

Mirosław LEWANDOWSKI

MINIMALIZACJA CZASU TRWANIA PRZEBIEGÓW OSCYLACYJNYCH W UKŁADZIE PRZENOSZENIA MOMENTU SILNIK-KOŁA NAPĘDOWE POJAZDU TRAKCYJNEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono model matematyczny układu mechanicznego przenoszenia momentu oraz strukturę regulatora minimalizującego czas trwania przebiegów oscylacyjnych.

MINIMIZATION OF OSCILLATORY TRANSIENT RESPONSE DURATION OF DRIVING TORQUE TRANSFER IN MOTOR-WHEEL SYSTEM OF TRACTION VEHICLE

Summary. The paper presents the mathematical model of torque transfer in mechanical system and structure of controller minimizing the oscillatory transient response duration.

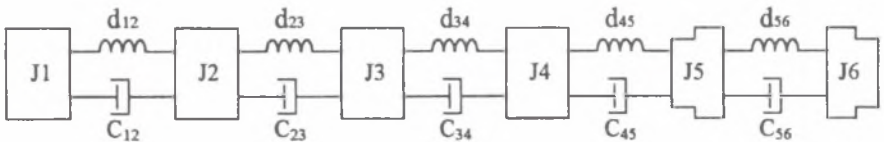
1. WSTĘP

Model zastępczy układu przełożenia momentu obrotowego wózka silnikowego ogranicza się do opisu drgań obrotowych w wałach napędowych wózka. Oscylacje momentu występujące w słabo tłumionych układach mechanicznych przenoszenia momentu silnik-koło wpływają niekorzystnie na zjawiska koło-szyna. Powoduje to szybsze zużywanie się elementów mechanicznych. Z wysoką dynamiczną kontrolą momentu i pojedynczym zasilaniem silnika możliwe jest wykorzystanie nowego sposobu sterowania opartego na regulatorze stanu, który uwzględnia mechanikę pojazdu. W nowym systemie sterowania nie zwiększa się liczby czujników pomiarowych, obserwację niemierzalnych zmiennych stanu układu mechanicznego zapewnia obserwator Luenbergera. Regulator momentu z filtrem Kalmana umożliwia redukcję czasu trwania oscylacji w układzie mechanicznym przenoszenia siły, przez to zwiększa czas zużycia elementów mechanicznych.

2. MODEL MATEMATYCZNY OBIEKTU STEROWANIA

Drgania skrętne modelu zespołu napędowego nowoczesnych pojazdów trakcyjnych można badać za pomocą łańcucha oscylatorów (rys. 1), składającego się z sześciu mas wirujących połączonych za pomocą odkształcalnych elementów sprężysto-tłumiących. Na podstawie literatury [5] przyjęto model dla lokomotywy BR120, w skład którego wchodzi:

- 1) Wiryk silnika asynchronicznego.
- 2) Przekładnia.
- 3) Elastyczne połączenie wału drążonego z przekładnią.
- 4) Elastyczne połączenie wału drążonego z kołem bezpośrednio napędzanym.
- 5) Koło bezpośrednio napędzane.
- 6) Koło napędzane pośrednio.



Rys.1. Model zespołu napędowego pojazdu trakcyjnego
Fig.1. Model of an electric traction vehicle drive system

Analizowany jest ruch obrotowy opisywanego układu. Moment bezwładności masy wirującej oznaczamy J_i ($i=1+6$), sztywność więzi sprężystej pomiędzy masą wirującą i k oznaczamy $d_{i,k}$, współczynnik tłumienia więzi tłumiącej $c_{i,k}$.

Wprowadźmy wektor stanu układu przeniesienia napędu z wału silnika na koła pojazdu o postaci

$$\mathbf{x}^T = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4 \quad \omega_5 \quad \omega_6 \quad T_{12} \quad T_{23} \quad T_{34} \quad T_{45} \quad T_{56}], \quad (1)$$

gdzie zmienne ω_i są pulsacjami prędkości obrotowej masy wirującej J_i , $T_{i,k}$ definiujemy jako momenty wewnętrzne

$$T_u = d_u (\varphi_i - \varphi_k) + c_u (\omega_i - \omega_k), \quad (2)$$

zaś φ_i są kątami obrotu.

Ze względu na stosunkowo wysoki rząd opisywanego układu przyjęto opis macierzowy w przestrzeni stanów. Równania, które opisują własności dynamiczne rozpatrywanego układu, przedstawione w przestrzeni stanów mają postać

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_u \mathbf{u} + \mathbf{G}_w \mathbf{w} \quad (3a)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (3b)$$

przy czym w równaniach przyjęto następujące oznaczenia

- \mathbf{x} - wektor stanu,
- \mathbf{u} - wektor sterowania,
- \mathbf{w} - wektor zakłóceń stanu,

- y - wektor wyjściowy,
 v - wektor zakłóceń pomiarowych,
 A - macierz stanu,
 B_w - macierz wejść sterujących,
 G_w - macierz wejść zakłóceń stanu,
 C - macierz wyjść.

Układ napędu kół pojazdu trakcyjnego, ze względów technicznych, nie jest w pełni obserwowalny. W przypadku sterowania tego rodzaju układami stosuje się obserwatory stanu obiektu. Jeżeli są znane dane statystyczne o zakłóceniach stanu i zakłóceniach pomiaru, można jako obserwator zastosować filtr Kalmana. Pozwala on na estymację stanu obiektu statystycznie optymalną.

Przy sformułowaniu kwadratowego kryterium jakości regulacji, sterowanie optymalne w obecności zakłóceń, zgodnie z zasadą separacji [2], polega na zastosowaniu optymalnego sterowania, określonego dla przypadku deterministycznego (to znaczy bez obecności zakłóceń), które wykorzystuje mierzone sygnały wyjściowe obiektu, poddane optymalnej filtracji.

Wektor u jest jednoelementowym wektorem, określającym zadany moment napędowy. Pomiarowo jest dostępny tylko jeden element wektora stanu, to znaczy zmienna $x_1 = \omega_1$, opisuje częstość pulsacji wału silnika. W związku z tym

$$C = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (4)$$

Pomiary obrotów są obciążone zakłóceniami v . Z kolei stan analizowanego układu jest zakłócany z powodu występowania zmiennych momentów hamujących w działających na oba napędzane koła pojazdu. Zakłócenia te można przedstawić jako

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{L1} \\ T_{L2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

przy czym T_{L1} jest momentem zakłócającym pierwszego koła, zaś T_{L2} jest momentem oddziałującym na drugie koło.

3. OPTYMALNY OBSERWATOR/REGULATOR

Przyjmijmy założenie, że wszystkie zakłócenia są nieskorelowane ze sobą oraz mają zerową wartość oczekiwaną. Ponadto przyjmijmy stacjonarność zakłóceń i ich „biały” charakter. Przy powyższych założeniach można zakłóceniom pomiarowym v przypisać wariancję R_q , zaś sygnałom zakłócającym stan układu można przypisać wariancję Q_{q1} , związaną z momentem T_{L1} , oraz wariancję Q_{q2} , związaną z momentem T_{L2} . Wariancje te są wartościami niezerowych elementów macierzy kowariancji R_q i Q_q , użytych do rozwiązania obserwatora. Elementy te znajdują się na przekątnych macierzy, w miejscach zgodnych z numeracją odpowiednich zmiennych. Macierz R_q ma postać

$$R_q = [R_q(1,1)] \quad (6)$$

zaś macierz Q_q , przyjmując zapis przy użyciu układu równań (2), ma postać

$$Q_q = \begin{bmatrix} Q_{q1} & 0 \\ 0 & Q_{q2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Filtr Kalmana uwzględnia równania dynamiki obiektu, estymowany stan obiektu \hat{x} , wektor wyjściowy y , wymuszenie u oraz macierze kowariancji R_q i Q_q . Równanie filtru Kalmana można przedstawić w postaci

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B_u u + L(y - C\hat{x}) = (A - LC)\hat{x} + B_u u + Ly, \quad (8a)$$

gdzie

$$L = PC^T R_q^{-1} \quad (8b)$$

przy czym P jest macierzą kowariancji błędu filtracji, macierz L powinna minimalizować kwadratowy błąd estymacji stanu obiektu \hat{x} przy danych macierzach kowariancji zakłóceń stanu Q_q i kowariancji zakłóceń pomiarowych R_q . Rozwiązanie zadania optymalnej estymacji można uzyskać kilkoma metodami [1,2]. Należy zwrócić uwagę, że estymacja dotyczy wszystkich zmiennych stanu układu, niezależnie od tego, ile zmiennych stanu jest bezpośrednio obserwowanych za pośrednictwem wektora y . Jeżeli przyjmie się nieskończony horyzont obserwacji i stacjonarność procesu, wartość macierzy L jest stała. Wyznaczenie wartości macierzy L dla danego obiektu przedstawiono w pracach [2,3].

Określenie kowariancji zakłóceń pomiarowych R_q w większości przypadków nie stanowi bardzo trudnego zagadnienia badawczego. Poza tym jest możliwość wpływu na zmianę parametrów statystycznych tych zakłóceń przez odpowiedni dobór metody pomiarowej, przyrządu pomiarowego, sposobu połączenia przyrządu z obiektem, ekranowanie doprowadzeń itp.

W przypadku kowariancji zakłóceń stanu Q_q często bezpośrednie określenie tej kowariancji jest trudne. W takich przypadkach można się oprzeć na pośrednim określeniu zakłóceń wektora stanu w_x , przeprowadzonym na podstawie pomiarów skutków oddziaływania tych zakłóceń w postaci stochastycznych zmian wektora stanu.

Sterowanie optymalne wymaga sformułowania wskaźnika jakości sterowania. Jednym z najpopularniej stosowanych wskaźników jakości sterowania jest wskaźnik kwadratowy. Wskaźnik ten musi mieć określone macierze kar za odchyłki stanu Q_r oraz kar za odchyłki sterowania R_r . Ponadto wymagane jest określenie horyzontu optymalizacji wskaźnika. W przypadku sterowania układem napędu kół pojazdu trakcyjnego, który, w odróżnieniu od np. układu szybkiego pozycjonowania, musi spełniać postawione kryteria jakości sterowania w dłuższym okresie czasu, celowe jest przyjęcie nieskończonego horyzontu regulacji. Kwadratowy wskaźnik jakości o nieskończonym horyzontie czasowym można przedstawić w postaci

$$g = \int_0^{\infty} (x^T Q_r x + u^T R_r u) dt \quad (9)$$

Jak wspomniano, dla minimalizacji wskaźnika jakości J należy sformułować kary za odchyłki stanu Q_r i kary za odchyłki sterowania od wartości średniej R_r . Jest to zagadnienie, które często wymaga początkowego określenia rzędu wartości tych kar głównie na podstawie wyników symulacji regulacji. Po określeniu rzędu wartości kar można przystąpić do indywidualnego doboru poszczególnych elementów wspomnianych macierzy, w wyniku których uzyskuje się globalne zmiany sterowania obiektem, prowadzące do zamierzonych efektów sterowania.

Uwzględniając, że rozważany wektor stanu x opisuje równość (2), zaś wektor wymuszeń u jest jednoelementowy, macierze kar mają postać

$$R_r = [R_r(1,1)] \quad (10)$$

$$Q_r = \begin{bmatrix} Q_{r1} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & Q_{r9} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & Q_{r10} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & Q_{r11} \end{bmatrix}^{(11 \times 11)} \quad (11)$$

Przyjęcie stałych wartości macierzy kar Q_r i R_r oraz nieskończonego horyzontu regulacji prowadzi do określenia macierzy sprzężenia zwrotnego K o stałych współczynnikach.

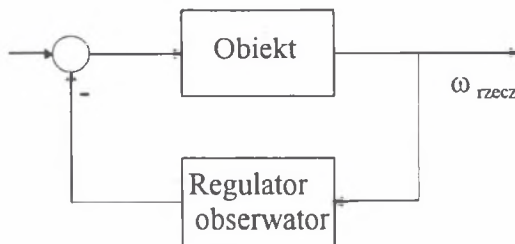
Optymalne sterowanie dla przypadku deterministycznego może być w tym przypadku opisane zależnością

$$u = Kx = -R_r^{-1} B_r^T M x \quad (12)$$

przy czym sygnałem wejściowym regulatora optymalnego jest sygnał estymacji stanu, uzyskany przez użycie filtru Kalmana jako obserwatora stanu, opisanego poprzednio. Macierz sterowania optymalnego K można obliczyć na podstawie macierzy M przez rozwiązanie równania Riccatiego [1,2] o postaci

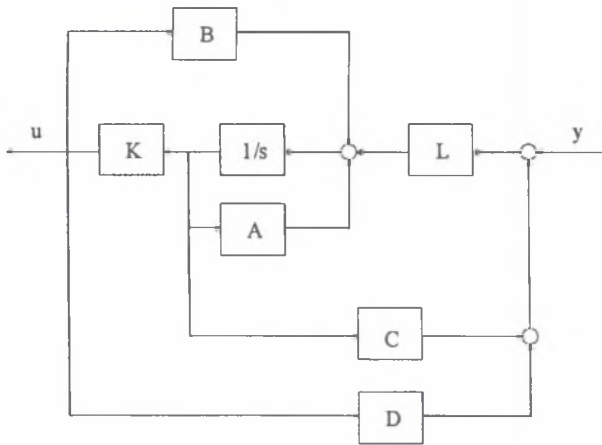
$$0 = MA + A^T M - M B_r R_r^{-1} B_r^T M + Q_r \quad (13)$$

Po obliczeniu macierzy optymalnego obserwatora L i optymalnego regulatora K można dokonać konstrukcji regulatora i przeprowadzić badania symulacyjne.



Rys. 2. Schemat analizowanego układu
Fig.2. A scheme of an analysed system

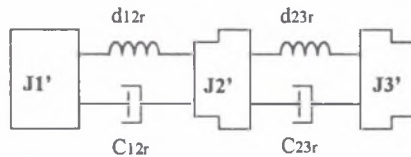
Na rysunku 2 podano schemat analizowanego układu, zaś na rysunku 3 podano schemat regulatora/obserwatora.



Rys. 3. Schemat regulatora/obserwatora
Fig. 3. A scheme of a controller/observer

4. REDUKCJA RZĘDU MODELU OBIEKTU I REGULATORA

Wartości własne dla obiektu opisanego macierzą A wskazują na występowanie trzech częstotliwości 288, 208, 204 Hz o czasie tłumienia rzędu 2 i 11 milisekund i dwóch częstotliwości 50, 21 Hz o czasie tłumienia 470 i 360 milisekund. Biorąc to pod uwagę oraz fakt, że dla układu rzeczywistego dokonujemy pomiarów tylko prędkości obrotowej wirnika silnika oraz że zakłócenia oddziałują na dwa koła, (J_5 i J_6), model układu mechanicznego możemy zredukować do postaci przedstawionej na rysunku 4, posiadający dwie częstotliwości o dużym czasie tłumienia.



Rys. 4. Zredukowany model układu napędowego
Fig. 4. A reduced model of a drive system

Dla zredukowanego obiektu wektor stanu ma następującą postać:

$$\mathbf{x}_r^T = [\omega_1^r \quad \omega_2^r \quad \omega_3^r \quad T_{12}^{r*} \quad T_{23}^r] \quad (14)$$

Redukcję układu przeprowadzono w oparciu o równanie

$$\mathbf{A} = \mathbf{T}\mathbf{W}\mathbf{T}^{-1} \quad (15)$$

gdzie \mathbf{T} jest macierzą modalną (odspzęgającą), zaś \mathbf{W} jest macierzą diagonalną, zawierającą wartości własne macierzy \mathbf{A} .

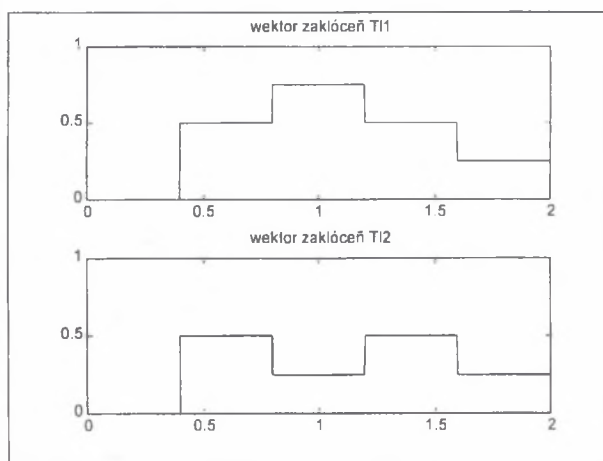
Do wyznaczenia zredukowanej macierzy A_R wykorzystano macierz W_R , która jest podmacierzą macierzy W , zawierającą żądane wartości własne (50,20 Hz), oraz macierz T_R , która zawiera wybrane wiersze macierzy wektorów własnych T . Wiersze macierzy T_R odpowiadają zmiennym stanu zredukowanego układu opisanym wyrażeniem (15). Równanie, opisujące macierz A_R ma postać

$$A_R = T_R W_R T_R^{-1} \quad (16)$$

Po wyznaczeniu zredukowanej macierzy A_R obliczono stałe współczynniki zredukowanego modelu mechanicznego przedstawionego na rysunku 4. Następnie dla obiektu zredukowanego obliczono nową macierz L_R optymalnej filtracji w sensie statystycznym (estymacji stanu) oraz nową macierz K_R optymalnej regulacji w sensie minimalizacji wskaźnika jakości (9).

5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Symulację regulacji układu napędowego pojazdu trakcyjnego (rys. 1) przeprowadzono przy zakłóceniach momentów obciążenia kół sygnałami, przedstawionymi na rys. 5.

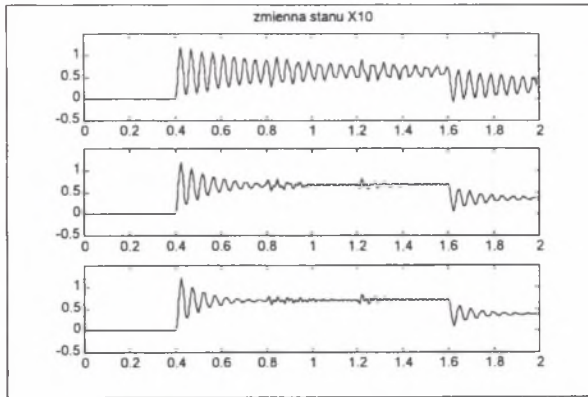


Rys. 5. Wartości momentów zakłócających obciążenia koła 1 (T11) i koła 2 (T12)
Fig.5. Disturbing load torque of wheels: 1 (T11) and 2 (T12)

Na rys. 7 i 8 znajdują się przebiegi dynamiczne zmiennych x_{10} oraz x_{11} wektora stanu (1). Zmienna x_{10} jest naprężeniem wewnętrznym T_{45} , występującym pomiędzy wałem a pierwszym kołem (patrz rys. 1), zaś zmienna x_{11} jest naprężeniem wewnętrznym T_{56} , występującym między oboma kołami. Górne przebiegi na obu rysunkach dotyczą oscylacyjnych stanów nieustalonych dla układu otwartego. Środkowe wykresy odnoszą się do regulacji przy użyciu optymalnego obserwatora i optymalnego regulatora, określonego dla modelu, przedstawionego na rys. 1. Najniższe wykresy dotyczą tego samego układu dynamicznego, regulowanego przy użyciu regulatora/obserwatora, bazującego na zredukowanym modelu, przedstawionym na rys. 4.

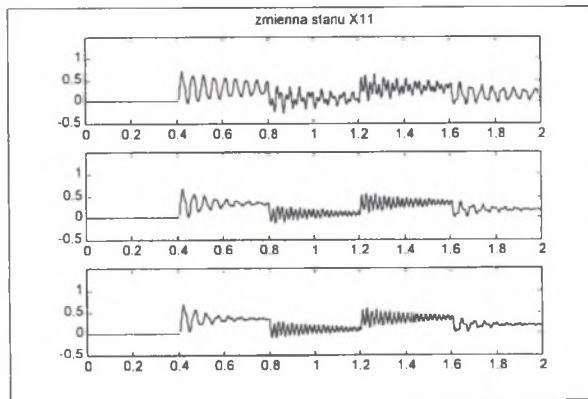
W stosunku do układu otwartego zastosowanie regulatora znacznie zwiększa tłumienie oscylacyjnych przebiegów przejściowych, które występują po skokowych zmianach momentu obciążenia kół.

Porównując efekty regulacji z użyciem regulatora optymalnego i zredukowanego można stwierdzić, że wskaźnik jakości regulacji dla regulatora zredukowanego nieco pogarsza się w stosunku do regulatora optymalnego, jednak zachodzi to w tak niewielkim stopniu, że na wykresach symulacyjnych trudno zauważyć istotne różnice pomiędzy przebiegami, odpowiadającymi obu przypadkom regulacji.



Rys. 6. Przebiegi zmiennych stanu x_{10} (kolejno od góry): układu otwartego, sprzężonego regulatorem/obserwatorem optymalnym i regulatorem/obserwatorem zredukowanym

Fig.6. State variables x_{10} profiles: (from the top): open system; with optimal controller/observer, with reduced controller/observer



Rys. 7. Przebiegi zmiennych stanu x_{11} (kolejno od góry): układu otwartego, sprzężonego regulatorem/obserwatorem optymalnym i regulatorem/obserwatorem suboptymalnym

Fig.7. State variables x_{11} profiles: (from the top): open system; with optimal controller/observer, with reduced controller/observer

6. WNIOSKI

W pracy przedstawiono model układu napędowego pojazdu trakcyjnego, opisywanego modelem 11 rzędu. Na podstawie tego modelu określono obserwator statystycznie optymalny w postaci filtru Kalmana oraz regulator optymalny w sensie kwadratowego wskaźnika jakości (9). Regulator z obserwatorem tworzą układ dynamiczny tego samego rzędu co model układu (rys. 3). Badania symulacyjne wykazały skuteczność tego rodzaju regulatora, wyrażającą się w szybkim tłumieniu przebiegów oscylacyjnych po skokowej zmianie momentów obciążenia kół pojazdu.

Praktyczne posługiwanie się układem regulacji wysokiego rzędu wymaga przeprowadzania wielu operacji matematycznych w stosunkowo krótkim czasie, wymaganym ze względu na konieczność eliminacji częstotliwości dochodzących do 300Hz. Narzuca to wysokie wymagania sprzętowe dla regulatora. Dlatego też w dalszej części pracy przedstawiono model obiektu regulacji zredukowany z rzędu 11 do rzędu 5. Dla zredukowanego modelu na zasadach, analogicznych co poprzednio określono regulator/obserwator 5 rzędu. Badania symulacyjne z wykorzystaniem regulatora niższego rzędu do obiektu 11 rzędu wykazały praktycznie nieistotne pogorszenie jakości regulacji.

Istotnym wnioskiem końcowym jest to, że do skutecznej regulacji układu napędowego pojazdu trakcyjnego można użyć regulatora niższego rzędu, który między innymi bazuje na macierzy stanu, zawierającej więcej niż 4 razy mniej elementów. W związku z tym można szacować, że wymagana liczba podstawowych operacji obliczeniowych „on-line” zmaleje mniej więcej w tym samym stopniu, co znacznie zmniejsza wymagania dla układu regulacji.

LITERATURA

1. Kaczorek T.: Teoria sterowania i systemów, PWN, Warszawa 1996.
2. De Larminat P., Thomas Y.: Automatyka - układy liniowe, WNT, Warszawa 1983.
3. Lewandowski M.: Model matematyczny i własności dynamiczne układu mechanicznego przenoszenia momentu pojazdu trakcyjnego, KN Semtrak, Kraków 1996.
4. Lewandowski M.: Systemy sterowania i dynamika pojazdów trakcyjnych wyposażonych w komputery pokładowe, KBN - Grant 1996 nr 331439102.
5. Schwartz H. J.: Regelung der Radsatzdrehzahl zur maximalen KraftschBausnutzung bei elektischen Trebfahrzeugen, TH Darmstadt 1992.
6. Beck H., Engel: New control concept for overlad minimized traction drivers, EPE-95, Sevilla 1995.
7. Lewandowski M.: Model matematyczny regulatora momentu napędowego pojazdu trakcyjnego dla minimalizacji naprężeń w układzie mechanicznym przenoszenia momentu. DRIVES AND SUPPLY SYSTEMS FOR MODERN ELECTRIC TRACTION.

Abstract

A model of an electric traction vehicle drive system, described by eleven-order model, is presented in the paper. Practical application of a high level control system requires to perform many mathematical operations in a short time. Then there is presented in the paper a model of the object reduced from 11-order to 5-order. Simulation study with the usage of the lower order controller with 11-order object has shown negligible decrease of the control quality. The significant conclusion from the paper is that for the efficient control of the electric traction vehicle drive system is possible to use lower order controller, which among others is based on state matrix with more than four times less elements. Due to that fact it may be assessed, that the required number of basic „on line” calculations decreases about at the same extent, which significantly reduces the requirements put on the control system.