

Marcin Kamiński, Krzysztof Szabat
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ANALIZA WPLYWU OPÓŹNIEŃ UKŁADU KSZTAŁTOWANIA MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI DWUMASOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

THE INFLUENCE OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE CONTROL LOOP ON THE DYNAMICS OF THE TWO-MASS DRIVE SYSTEM

Abstract: In some industrial applications, such as rolling mill drives, torsional oscillations can occur due to the finite stiffness of the mechanical shaft. They degrade the performance of the drive system, can damage the mechanical part of the system, and in some cases they could lead to the control structure instability. One of the commonly used methods of damping torsional vibrations relies on the application of special control structures, i.e. the two control loops: electromagnetic torque and speed. During the design process of the speed loop the dynamics of the torque loop is very often neglected. This simplifies the synthesis of the speed controller and allows to shape the dynamics of the speed in a wide range. However, for fast dynamics of the speed control loop this assumption can lead to oscillations of the system state variables. In the paper an analysis of the two-mass drive system with inertia caused by the torque loop and the state controller is carried out. The analytical formulas which allow to set the control structure parameter are provided. Selected simulation and experimental results confirm the theoretical considerations.

1. Wstęp

Model układu dwumasowego opisuje zjawiska, spotykane w praktycznych zastosowaniach przemysłowych napędów elektrycznych. Charakterystyczną cechą tego typu układów jest występowanie oscylacji elektromechanicznych zmiennych stanu wynikających ze skończonej sztywności połączenia silnika napędowego z maszyną roboczą [1]-[3]. W takich warunkach pracy utrudnione jest precyzyjne sterowanie układem napędowym. Drgania skrętne mogą powodować uszkodzenia elementów łączących; w szczególnych przypadkach możliwa jest utrata stabilności struktury sterowania. Jedną z najbardziej efektywnych metod mających na celu zapewnienie poprawnej pracy napędu elektrycznego z połączeniem sprężystym jest wykorzystanie specjalnych struktur regulacji prędkości [1]-[4]. W strukturach tych występują dwie pętle regulacji: momentu elektromagnetycznego oraz prędkości napędu [1]-[4]. Bardzo często projektując pętle regulacji prędkości zakłada się, że moment elektromagnetyczny wymuszany jest bez żadnych opóźnień [2]-[4]. Umożliwia to uproszczenie syntezy układu regulacji i zapewnia poprawną pracę w szerokim zakresie dynamiki narostu prędkości. Jednakże w przypadku założenia bardzo dużej dynamiki wymuszania prędkości takie uproszczenie może

prowadzić do powstania oscylacji zmiennych stanu układu napędowego [5].

W niniejszym referacie przeprowadzono analizę układu dwumasowego z regulatorem stanu w obwodzie sterowania prędkością. W procesie projektowania uwzględniono opóźnienie wnoszone przez obwód kształtowania momentu elektromagnetycznego. Opracowano zależności analityczne umożliwiające dobór parametrów układu regulacji. Przedstawiono badania symulacyjne oraz eksperymentalne prezentujące właściwości układu przy różnych wartościach opóźnienia obwodu kształtowania momentu.

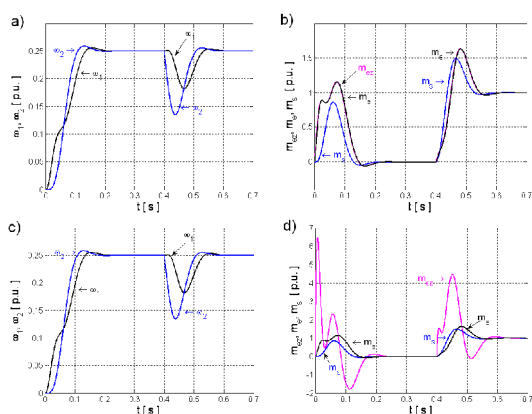
2. Model matematyczny obiektu badań oraz układu sterowania

Rozważany układ napędowy składa się z silnika napędowego połączonego przez długi sprężysty wał z maszyną obciążającą. W adekwatnym modelu matematycznym silnik elektryczny oraz maszyna obciążająca reprezentowane są przez dwie skupione masy. Moment bezwładności wału łączącego jest dodany po połowie do momentu bezwładności maszyny napędzającej i obciążającej. Wał napędowy charakteryzuje się określonym współczynnikiem sprężystości. Wykorzystywany w pracy model z bezinercyjnym połączeniem sprężystym opisany jest równaniami (1-3) [3]:

Przedstawiona metoda umożliwia dowolne rozmieszczenie biegunów układu zamkniętego, a w efekcie kształtowanie właściwości dynamicznych układu dwumasowego w szerokim zakresie.

3. Wyniki badań symulacyjnych

W niniejszym punkcie pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych układu dwumasowego z regulatorem stanu (rys. 1). Przyjęte zostały następujące wartości stałych czasowych napędu: $T_1 = T_2 = 203$ ms oraz $T_c = 2,6$ ms. Jako pierwszy analizowano wpływ stałej czasowej obwodu regulacji momentu elektromagnetycznego na kształtowanie przebiegów układu napędowego. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi zmiennych stanu układu napędowego dla parametrów projektowych $\omega_r = 60$ s⁻¹ i $\xi_r = 0,7$ oraz wartości opóźnienia pętli kształtowania momentu $T_p = 1$ ms (a, b) i $T_p = 100$ ms (c, d).



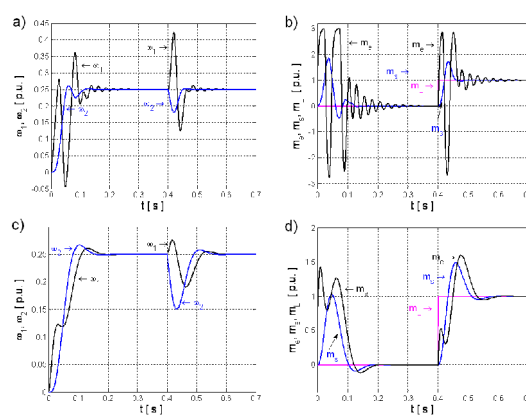
Rys. 2. Przebiegi prędkości silnika i obciążenia (a, c) oraz sygnału sterującego, momentu elektromagnetycznego i momentu skrętnego (b, d) w strukturze sterowania z regulatorem stanu dla $T_p = 1$ ms (a, b) i $T_p = 100$ ms (c, d)

Wartość stałej czasowej pętli regulacji momentu elektromagnetycznego nie wpływa negatywnie na przebiegi zmiennych stanu układu dwumasowego. Opóźnienie kompensowane jest wymuszaniem większej wartości zadanego momentu elektromagnetycznego m_{er} . Dla małej wartości stałej czasowej przebiegi sygnałów: zadającego oraz rzeczywistego są zbliżone. W przypadku drugim ze względu na bardzo dużą wartość stałej czasowej T_p jest on kilkakrotnie większy od momentu elektromagnetycznego.

Kolejno zbadano wpływ pominięcia w procesie projektowania pętli wymuszania m_e na przebiegi zmiennych stanu układu napędowego. Do rozważań wybrano strukturę zaprojektowaną

z pominięciem opóźnienia T_p . Na rysunku 3 pokazano przebiegi zmiennych stanu układu dla zadanej wartości współczynnika tłumienia $\xi_r = 0,7$ oraz wartości pulsacji rezonansowej $\omega_r = 120$ s⁻¹ (a, b) oraz $\omega_r = 60$ s⁻¹ (c, d).

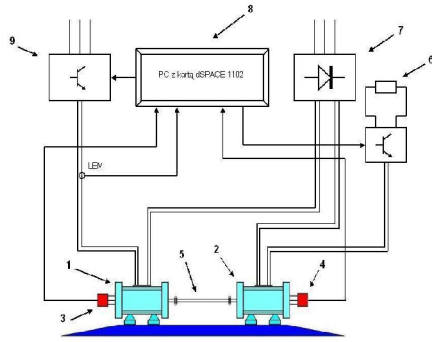
Jak wynika z analizy przebiegów pokazanych na rysunku 3 struktura sterowania pracuje poprawnie dla relatywnie małych wartości pulsacji rezonansowej ω_r (c, d). Zwiększenie jej wartości powoduje powstanie zauważalnych oscylacji we wszystkich zmiennych stanu układu dwumasowego (a, b). Wpływ ten zwiększa się wraz ze wzrostem opóźnienia pętli wymuszenia momentu elektromagnetycznego.



Rys. 3. Przebiegi prędkości silnika i obciążenia (a, c) oraz momentów: elektromagnetycznego, skrętnego oraz obciążenia (b, d) w strukturze sterowania z regulatorem stanu dla $\xi_r = 0,7$, $\omega_r = 120$ s⁻¹ (a, b) i 60 s⁻¹ (c, d)

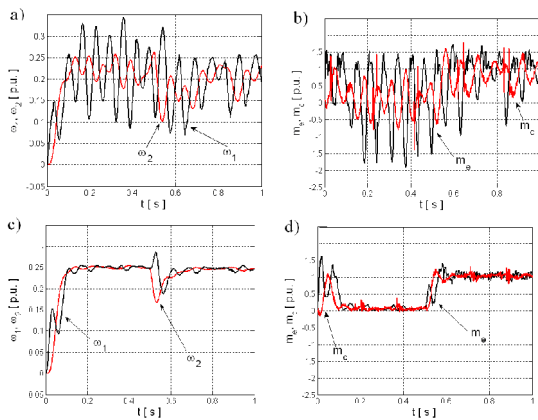
4. Wyniki wybranych badań na obiekcie rzeczywistym

W celu weryfikacji rozważań teoretycznych i badań symulacyjnych przeprowadzono weryfikację eksperymentalną rozważanych w pracy struktur sterowania. Na rysunku 4 przedstawiono schemat ideowy stanowiska laboratoryjnego. Część mechaniczną stanowiska stanowią dwa silniki prądu stałego połączone stalowym prętem o długości 600mm. Sztywność połączenia jest uzależniona od średnicy zastosowanego pręta. Na wale silnika napędowego oraz obciążającego zamontowane zostały przetworniki obrotowo-impulsowe, realizujące pomiary prędkości w układzie (z dokładnością 36000 impulsów na obrót). Stanowisko laboratoryjne jest wyposażone w czujniki hallotronowe służące do pomiaru prądów w układzie. Dane pomiarowe oraz sygnały sterujące są przesyłane poprzez panel operatorski, na którym wyprowadzone są wejścia/wyjścia cyfrowe i analogowe karty z procesorem sygnałowym. Mechanizm



Rys. 4. Schemat stanowiska laboratoryjnego, 1 - silnik, 2 - maszyna obciążająca, 3,4 - enkodery, 5 - wał łączący, 6 - rezystor hamujący, 7 - prostownik diodowy, 8 - układ sterujący, 9 - przetwornik tranzystorowy

jest zasilany za pomocą mostka tranzystorowego. Kształtowanie przebiegu obciążenia jest realizowane poprzez układ sterowania. Wykorzystywane w strukturze regulacji dodatkowe sprzężenia zwrotne pochodzące od momentu skrętnego oraz prędkości obciążenia w rzeczywistych warunkach są trudnodostępne. W związku z powyższym w procesorze sygnałowym zaimplementowano filtr Kalmana opisanego w [3].



Rys. 5. Przebiegi prędkości silnika i obciążenia (a, c) oraz momentu elektromagnetycznego i momentu skrętnego (b, d) w strukturze sterowania z regulatorem stanu dla $T_p = 8 \text{ ms}$, $\xi_r = 0.7$, $\omega_r = 80 \text{ s}^{-1}$

Na rysunku 5 przedstawiono uzyskane przebiegi dla układu napędowego o znaczącej zadanej wartości pulsacji rezonansowej, w przypadku uwzględnienia oraz pominięcia opóźnienia obrotu kształtowania momentu w etapie projektowania parametrów układu. Układ napędowy, w którym w trakcie doboru parametrów pominięto wartości opóźnień posiada znaczne oscylacje w przebiegach momentów: skrętnego oraz elektromagnetycznego, a także prędkości maszyny napędowej oraz obciążającej. Zaprojektowanie nastaw regulatora stanu zgodnie

z przedstawionymi zależnościami spowodował znaczną redukcję oscylacji elektromagnetycznych zmiennych stanu. Widoczne niewielkie oscylacje wynikają z niepewności parametrycznej modelu obiektu.

6. Podsumowanie

W układzie napędowym o dużej wartości opóźnienia pętli wymuszania momentu elektromagnetycznego lub/i dużej wartości zadanej pulsacji rezonansowej zastosowanie klasycznej struktury sterowania [1] może prowadzić do powstania elektromechanicznych oscylacji zmiennych stanu. W skrajnych przypadkach możliwa jest utrata stabilności całej struktury sterowania. W takim przypadku w procesie projektowania struktury sterowania należy uwzględnić inercję wnoszoną przez pętle regulacji momentu. Jej uwzględnienie powoduje poprawę właściwości dynamicznych układu sterowania i umożliwia efektywne tłumienie drgań skrętnych. Zastosowanie zmodyfikowanej struktury sterowania umożliwia uzyskanie krótszych czasów narostu układu dwumasowego. Założenie dużej wartości pulsacji rezonansowej jest ograniczone przez dokładność identyfikacji parametrów obiektu jak również ograniczenia fizyczne występujące w układzie napędowym (ograniczenie maksymalnej wartości prądów i napięć).

7. Literatura

- [1] Gierlotka K.: *Układy sterowania napędów elektrycznych z elementami sprężystymi*, Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej, Nr 1181, Gliwice, 1992
- [2] Hori Y., Sawada H., Chun Y.: *Slow Resonance Ratio Control for Vibration Suppression and Disturbance Rejection in Torsional System*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 46, no. 1, pp. 162-168, 1999
- [3] Szabat K.: *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*. Prace Naukowe IMNiPE PWr., Wrocław 2008, ser.: Monografie nr 19, nr 61
- [4] Orłowska-Kowalska T., Szabat K.: *Vibration Suppression in Two-Mass Drive System using PI Speed Controller and Additional Feedbacks – Comparative Study*, Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no. 2, 2007, pp. 1193-1206
- [5] Brock S., Deskur J., Janiszewski D., Muszyński R.: *Active Damping of Torsional Vibrations in Servodrives*. Power electronics and electrical drives. Selected problems. Ed. by Teresa Orłowska-Kowalska, Oficyna Wyd. PWr., Wrocław, pp. 278-297, 2007