Luenbergera, filtry Kalmana, obserwatory z przesuwym oknem czy estymatory oparte na sztucznej inteligencji. W niniejszej rozprawie badano dwa algorytmy filtrów Kalmana: rozszerzony filtr Kalmana i bezśladowy filtr Kalmana. W celu poprawy ich właściwości zaproponowano wykorzystanie systemów rozmytych.

W rozprawie postawiono dwie tezy o następującej treści:

- 1. Wprowadzenie logiki rozmytej do klasycznych algorytmów filtrów Kalmana estymujących wielkości związane z układem dwumasowym, zapewnia poprawę jakości ich estymacji.**
- 2. Adaptacyjna struktura sterowania układu dwumasowego z regulatorem liniowym i dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi od wybranych wielkości, współpracująca z rozmytym filtrem Kalmana, umożliwia uzyskanie założonych przebiegów prędkości obciążenia układu dwumasowego niezależnie od zmian jego parametrów.**

Praca została podzielona na dziewięć rozdziałów o następującej treści:

Po wprowadzeniu w tematykę oraz prezentacji celu i zakresu pracy w rozdziale drugim przedstawiono modele matematyczne obiektów badań. Omówiono silnik napędowy, układ dwumasowy oraz tarcie mechaniczne. Uzasadniono dobór modeli do dalszej analizy.

W trzecim rozdziale zawarto przegląd struktur sterowania układu dwumasowego. Omówiono kaskadowe struktury regulacji: bez dodatkowych sprzężeń zwrotnych, z jednym dodatkowym sprzężeniem zwrotnym i z dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi. Przedstawiono również strukturę sterowania z regulatorem stanu. Następnie zaprezentowano możliwości kompensacji wpływu momentu obciążenia na przebieg prędkości maszyny roboczej.

Czwarty rozdział przedstawia zagadnienia odtwarzania zmiennych stanu i parametrów układu dwumasowego. Zamieszczono w nim przegląd metod z tym związanych. Omówiono metody algorytmiczne, takie jak: symulatory, obserwator Luenbergera, obserwator ślizgowy i rozważane w niniejszej rozprawie filtry Kalmana. Następnie opisano metody bazujące na sztucznej inteligencji.

Piąty rozdział związany jest z systemami rozmytymi, gdzie zaprezentowano ich przegląd. Dokładniej opisano system Mamdaniego wybrany do analizy w rozprawie.

Rozdział szósty zawiera teorię dotyczącą procesu filtracji wykorzystującego założenia Kalmana. Po krótkim wprowadzeniu, gdzie omówiono rys historyczny filtrów Kalmana wraz z zastosowaniami przemysłowymi, zaprezentowano ich podstawy matematyczne. Kolejno omówiono modele matematyczne rozszerzonego filtru Kalmana i bezśladowego filtru Kalmana. Następnie przedstawiono zagadnienia związane z modyfikacjami tych algorytmów, proponowanymi w niniejszej rozprawie. Dotyczą one rozmytych filtrów Kalmana, gdzie wyróżniono rozmyte filtry Kalmana ze statyczną i dynamiczną adaptacją wyrazów macierzy kowariancji, wprowadzaną przez zaprojektowane w tym celu systemy rozmyte.

W rozdziale siódmym opisano realizację rozważanych w niniejszej rozprawie algorytmów filtrów Kalmana. Przedstawiono metodologię badań oraz wybrane wyniki badań symulacyjnych z wykorzystaniem: rozszerzonego filtru Kalmana i rozmytego rozszerzonego filtru Kalmana, bezśladowego filtru Kalmana i rozmytego bezśladowego filtru Kalmana. Zaprezentowano wyniki badań porównawczych rozważanych algorytmów.

Weryfikację eksperymentalną rozważanych algorytmów filtrów Kalmana zawarto w rozdziale ósmym. Po krótkim opisie stanowiska laboratoryjnego przedstawiono wybrane wyniki badań z wykorzystaniem: rozszerzonego filtru Kalmana i rozmytego rozszerzonego filtru Kalmana, bezśladowego filtru Kalmana i rozmytego bezśladowego filtru Kalmana.

Rozprawę zakańcza rozdział dziewiąty, w którym zawarto podsumowanie, uwagi i wnioski odnoszące się do całości pracy. Potwierdzono w nim tezy niniejszej rozprawy oraz wskazano możliwości rozwoju poruszanych zagadnień w dalszej pracy naukowej.

SUMMARY

In a large number of industrial applications, in classical drive systems as well as in robotics, the mechanical part of the object should be included when the control structure is being designed. Neglecting of mechanical characteristics can lead to oscillations in the system states, decrease reliability of the system and in specific situations it can even destabilize the whole control structure. The discussed issue is vital in different drive systems starting from conveyor, rolling-mill or paper machine drives, through robot-arm or hard disc drives, to micro-electromechanical systems. The factor that may impede the control of such objects is the limited number of information from all the system state variables, external disturbances and changeability of its parameters. In order to control such plants effectively the adaptive control structure is selected.

In order to apply advanced control structure the information of all system states is needed. However, its direct measurement is difficult or in many cases even impossible. Due to variation of plant implementation of the control structure parameters may be difficult. In such case changes of the parameters should be estimated and coefficients of the control structure and estimators should be retuned. In the literature there are different estimation techniques, such as: Luenberger observers, Kalman filters, moving horizon estimators or estimators based on artificial intelligence. In the thesis two estimation algorithms are investigated, namely Extended Kalman filter and Unscented Kalman Filter. In order to improve the properties of the estimators the fuzzy systems are applied.

In the dissertation two theses are considered:

- 1. The application of fuzzy logic to classical estimation algorithms based on Kalman filters working in the control structure for a two-mass system improve the quality of the estimated states.**
- 2. An adaptive control structure of a two-mass system with a linear controller supported by additional feedbacks from selected states variables, working with Kalman filters ensures the desired shape of the load speed instead of changing parameters of the system.**

The thesis includes nine chapters on the following subjects:

The first chapter constitutes an introduction and presentation of the main goals of the thesis, while in the second chapter the mathematical models are presented. The driving motor, two-mass system and mechanical friction are analysed. Selection of specific models for further analysis is explained and justified.

An overview of the control structures for a two-mass system is presented in chapter three. The following structures are shown in detail: without additional feedbacks, with one additional feedback and two additional feedbacks. Also the state controller is demonstrated. Next the possibility of compensation of the effect of changing of the load torque is analysed.

The issues connected to estimation techniques for the two-mass system are shown in chapter four. The algebraic methods such as Luenberger observer, sliding mode observer and Kalman filters are presented. Also methods based on artificial intelligence are introduced.

The fuzzy logic is introduced in the next chapter. Especially the Mamdani system, used in the thesis, is presented in detail.

The theory connected to Kalman filtering is presented in the sixth chapter. After a short introduction, including historical background, the mathematical formulation is demonstrated. Next the Extended and Unscented Kalman filters are presented. Then the modification of the classical Kalman filter algorithms, proposed in the thesis, are introduced. The static and dynamic adaptation approaches, based on fuzzy systems, of the covariance matrices are demonstrated.

Next the simulation and experimental studies are presented. Two considered Kalman filter algorithms without and with additional adaptation are tested under different conditions. A critical comparative analysis including estimation accuracy is included in the work.

In the conclusion the main results of the thesis are formulated and summarized. The properties of the designed fuzzy Kalman filter algorithm are listed. Besides, possible further research is addressed.