

Janusz HETMAŃCZYK

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

BADANIA SYMULACYJNE WŁAŚCIWOŚCI STRUKTUR STEROWANIA POJAZDU ELEKTRYCZNEGO MAŁEJ MOCY

Streszczenie. W pracy przedstawiono porównanie struktur z zadawaniem momentu (prądu) i prędkości przeznaczonych do sterowania napędem dwusilnikowym pojazdu elektrycznego małej mocy. Sterowanie pojazdem odbywa się poprzez zmianę relacji pomiędzy prędkościami obrotowymi kół. W artykule omówiono budowę, sposób działania oraz różnice poszczególnych struktur układu sterowania. Jako wyniki badań symulacyjnych przedstawiono przebiegi prędkości i momentów silników napędu oraz trajektorie ruchu pojazdu, które to przebiegi posłużyły do oceny właściwości badanych struktur. Badania i ocenę struktur sterowania wykonano w programie MATLAB-SIMULINK.

THE LOW POWER ELECTRIC VEHICLE CONTROL STRUCTURES PROPERTIES SIMULATION RESEARCH

Summary. In the paper author compares control structures with current (torque) and velocity set input system, which are meant for control of low power electric vehicle. For this construction the control function is result of both wheels rotational speed relation. The author describes the control systems, methods of operation and differences between the presented control structures. The simulation results in form of the vehicle trajectories as well as the motor velocity and torque waveforms obtained for analyzed control structures are presented. The waveforms were used to compare and evaluate properties of presented structures. The research was realized with MATLAB-SIMULINK software.

1. WPROWADZENIE

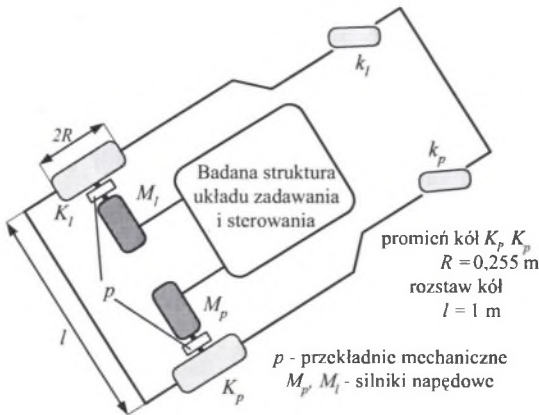
Obiektem badań symulacyjnych są struktury sterowania pojazdów elektrycznych małej mocy sterowanych różnicą prędkości kół napędowych. Konstrukcja takich pojazdów różni się od klasycznej konstrukcji pojazdu np. spalinowego sposobem sterowania i zadawania wielkości wejściowej pojazdu. W rozwiązaniu klasycznym kierowca za pomocą kierownicy, pedałów, dźwigni i przycisków steruje jazdą samochodu [10]. W pojeździe o konstrukcji z rys. 1, układ nie ma kierownicy, a napęd stanowią dwa silniki M_p i M_l (najczęściej prądu stałego), które napędzają koła K_p i K_l poprzez przekładnie mechaniczne p . Koła te nie zmieniają położenia względem ramy. Pozostałe dwa koła k_p i k_l są przymocowane mimośrodowo, tzn. obracają się

swobodnie wokół własnej osi i nie biorą udziału w sterowaniu. Sterowanie tego typu pojazdów odbywa się poprzez zmianę relacji pomiędzy prędkościami obrotowymi kół. Pojazdy te często nazywa się pojazdami o sterowaniu różnicowym (z ang. *Differential steering system*) [6, 7].

Celem pracy jest określenie właściwości badanych struktur pod kątem wykorzystania ich do sterowania robotów mobilnych, wózków inwalidzkich czy prostych pojazdów transportowych. W pojazdach tych, ze względu na sposób sterowania, jak i przeznaczenie, często stosuje się struktury sterowania z zadawaniem prędkości pojazdu, jednocześnie ograniczając udział operatora (człowieka) jako nadrzędnego układu regulacyjnego. Motywacją podjęcia tego tematu z zakresu sterowania pojazdami elektrycznymi jest potrzeba opracowania struktury sterowania, której sposób sterowania będzie odzwierciedlał sterowanie samochodu. Przedstawiony w pracy materiał stanowi własne przemyślenia autora [5].

2. STRUKTURY STEROWANIA POJAZDU ELEKTRYCZNEGO

Zdolność manewrowa, jak i ruchowa pojazdu elektrycznego, w którym sterowanie odbywa się przez zmianę relacji prędkości obrotowych kół napędzających, zależą zarówno od konstrukcji pojazdu, sposobu sterowania, jak i od struktury układu regulacji. W pojazdach tych prędkości silników napędzających muszą być synchronizowane w szerokim zakresie pracy, ewentualnie ich prędkości muszą być ze sobą powiązane. W pracy przyjęto, że na wejście układu zadawania sterowaniem pojazdu, rys. 1, podawane są dwa sygnały. Pierwszy z nich, odpowiadający za jazdę na wprost, jest proporcjonalny do zadanej prędkości V_{zad} lub zadanego prądu I_{zad} pojazdu. Natomiast drugi, odpowiadający za skręcanie, jest proporcjonalny do różnicy prędkości V_{Rsk} . W rzeczywistości układ zadawania w tego typu pojazdach, to najczęściej dźwąż sterowniczy, klawiatura numeryczna, a w szczególnym przypadku pojazd może być również sterowany głosem operatora.



Rys. 1. Konstrukcja pojazdu elektrycznego
Fig. 1. The construction of the electric vehicle

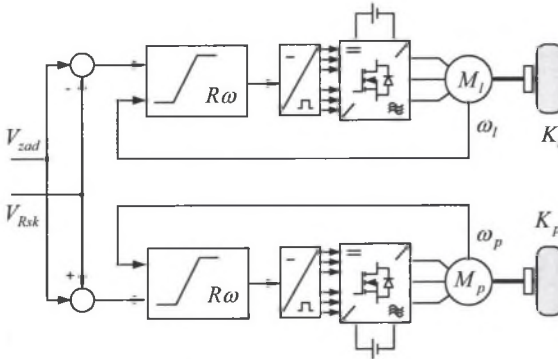
Układ sterowania wraz z układem zadawania pojazdu elektrycznego powinien umożliwiać:

- wybór kierunku jazdy;
- wybór silnika wiodącego, względem którego sterowany jest drugi silnik;
- pracę współbieżną, gdy prędkości silników napędzających są równe (jazda wprost);
- pracę zależną, gdzie różnica prędkości silników będzie stała i narzucona przez układ sterowania (skręcanie).

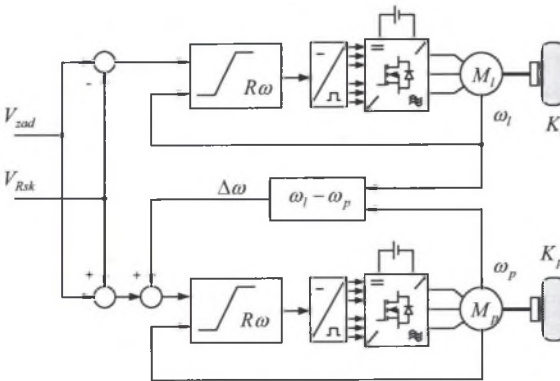
Struktury sterowania pojazdu dwusilnikowego możemy podzielić ze względu na rodzaj wielkości wejściowej oraz ze względu na sposób powiązania wielkości sterujących pracą napędu dwusilnikowego poprzez układy sprzężeń. Wybór jednej z wielu konfiguracji będzie determinował właściwości układu sterowania.

2.1. Struktury sterowania z zadaniem prędkości pojazdu

Najprostszym układem sterowania pojazdu jest struktura, w której każdy z silników jest objęty własną pętlą sprzężenia zwrotnego i pracuje niezależnie od drugiego (rys. 2). Zatem można powiedzieć, że są to dwa niezależne napędy o wspólnym układzie zadawania. Z punktu widzenia całego napędu dwusilnikowego układ taki jest układem otwartym. Brak sprzężeń pomiędzy silnikami uniemożliwia powiązanie ze sobą prędkości lub prądów (momentów) poszczególnych silników [2].



Rys. 2. Struktura napędu w układzie otwartym
Fig. 2. The open structure of the two-motor drive control system

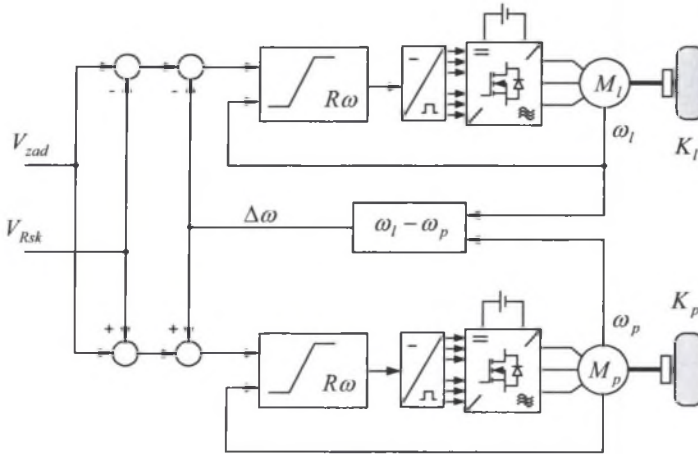


Rys. 3. Struktura napędu master-slave (z silnikiem wiodącym i podporządkowanym)
Fig. 3. The master-slave structure of the two-motor drive control system

Poprawę właściwości układu można uzyskać przez zastosowanie dodatkowych sprzężeń zwrotnych. Jednym z rozwiązań, w którym występuje dodatkowe sprzężenie, jest struktura master-slave (rys. 3).

W strukturze tej pomiędzy silnikiem wiodącym M_1 (nadrzędnym) i podporządkowanym M_p (podrzędnym), oprócz wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego występuje zewnętrzne sprzężenie zwrotne. Zadaniem tego sprzężenia jest uzależnienie od siebie zmian wielkości wyjściowych silników. Wielkość regulowana silnika podporządkowanego M_p jest bezpośrednio powiązana z wielkością regulowaną silnika wiodącego M_1 . Każda zmiana wielkości regulowanej silnika wiodącego powoduje zmianę wielkości regulowanej silnika podporządkowanego. Jeśli jednak zakłócenie momentu obciążenia wystąpi na silniku podporządkowanym M_p , układ regulacji ma możliwość korekty sygnału zadawanego silnikowi, na którym wystąpiło zakłócenie, lecz przy braku reakcji silnika wiodącego.

Istnienie dodatkowego sprzężenia zmniejsza wrażliwość pojazdu na zakłócenia, jeśli wystąpiło tylko i wyłącznie na silniku podporządkowanym. W przypadku wystąpienia zakłócenia na silniku wiodącym silnik ten zachowuje się tak, jakby pracował w otwartej strukturze sterowania. Natomiast silnik podporządkowany zawsze dopasowuje się do silnika wiodącego.



Rys. 4. Struktura krzyżowa napędu dwusilnikowego
 Fig. 4. The cross structure of the two-motor drive control system

Pełną korektę zakłóceń zapewnia struktura krzyżowa (rys. 4). W napędzie takim wielkości regulowane silników M_l i M_p są powiązane poprzez sygnał różnicy $\Delta\omega$. Rozwiązanie to komplikuje układ sterowania napędu dwusilnikowego, lecz dzięki temu uzyskuje się pełną korektę zakłóceń, jakie mogą oddziaływać na tor jazdy pojazdu elektrycznego. W przypadku zmiany wielkości regulowanej jednego silnika, na przykład z powodu zmiany momentu obciążenia, sygnał różnicy $\Delta\omega$ przyjmie wartość dodatnią dla $\omega_l > \omega_p$, a ujemną dla relacji prędkości $\omega_l < \omega_p$. W efekcie, gdy $\omega_l > \omega_p$, wartość regulowana silnika lewego maleje, a prawego rośnie do chwili zrównania się wielkości regulowanych obu silników. Analogicznie, gdy $\omega_l < \omega_p$, wartość regulowana silnika lewego rośnie, a prawego maleje.

Krzyżowa struktura sterowania pozwala korygować tor jazdy pojazdu niezależnie, czy zakłócenie wystąpiło na lewym, czy prawym kole. Jest to duża zaleta tej struktury w stosunku do napędu z silnikiem wiodącym i podporządkowanym [6, 9].

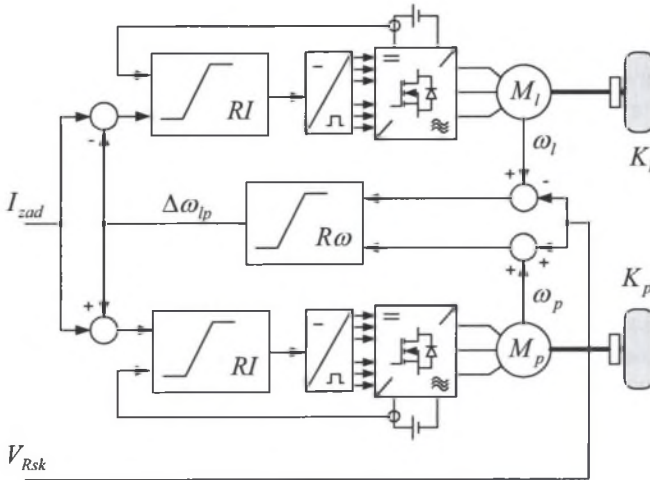
2.2. Struktury sterowania z zadawaniem prądu (momentu) pojazdu

W większości pojazdów naturalnym sposobem sterowania jest zadawanie momentu. Rozwiązanie takie stosuje się nie tylko w pojazdach elektrycznych, ale również powszechnie w samochodach spalinowych. Warunkiem sterowania pojazdu o konstrukcji z rysunku 1 jest możliwość zmiany wzajemnej relacji prędkości silników napędu pojazdu. Warunek ten spełniają wszystkie przedstawione powyżej struktury dzięki sprzężeniu od prędkości.

W strukturach z zadawaniem prądu prędkość pojazdu jest zależna od momentu obciążenia i wypadkowego momentu napędowego. Dlatego ze względu na sposób sterowania pojazdu struktury te muszą dodatkowo zapewnić kontrolę prędkości. W praktyce można to uzyskać przez odpowiednią budowę układu sterowania lub przez zastosowanie dodatkowego sprzężenia zwrotnego.

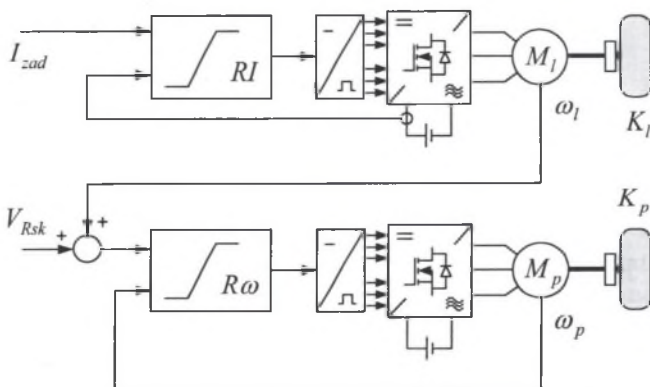
Na rysunku 5 przedstawiono zmodyfikowaną strukturę sterowania pojazdu z zadawaniem momentu lub siły ciągu pojazdu. Struktura ta jest zmodyfikowaną strukturą sterowania silników z szeregowym połączeniem regulatorów prądu i prędkości. Jednak w strukturze z rysunku 5 układ napędowy pojazdu pracuje z regulacją prądu lub prędkości. Gdy prędkości silników są równe, sygnał proporcjonalny do różnicy prędkości $\Delta\omega_p$ jest równy zeru. Zmiana

prędkości kół pojazdu powoduje zmianę rodzaju wielkości regulowanej z prądu na prędkość, z jednoczesną zmianą właściwości struktury sterowania. Po ustaniu zakłócenia struktura ponownie zmienia swoje własności i pracuje jako układ z zadawaniem prądu. Podczas dowolnego manewru zmiany toru jazdy regulator prędkości zapewnia pożądaną różnicę prędkości silników, a tym samym płynną jazdę podczas skręcania.



Rys. 5. Struktura zmodyfikowana napędu dwusilnikowego
Fig. 5. The modified structure of the two-motor drive control system

Inną strukturą (rys. 6) nawiązującą do budowy struktury master-slave jest struktura mieszana. W strukturze tej wielkością zadawaną silnika wiodącego M_l jest prąd (moment), natomiast silnik podporządkowany M_p pracuje w układzie z regulacją prędkości i jest sterowany prędkością silnika wiodącego. Skręcanie pojazdu w tej strukturze jest realizowane przez dodanie sygnału V_{Rsk} do sygnału ω_l - proporcjonalnego do prędkości aktualnej silnika wiodącego M_l , co spowoduje zmianę relacji prędkości silników i skręt pojazdu. W stanie jazdy na wprost sygnał V_{Rsk} jest równy zeru.



Rys. 6. Mieszana struktura sterowania napędem dwusilnikowym
Fig. 6. The mixed structure of the two-motor drive control system

3. BADANIA SYMULACYJNE

W celu zweryfikowania właściwości opisywanych struktur sterowania wykonano pełny model dwusilnikowego pojazdu elektrycznego uwzględniający napęd oraz badaną strukturę. Do budowy tego modelu wykorzystano rzeczywiste parametry i wymiary pojazdu z rys. 1 (rozstaw kół 1 m, promień kół napędowych 0,255 m), który został wykonany na potrzeby badań laboratoryjnych. Ponieważ założono, że prędkości jazdy pojazdu nie będzie przekraczała 10 m/s, w modelu pominięto dynamikę, a uwzględniono jedynie kinematykę ruchu. Równanie opisujące kinematykę pojazdu o konstrukcji z rys 1 i innych pojazdów o nietypowej konstrukcji została przedstawiona w pozycji [3].

Napęd pojazdu wykonanego na potrzeby weryfikacji laboratoryjnej tworzą dwa silniki bezszczotkowe prądu stałego typu RTMct85-85-1 o mocy znamionowej $P_n = 300$ W i napięciu zasilania $U_n = 24$ V. Dlatego w modelu komputerowym pojazdu również wykorzystano model bezszczotkowego silnika. Równania opisujące obwodowy model silnika z magnesami trwałymi zostały przedstawione w pozycjach literaturowych [4, 11]. Nastawy regulatorów, struktur sterowania zostały dobrane na podstawie kryteriów modułu i symetrii Keslera. W celu porównania uzyskanych wyników dla obu regulatorów przyjęto takie same nastawy [1, 7, 8]. Badania symulacyjne wykonano w programie Matlab-Simulink

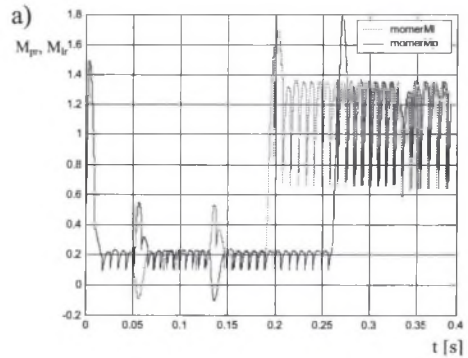
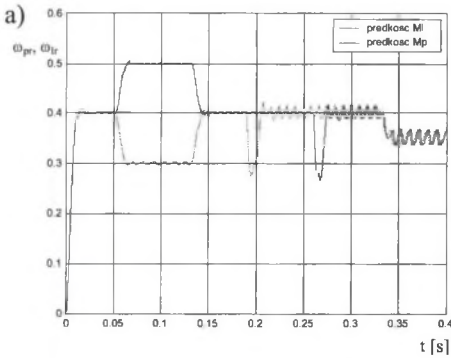
Jako kryterium określające właściwości badanych struktur sterowania przyjęto porównanie charakterystycznych przebiegów (prędkości i momentu) silników napędzających pojazd oraz trajektorii jazdy pojazdu na płaszczyźnie XY. Porównanie tych przebiegów pozwoli ocenić ilościowo i jakościowo sposób sterowania pojazdu oraz określić wpływ dodatkowych sprzężeń zwrotnych na jakość sterowania. W tym celu wszystkie badane struktury poddano działaniu skokowo zmieniających się wielkości sterujących (V_{Rsk} , V_{zad} lub I_{zad}) i wielkości zakłócających (M_{oL} , M_{oP}) pracę napędu (rys. 7). Tak zadawane wielkości sterujące pozwoliły sprawdzić działanie operatora do skokowo zmieniającej się wielkości sterującej. Podejście takie uzasadnia fakt, że kierowca pełni rolę układu zadajnika i w zależności od szczegółów konstrukcyjnych danej struktury zadaje różnicę prędkości obrotowych kół oraz siłę pociągową pojazdu lub jego prędkość.



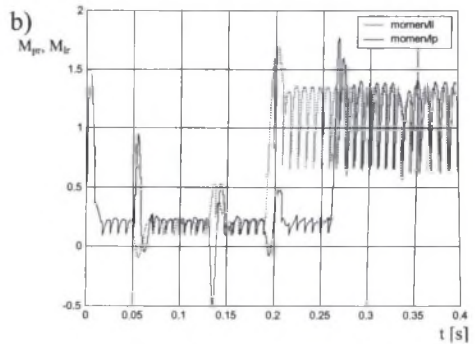
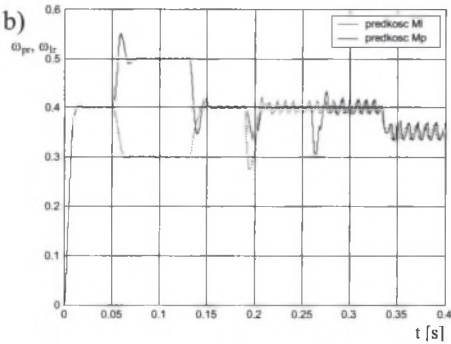
Rys. 7. Sekwencja sygnałów testowych
Fig. 7. Sequence of control signals

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przebiegi prędkości i momentu silników dla struktur otwartej, master-slave oraz krzyżowej. Analizując poniższe przebiegi można zauważyć, że w przypadku struktury otwartej zakłócenie na jednym z kół jest niezauważalne dla drugiego koła. Natomiast występuje duża zmiana prędkości liniowej oraz przyspieszenia, co powoduje powstawanie charakterystycznych szarpnięć. Dodatkowo, w trakcie jazdy pojazdu taka sytuacja powoduje samoczynną zmianę toru jazdy. Istnienie dodatkowego sprzężenia zwrotnego zmniejsza wrażliwość pojazdu na zakłócenia. W strukturze master-slave, jeśli zakłócenie wystąpiło na silniku podporządkowanym, to widoczny jest charakterystyczny przysiad prędkości dla obu silników (rys. 8b). Natomiast w przypadku wystąpienia zakłócenia na silniku wiodącym, silnik ten zachowuje się tak, jakby pracował w otwartej strukturze sterowania. W strukturze krzyżowej charakterystyczny przysiad prędkości jest zawsze widoczny (rys. 8c), niezależnie na którym kole wystąpiło zakłócenie.

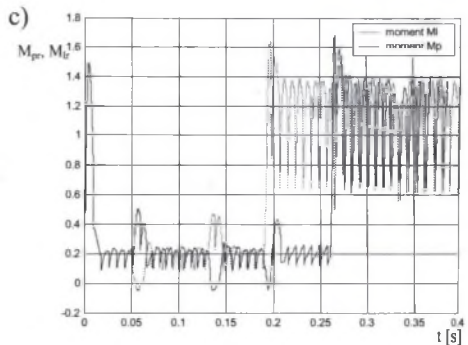
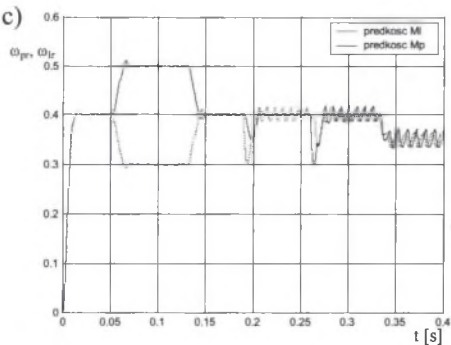
STRUKTURA „OTWARTA”



STRUKTURA „MASTER-SLAVE”



STRUKTURA „KRZYŻOWA”



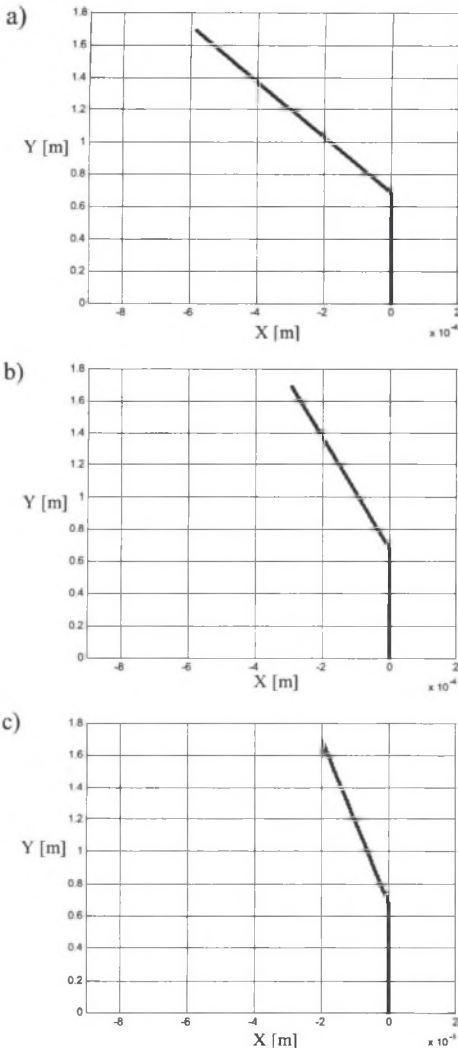
Rys. 8. Przebiegi prędkości silników dla struktury: a) otwartej; b) master-slave; c) krzyżowej

Fig. 8. The motors velocity waveforms obtained for: a) the open; b) master-slave; c) cross control system structures

Rys. 9. Przebiegi momentu elektromagnetycznego dla struktury: a) otwartej; b) master-slave; c) krzyżowej

Fig. 9. The motors torque waveforms obtained for: a) the open; b) master-slave; c) cross control system structures

Na rysunkach poniżej przedstawiono trajektorie jazdy pojazdu dla struktur z zadawaniem prędkości. Na wykresach tych widoczny jest udział dodatkowego sprzężenia zwrotnego w strukturach master-slave (rys. 10b) i krzyżowej (rys. 10c), w stosunku do otwartej struktury sterowania (rys. 10a). Z wykresów tych wynika, że zakłócenie pracy pojazdu (wzrost momentu obciążenia, co równoważne jest z chwilowym przyhamowaniem jednego koła, np. wjazd jed-



Rys. 10. Trajektorie jazdy pojazdu dla struktury: a) otwartej; b) master-slave c) krzyżowej

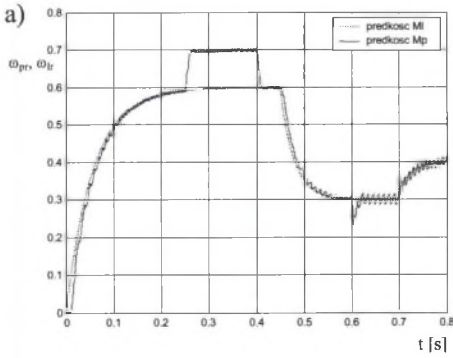
Fig. 10. The trajectories obtained for: a) open; b) master-slave; c) cross control structure simulations

nym kołem na inną nawierzchnię) powoduje natychmiastowy skręt pojazdu i zmianę tory jazdy. Struktura krzyżowa zapewnia najmniejszy skręt pojazdu w stosunku do pozostałych struktur z zadawaniem prędkości.

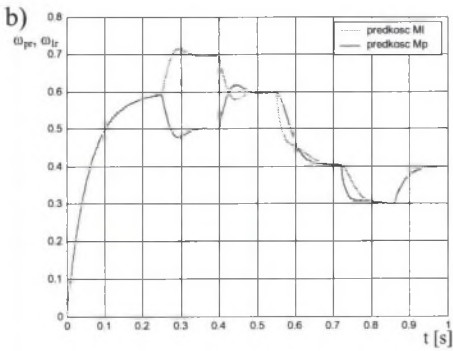
W strukturach sterowania z zadawaniem prądu widoczna jest zmiana charakteru zarejestrowanych przebiegów zarówno prędkości, jak i momentu (rys. 11 i 12). W strukturze mieszanej na przebiegu (rys. 11a) widoczne jest opóźnienie silnika podrzędnego M_p w stosunku do silnika nadrzędnego M_f w chwili startu pojazdu. Powoduje to skręcanie pojazdu w początkowej fazie jazdy, co jest szczególnie widoczne na wykresie trajektorii ruchu pojazdu rys. 13a. Widoczna jest również zmiana sposobu skręcania pojazdu rys. 11a. Wykorzystanie tej struktury spowoduje skręt pojazdu na promieniu równym rozstawie kół pojazdu, gdy pozostałe struktury realizują skręt na połowie promienia. Skręt na połowie promienia jest szczególnie przydatny, gdy pojazd ma skręcić w miejscu, ponieważ potrzebuje mniej miejsca na zakręt. Zatem zdolności manewrowe takiego pojazdu są większe.

W strukturach z zadawaniem prądu (momentu) skokowy wzrost wielkości zakłócającej powoduje zmniejszenie prędkości silnika, co jest jednocześnie dużą zaletą badanych struktur. W strukturach tych zatem nie występują tak duże zmiany przyspieszenia, które niekorzystnie wpływają na komfort jazdy. Szczególnie interesująca wydaje się struktura zmodyfikowana (rys. 5), która dzięki płynnej zmianie rodzaju charakteru sterowania dopasowuje się do warunków jazdy. Jednak patrząc na wykresy trajektorii ruchu (rys. 13a i b) można zauważyć, że struktury te są szczególnie wrażliwe na zakłócenia. Wymagają one ciągłego udziału operatora w sterowaniu pojazdem.

STRUKTURA „MIESZANA”

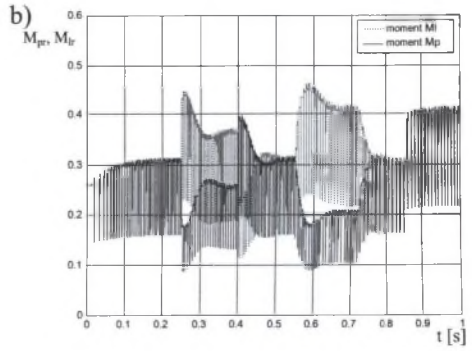
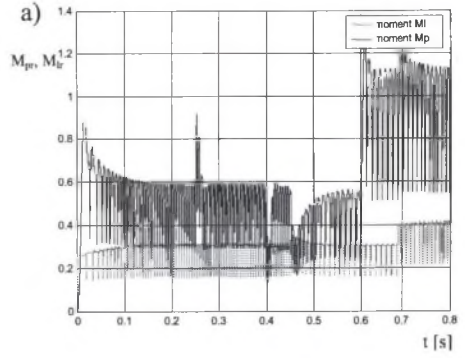


STRUKTURA „ZMODYFIKOWANA”



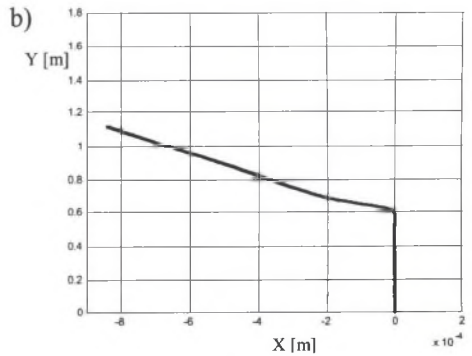
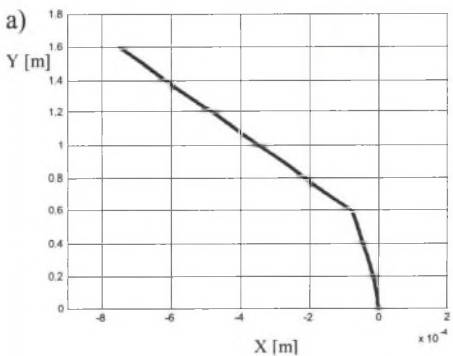
Rys. 11. Przebiegi prędkości silników dla: a) mieszanej; b) zmodyfikowanej struktury

Fig. 11. The motors velocity waveforms obtained for: a) mixed; b) modified control system structures



Rys. 12. Przebiegi momentu elektromagnetycznego dla struktury a) mieszanej; b) zmodyfikowanej

Fig. 12. The motors torque waveforms obtained for: a) mixed; b) modified control system structures



Rys. 13. Trajektorie jazdy pojazdu dla struktury: a) mieszanej; oraz b) zmodyfikowanej

Fig. 13. The trajectories obtained for: a) mixed; b) modified structure of the control system

4. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane w pracy struktury są przeznaczone do sterowania napędem pojazdu elektrycznego małej mocy sterowanego różnicą prędkości.

Badane struktury sterowania podzielono na struktury z zadawaniem prędkości i prądu. Struktury z zadawaniem prędkości (punkt 2.1) charakteryzują się małą wrażliwością na wielkości zakłócające (o czym świadczą wykresy trajektorii ruchu). Wadą ich są duże zmiany przyspieszenia podczas wykonywania manewrów oraz w stanach przejściowych. Drugą grupę struktur (punkt 2.2) stanowią układy z zadawaniem prądu (momentu). Struktury te pozwalają w pełni kontrolować dynamikę pojazdu, jednak ten sposób zadawania wielkości wejściowej wymaga ciągłej kontroli kierunku jazdy. Dodatkowo ich zaletą jest to, że zadawanie prądu (momentu) jest naturalnym sposobem sterowania pojazdów.

Każda z analizowanych struktur spełnia wszystkie postawione wymagania, jakie powinna spełniać struktura przeznaczona do sterowania pojazdami elektrycznymi. Jednak wybór konkretnej struktury do sterowania pojazdu będzie zależał od wymagań dodatkowych, np.: od rodzaju ładunku, własności ruchowych lub przeznaczenia pojazdu.

LITERATURA

1. Bisztyga K.: *Sterowanie i regulacja silników elektrycznych*. WNT, Warszawa 1989.
2. Frenchowicz A.: *Układ regulacji prędkości wózka inwalidzkiego*. XIII Międzynarodowe Sympozjum Mikromaszyn i Serwonapedów MIS'02, Łódź 2002.
3. Giergiel M., J., Hendziel Z., Żylski W.: *Modelowanie i sterowanie mobilnych robotów kołowych*. PWN, Warszawa 2002.
4. Hendershot J.R., Miller T.J.E.: *Design of brushless permanent-magnet motors*. Magna Physics Publishing and Calderon Press, Oxford 1994.
5. Hetmańczyk J., Łoskot P., Krykowski K.: *Struktury sterowania pojazdu elektrycznego małej mocy*. 10 Sympozjum PPEE'2003, Wisła, 7-10 grudzień 2003.
6. Jones J.L., Flynn A.M., Seiger B.A.: *Mobile Robots. Inspiration to Implementation*. A K Peters, USA 1999.
7. Kaczmarek T.: *Napęd elektryczny robotów*. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 1997.
8. Krishnan R.: *Electric motor drives modeling, analysis and control*. Prentice Hall 2001.
9. *Podstawy robotyki*. Praca zbiorowa pod red. A. Moreckiego i J. Knapczyka. WNT, Warszawa 1996.
10. Siłka W.: *Teoria ruchu pojazdu*. WNT, Warszawa 2002.
11. Vries T.J.A., Heteren C., Huttenhuis L.: *Modeling and control of a fast moving, highly maneuverable wheelchair*. International Biomechatronics workshop. 19-21 kwiecień 1999, Enschede, Holandia.

Recenzent: Dr hab. inż. Maciej Tondos, prof. AGH

Wpłynęło do Redakcji: 4 maja 2004 r.