CZASOPISMO TECHNICZNE E
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 1-E/2007
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6301

ZYGMUNT SZYMAŃSKI*

STEROWANIE WIELOPOZIOMOWE UKŁADU NAPĘDOWEGO TRAKCYJNEGO POJAZDU KOŁOWEGO Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM LUB HYBRYDOWYM

MULTILEVEL CONTROL OF THE WHEEL VEHICLE TRACTION DRIVE SYSTEM WITH ELECTRIC AND HYBRID DRIVE

Streszczenie

W artykule dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych pojazdów kołowych z napędem elektrycznym i hybrydowym: szeregowym, równoległym i szeregowo-równoległym, z połączeniem silnika elektrycznego i spalinowego. Przedstawiono także różne konstrukcje silników trakcyjnych: silnik indukcyjny (z podwójnym wirnikiem, z dzielonym obwodem magnetycznym wirnika) oraz zintegrowany silnik synchroniczny. Zamieszczono modele matematyczne obwodów: elektrycznych, układu napędowego pojazdu, układu mechanicznego oraz kinematycznego pojazdu kołowego. System sterowania wielopoziomowego został wykorzystany do sterowania pojazdu kołowego. Aby zapewnić sterowanie optymalne pojazdu kołowego z napędem elektrycznym i hybrydowym zastosowano różne kryteria: minimum poboru energii dla jazdy optymalnej, przy uwzględnieniu dynamicznych zmian prędkości jazdy pojazdu. Zamieszczono również przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych, przeprowadzonych dla różnych warunków jazdy. Wyniki obliczeń komputerowych zostały częściowo sprawdzone w trakcie badań laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: pojazd hybrydowy, sterowanie wielopoziomowe, napęd elektryczny

Abstract

The paper present's a review of the constructions solution of wheel vehicle drives systems with electric and hybrid drive: series, parallel, and series-parallel connection petrol and electric motors. Some constructions of the traction motors are presented in the paper: induction motors (double rotor, cutting magnetic circuit rotor), integrated synchronous motor. A mathematical model of: electric motor, drive system, mechanic system, and kinetic system, of the wheel vehicle are presented in the paper. A multilevel control system are applied for the wheel vehicle control. For realization of optimal control system of the wheel vehicle with electric and hybrid drive system assumed criteria: minimum of energy consumption, optimal vehicle distance, in assumption of determine dynamic changes of vehicle speed. The paper presents selected results of computer calculations, realized for particular ride conditions. Results of computer calculations remains partially verified a laboratory experiments.

Keywords: hybrid vehicle, multilevel control, electric drive

* Dr inż. Zygmunt Szymański, Katedra Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

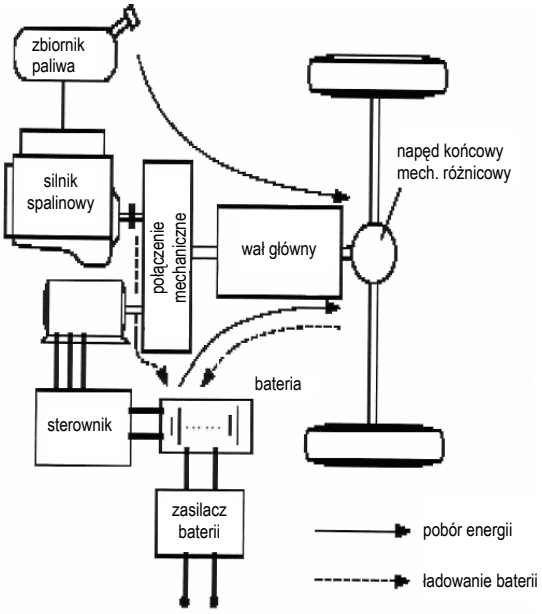
Rozwój transportu spalinowego stwarza zagrożenie przekroczenia dopuszczalnych wartości poziomów hałasu, drgań i wibracji oraz wskaźników związanych z zanieczyszczeniem środowiska naturalnego. Wprowadzenie pojazdów z napędem elektrycznym lub hybrydowym powinno w znacznym stopniu ograniczyć to oddziaływanie. Klasyczny układ napędowy pojazdu kołowego składa się z silnika spalinowego z rozrusznikiem elektrycznym oraz z układu przeniesienia napędu, zawierającego m.in.: sprzęgło, przekładnię wielostopniową (skrzynię biegów) oraz zespół osi napędowych. W referacie zaproponowano wprowadzenie do układu napędowego pojazdu kołowego elektrycznych zespołów napędowych. Zastosowanie zmodernizowanego napędu pozwoli wyeliminować z układu napędowego pojazdu: rozrusznik elektryczny i częściowo przekładnię wielostopniową oraz zmniejszyć moc silnika spalinowego. Optymalnym rozwiązaniem jest wprowadzenie wariantowego wyposażenia samochodu w dodatkowy napęd elektryczny do seryjnie produkowanych samochodów spalinowych. W artykule zaproponowano wprowadzenie do układów napędowych pojazdu kołowego indukcyjnych silników trakcyjnych. Zastosowanie tych silników do układów napędowych pojazdów stwarza szerokie możliwości zmian konstrukcyjnych pojazdów, umożliwia uzyskanie znacznych oszczędności eksploatacyjnych, a także daje pewne możliwości realizacji eksploatacji ekologicznej transportu kołowego. Wypadkowa moc napędu hybrydowego będzie równa mocy silnika trakcyjnego napędu klasycznego. Układ napędowy pojazdu kołowego z napędem elektrycznym zawiera: silnik trakcyjny lub zespół trakcyjnych silników elektrycznych, blok zasilaczy przekształtnikowych oraz układ przeniesienia napędu. Klasyczny układ napędowy pojazdu hybrydowego zawiera dwa tory przetwarzania energii: tor termodynamiczno-mechaniczny oraz tor elektromechaniczny. Tor termodynamiczno-mechaniczny zawiera silnik spalinowy oraz zasobnik energii (bateria akumulatorów, ultrakondensator, koło zamachowe). Tor elektromechaniczny zawiera: zespół elektrycznych silników trakcyjnych (silniki prądu stałego, silniki indukcyjne lub silniki z magnesami trwałymi), zasilacz przekształtnikowy oraz układ przeniesienia napędu. Konfiguracja napędu musi zapewniać dwukierunkowy przepływ energii [3, 4, 6]. W artykule przedstawiono wybrane modele pojazdów hybrydowych: szeregowy, równoległy oraz szeregowo-równoległy. Sterowanie pojazdem hybrydowym powinno zapewniać realizację założonych zadań przewozowych w określonym czasie, przy optymalnym zużyciu energii. Można to zrealizować, stosując m.in. sterowanie wielopoziomowe. W artykule omówiono także modele matematyczne pojazdu kołowego oraz wybrane algorytmy sterowania wielopoziomowego. Zamieszczono również przykładowe wyniki obliczeń komputerowych dla założonych funkcji celu i priorytetów sterowania. Wyniki obliczeń komputerowych zostały zweryfikowane w trakcie badań laboratoryjnych.

2. Przegląd układów napędowych hybrydowych pojazdów kołowych

W pojazdach hybrydowych stosowane są różne warianty układów napędowych: napęd szeregowy, napęd równoległy, napęd szeregowo-równoległy [3–5]. W pojazdach z napędem szeregowym silnik spalinowy napędza prądnicę elektryczną, tworząc agregat prądotwórczy do ładowania baterii akumulatorów i do częściowego zasilania zasilacza prze-

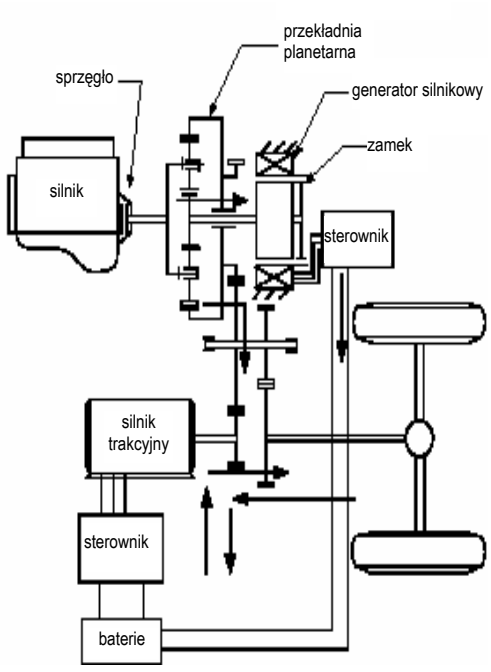
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

kształtnikowego. Elektryczny silnik trakcyjny jest zasilany z baterii akumulatorów przez blok zasilaczy przekształtnikowych i napędza osie napędowe pojazdu przez układ przeniesienia napędu. W pojazdach z napędem równoległym jednostki napędowe: silnik spalinowy oraz silnik elektryczny napędzają równolegle osie napędowe pojazdu. Sumowanie mocy mechanicznej poszczególnych silników napędowych odbywa się przez superpozycję ich momentów napędowych na wspólnym wale napędowym lub w układzie dwuosiowym przez superpozycję ich momentów napędowych, z użyciem przekładni planetarnej [3, 4, 6]. Schemat równoległego układu napędowego przedstawiono na ryc. 1. Rozwiązaniem bardziej uniwersalnym jest układ szeregowo-równoległy zawierający: przekładnię planetarną lub specjalny silnik z wirującym stojanem typu Transmotor [3, 6]. Przykładowe schematy napędu szeregowo-równoległego przedstawiono na ryc. 2 i 3.



Ryc. 1. Schemat równoległego napędu hybrydowego

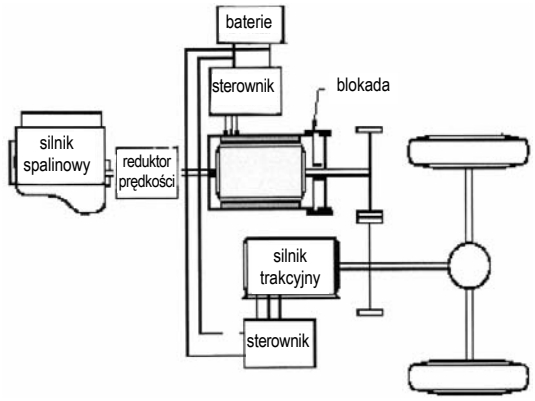
Fig. 1. Scheme of the parallel hybrid drive system



Ryc. 2. Schemat szeregowo-równoległego napędu hybrydowego z przekładnią planetarną [3, 6]

Fig. 2. Scheme of the series parallel driver system with planetary gear unit [3, 6]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



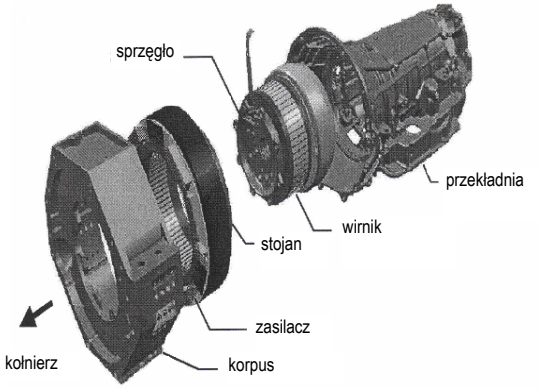
Ryc. 3. Schemat szeregowo-równoległego napędu hybrydowego z silnikiem Transmotor [3, 6]

Fig. 3. Scheme of the series-parallel hybrid driver system with Transmotor motor [3, 6]

Układ napędowy i obwody sterowania pojazdu kołowego powinny zapewniać: szeroki zakres regulacji prędkości jazdy, pracę pojazdu przy stałym momencie napędowym lub stałej mocy mechanicznej, regulację momentu napędowego przy minimalnych stratach energii, stabilną pracę silników napędowych, określoną wartość przeciążalności mechanicznej i elektrycznej: $p_M \in (1{,}5–2)$, $p_E \in (1{,}5–2)$ [3, 6].

3. Nowoczesne silniki napędowe pojazdów kołowych

Silniki elektryczne stosowane w układach napędowych pojazdów kołowych powinny zapewniać: pewny rozruch, przy dużej wartości momentu rozruchowego, szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej, obciążenie momentem znamionowym podczas pracy przy małej prędkości obrotowej, dużą przeciążalność momentem, odporność na przeciążenia mechaniczne oraz elektryczne. Silniki trakcyjne powinny mieć budowę zwartą, zamkniętą, z chłodzeniem naturalnym lub wymuszonym, z zewnętrzną chłodnicą.



Ryc. 4. Schemat układu napędowego z silnikiem kompaktowym

Fig. 4. Scheme of the driver system with compact motor

W pojazdach kołowych z napędem elektrycznym lub hybrydowym najczęściej stosowane są silniki indukcyjne, silniki prądu stałego z magnesami trwałymi, silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. W zależności od zastosowania pojazdu kołowego – pojazdy komunikacji miejskiej, samochody z napędem elektrycznym lub hybrydowym, pojazdy specjalne (wózki transportowe, wózki inwalidzkie lub pojazdy terenowe) – układ napędowy, oprócz jednostki napędowej, może posiadać przekładnię wielostopniową (samochody, autobusy) lub nie zawierać

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

przekładni wielostopniowej (wózki inwalidzkie, pojazdy terenowe). Na rycinie 4 przedstawiono uproszczony schemat układu napędowego pojazdu kołowego z silnikiem kompaktowym. Silnik kompaktowy zawiera we wspólnej obudowie zasilacz przekształtnikowy oraz obwód elektromagnetyczny silnika. Jest to konstrukcja silnika trakcyjnego wyposażonego w tranzystorowy zasilacz przekształtnikowy, sterowany z układu mikroprocesorowego. Całość jest umieszczona we wspólnej obudowie. Taka konstrukcja silnika jest szczególnie zalecana do zastosowania w pojazdach pracujących w trudnych warunkach środowiskowych.

4. Model matematyczny pojazdu kołowego

Model matematyczny pojazdu kołowego jest superpozycją składowych modeli (układu napędowego pojazdu, silnika trakcyjnego, układu zasilania oraz układu kinematycznego pojazdu). Zjawiska zachodzące w poszczególnych modułach opisują układy równań różniczkowych nieliniowych. Oprócz równań bazowych występują również równania sprzęgające poszczególne moduły. W artykule ograniczono się do opisu matematycznego zjawisk zachodzących w silniku napędowym oraz w układzie kinematycznym pojazdu.

4.1. Model matematyczny silnika trakcyjnego

W układach napędowych pojazdów z napędem elektrycznym oraz z napędem hybrydowym stosowane są: silniki indukcyjne (kompaktowe lub z podwójnym wirnikiem), silniki z magnesami trwałymi oraz silniki synchroniczne: histerezowe lub SCR [4–6]. Dynamikę trakcyjnego silnika indukcyjnego z podwójnym wirnikiem opisuje układ równań różniczkowych

$$
\begin{aligned}
u_s &= R_s i_s + L_{\sigma s}\frac{di_s}{dt} + L_s\frac{di_s}{dt} + M_{s,r1}\frac{di_{r1}}{dt} + M_{s,r2}\frac{di_{r2}}{dt}\\
u_{r1} &= R_{r1s} i_{r1} + L_{\sigma r1}\frac{di_{r1}}{dt} + L_{r1}\frac{di_{r1}}{dt} + M_{r1,s}\frac{di_s}{dt} + M_{r1,r2}\frac{di_{r2}}{dt}\\
u_{r2} &= R_{r2s} i_{r2} + L_{\sigma r2}\frac{di_{r2}}{dt} + L_{r2}\frac{di_{r2}}{dt} + M_{r2,s}\frac{di_s}{dt} + M_{r1,r2}\frac{di_{r1}}{dt}\\
M_{M1} &= i_s^T \frac{\partial}{\partial \phi_{M1}}\left[M_{s,r1}\right]\cdot i_{r1}\\
M_{M2} &= i_s^T \frac{\partial}{\partial \phi_{M2}}\left[M_{s,r2}\right]\cdot i_{r2}\\
M_{M1} - M_{ob1} &= J_{M1}\frac{d\omega_{M1}}{dt} + D_1\omega_{M1}\\
M_{M2} - M_{o21} &= J_{M2}\frac{d\omega_{M2}}{dt} + D_2\omega_{M2}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gdzie:

R_s, R_{r1}, R_{r2} – rezystancje uzwojeń stojana oraz dwóch wirników,
L_s, L_{r1}, L_{r2} – indukcyjności własne uzwojeń stojana oraz dwóch wirników,
L_σ, $M_{s,r1}$, $M_{s,r2}$ – indukcyjność rozproszenia, indukcyjności wzajemne stojana oraz wirników,
M_{M1}, M_{M2} – momenty elektromagnetyczne poszczególnych wirników,
i_s, i_{r1}, i_{r2} – prądy stojana oraz wirników: r_1 i r_2,
u_s, u_{r1}, u_{r2} – napięcia zasilania uzwojenia stojana oraz wirników: r_1 i r_2.

Dynamikę silnika synchronicznego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym w układzie współrzędnych *dq* opisuje układ równań

$$\begin{aligned}
\frac{d\psi_{sd}^{(r)}}{dt} &= -\frac{R_s L_f}{L_{sd}L_f - 1{,}5M_{wd}^2}\psi_{sd}^{(r)} + \frac{R_s M_{wd}}{L_{sd}L_f - 1{,}5M_{wd}^2}\psi_f + \Omega\psi_{sq}^{(r)} + u_{sd}^{(r)} \\
\frac{d\psi_{sq}^{(r)}}{dt} &= -\frac{R_s}{L_{sq}}\psi_{sq}^{(r)} - \Omega\psi_{sd}^{(r)} + u_{sq}^{(r)} \\
\frac{d\psi_f}{dt} &= -\frac{1{,}5R_s L_f}{L_{sd}L_f - 1{,}5M_{wd}^2}\psi_{sd}^{(r)} - \frac{R_s L_{sd}}{L_{sd}L_f - 1{,}5M_{wd}^2}\psi_f + u_f \\
\frac{d\Omega}{dt} &= \frac{3p^2}{2J}\left[\left(\frac{1}{L_{sq}} - \frac{L_f}{L_{sd}L_f - 1{,}5M_{wd}^2}\right)\psi_{sd}^{(r)}\psi_{sq}^{(r)} + \frac{M_{wd}}{L_{sd}L_f - 1{,}5M_{wd}^2}\psi_{rq}^{(r)}\psi_f\right] - \frac{pM_{obc}}{J} \\
M_m &= \frac{3p}{2}\left[\left(\frac{1}{L_{sq}} - \frac{L_f}{L_{sd}L_f - 1{,}5M_{wd}^2}\right)\psi_{sd}^{(r)}\psi_{sq}^{(r)} + \frac{M_{wd}}{L_{sd}L_f - 1{,}5M_{wd}^2}\psi_{rq}^{(r)}\psi_f\right]
\end{aligned} \tag{2}$$

gdzie:

u_s, u_f – napięcia zasilania uzwojenia twornika i wzbudzenia,
ψ_{sd}, ψ_{sq}, ψ_f – strumieniozwoje sprzęgnięte z uzwojeniami twornika i wzbudzenia,
$M_{w,d}$ – indukcyjność wzajemna między uzwojeniem twornika w osi *d* a uzwojeniem wzbudzenia.

Siła oporów ruchu jest zależna od prędkości jazdy pojazdu zgodnie z relacją

$$W(v) = m_P g(a_1 + a_2 v + a_3 v^2) \tag{3}$$

Celem sterowania układu jest zapewnienie odtwarzania zadanej trajektorii prędkości obrotowej silnika ω oraz pseudonormy strumienia $0{,}5(\psi_{rd}^2 + \psi_{rq}^2)$. Założono, że: ω i ψ_d są gładkimi, zadawanymi trajektoriami, natomiast nieznane parametry: J_z i M_{zobc} mają wartość stałą. Przy doborze regulatora adaptacyjnego prędkości silnika założono, że jeżeli $e_\omega = \omega_M$, to ω jest błędem śledzenia trajektorii prędkości, jeżeli w miejsce rzeczywistych wartości strumieni: ψ_{rd}, ψ_{rq} podstawi się ich estymatory: ψ_{rd}^*, ψ_{rq}^*, wtedy układ równań opisujących pseudoobserwator strumienia magnetycznego można przedstawić w postaci

$$\begin{aligned}
B_0\frac{d\psi_{rd}^*}{dt} + B_1\psi_{rd}^* + B_2\psi_{rq}^* &= i_{sd} + x \\
B_0\frac{d\psi_{rq}^*}{dt} + B_1\psi_{rq}^* + B_2\psi_{rd}^* &= i_{sq} + y
\end{aligned} \tag{4}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gdzie:

$x = e_\omega i_{sq}$, $y = e_\omega i_{sd}$.

Przy obliczaniu nadążnej regulacji strumienia magnetycznego otrzymuje się równania

$$B_0 \frac{de_\psi}{dt} = B_0 \frac{d\psi_d}{dt} - v_\psi + e_\psi v_\omega + B_1\left(\psi_{rd}^{*2} + \psi_{rq}^{*2}\right) \tag{5}$$

gdzie:

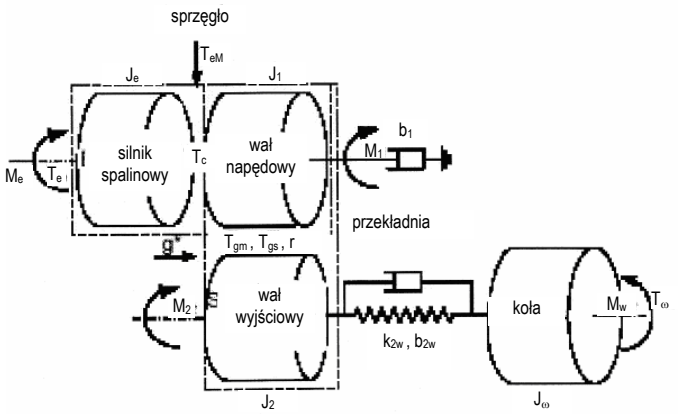
$v_\psi = \psi_{rd}^{*} i_{sd} + \psi_{rw}^{*} i_{sq}$.

Do oceny stabilności układu: regulator adaptacyjny–silnik–obserwator można zastosować funkcję Lapunowa

$$V = \frac{1}{2}\left[J^* e_\omega^2 + \Theta^{*T}\Gamma^{-1}\Theta^* + B_0\left(\psi_{rd}^{*2} + \psi_{rq}^{*2}\right)\right] \tag{6}$$

4.2. Model matematyczny układu kinematycznego pojazdu kołowego

Klasyczny układ kinematyczny pojazdu kołowego jest złożony z silnika napędowego, sprzęgła, układu przeniesienia napędu (skrzynia biegów) oraz osi napędowych. Schemat poglądowy układu kinematycznego pojazdu przedstawiono na ryc. 5.



Ryc. 5. Schemat poglądowy układu kinematycznego pojazdu [1, 6]

Fig. 5. Draft scheme of the wheel vehicle kinetic system [1, 6]

Model matematyczny układu kinematycznego pojazdu opisuje układ równań

$$\begin{aligned}
J_e\dot{\omega}_e &= T_e - T_c(q, x, u)\\
J_1\dot{\omega}_1 &= -b_1\omega_1 + T_c(q, x, u) - T_{gm}(q, x, u)\\
J_2\dot{\omega}_2 &= T_{gs}(q, x, u) - T_{2\omega}\\
J_\omega\dot{\omega}_\omega &= T_{2\omega} - T_\omega\\
\dot{\theta}_{2\omega} &= \omega_2 - \omega_\omega
\end{aligned} \tag{7}$$

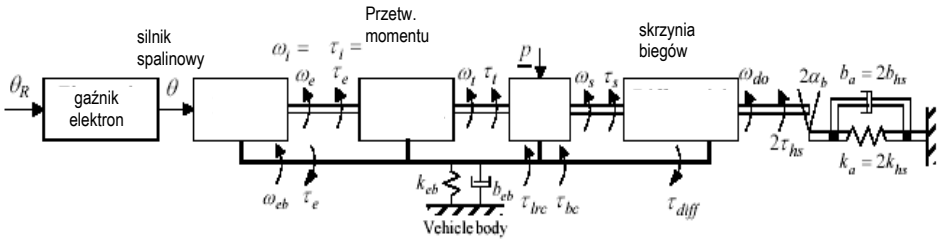
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gdzie:

$T_{2\omega} = k_{2\omega}\theta_{2\omega} + b_{2\omega}(\omega_2 - \omega_\omega)$,

T_{2e} – moment oporów elementów sprężystych.

W pojazdach hybrydowych jednostkami napędowymi są: układ silników elektrycznych oraz silnik spalinowy. Sterowanie pracą silnika spalinowego jest realizowane w sposób automatyczny ze sterownika (układ mikroprocesorowy), co oddziałuje na gaźnik elektroniczny regulujący dopływ paliwa oraz powietrza do silnika. Uproszczony schemat obwodu sterowania pracą silnika spalinowego przedstawiono na ryc. 6.



Ryc. 6. Schemat poglądowy układu napędowego pojazdu kołowego [2, 6]

Fig. 6. Draft scheme of the wheel vehicle drive system

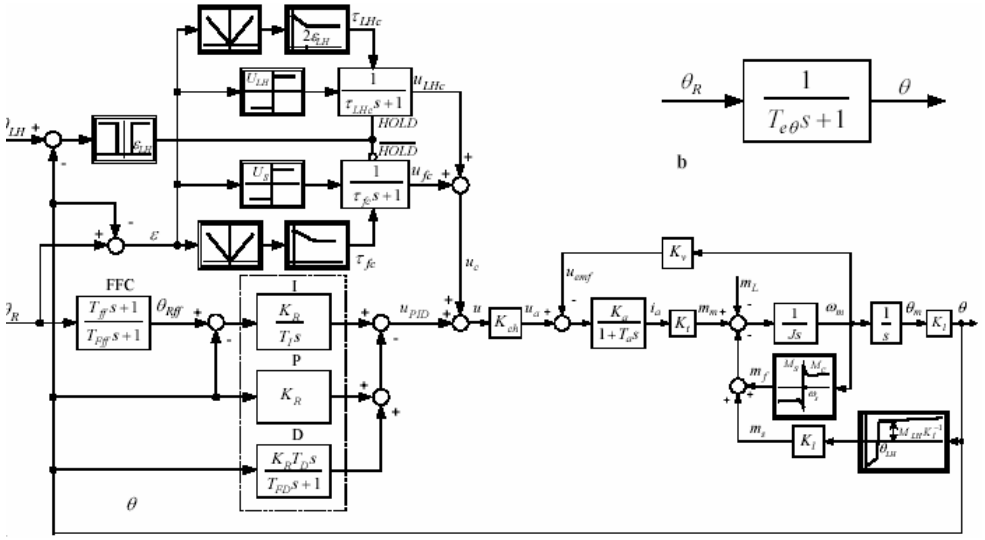
Model matematyczny układu opisuje reakcje termodynamiczne zachodzące w silniku spalinowym oraz ich wpływ na parametry kinematyczne jednostki napędowej [2, 6]. Zjawiska zachodzące w układzie przeniesienia napędu pojazdu kołowego z silnikiem spalinowym opisują równania (8)–(10).

$$\begin{aligned}
\dot{p} &= \frac{\kappa R}{V}\left(W_i T_a - W_o T + \frac{\dot{Q}}{c_p}\right) \\
\dot{T} &= \frac{RT}{pV}\left[\kappa\left(W_i T_a - W_o T\right) - T\left(W_i - W_o\right) + \frac{\dot{Q}}{c_v}\right] \\
\dot{Q} &= hA_w\left(T_w - T\right) \\
h &= K_h\left(\frac{W_i + W_o}{2}\right)^{0,75}
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\frac{dh}{dt} = v\left(p_{app}\phi(h)\left[\frac{1}{q(h)}\phi(h)\left(1 + 3\eta_{BJ}(h) + \frac{12\Phi d}{h^3}\right)\right]\right)\cdot\left(F_{app} - \frac{N_g\Theta_0}{2\pi}Ap_c(h)\right)\frac{h^3}{12\eta Q} \tag{9}$$

$$T = T_c + T_v = N_f N_g \Theta_0 \frac{b-a}{3}\mu p_c\,\mathrm{sgn}(\omega) + N_f N_g \Theta_0 \frac{b^4 - a^4}{4}\eta\omega\frac{\phi_f - \phi_{fx}}{h} \tag{10}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 7. Schemat blokowy modelu kinematycznego pojazdu kołowego [2, 6]

Fig. 7. Block scheme of the wheel vehicle kinetic model

Układy równań różniczkowych (1)–(10) umożliwiają przeprowadzenie analizy zjawisk zachodzących w modelach części kinematycznej, elektrycznej oraz mechanicznej pojazdu, a także opracowanie algorytmów sterowania wielopoziomowego pojazdu. Na rycinie 7 przedstawiono uproszczony schemat blokowy modelu kinematycznego pojazdu kołowego.

5. Algorytmy sterowania wielopoziomowego pojazdu trakcyjnego

Sterowanie wielopoziomowe musi zapewniać realizację założonych zadań przewozowych w określonym czasie, przy zadawanej liczbie środków transportowych oraz minimalnym zużyciu energii. Zadania przewozowe powinny być zrealizowane przy minimalnych kosztach ekonomicznych. W tym celu należy wykorzystywać środki transportowe napędzane energooszczędnymi silnikami trakcyjnymi, sterowanymi adaptacyjnie, w sposób bezpoślizgowy, w optymalnym czasie pracy.

Dobór optymalnych parametrów sterowania pojazdu kołowego można zrealizować na podstawie probabilistycznych modeli intensyfikacji ruchu oraz gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia określonych mas pojazdów w danym przedziale czasu [4, 6]. W tym celu wypadkowy zbiór wielkości decyzyjnych należy przyporządkować do *n* przedziałów czasowych (przy uwzględnieniu rzeczywistych warunków eksploatacyjnych i wyznaczeniu współczynników wagi poszczególnych zdarzeń). Wypadkowa funkcja celu będzie sumą iloczynów lokalnych funkcji optymalizacyjnych, współczynników wagi oraz gęstości prawdopodobieństwa mas pojazdów. Do zbioru zmiennych decyzyjnych można zaliczyć: parametry eksploatacyjne pojazdu (masa pojazdu, ładowność pojazdu, prędkość maksymalna, siła pociągowa), analizowany układ komunikacyjny oraz parametry zasilania pojazdu. Funkcję gęstości rozkładu masy pojazdu można przedstawić w postaci rozkładu

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

normalnego (11), natomiast prawdopodobieństwo pojawienia się pojazdu P_i o masie m w i-tym przedziale trasy można wyznaczyć z relacji (12)

$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \exp\left(- \frac{(m - m_s)^2}{\sigma^2} \right) \tag{11}$$

$$P_i = \int \frac{i}{\sigma\sqrt{2}} \exp\left(- \frac{(m - m_s)^2}{\sigma^2} \right) dm \tag{12}$$

gdzie:

m_s – średnia masa pojazdu,
s – odchylenie standardowe.

Funkcja celu trakcyjnego silnika napędowego musi uwzględniać zagadnienia energooszczędności, koszty użytkowania i wytworzenia silnika. Muszą być spełnione następujące warunki

$$\begin{aligned} &\forall M \left\{ \max \eta_n \left(x \in X(y),\, y \in Y,\, C_m \left(x,\, y \le 1{,}3 C_m^0 \right) \right) \right\} \\ &\min \left\{ C_m,\, C_0 \right\}, \quad \text{dla} \quad x \in Y(y_1) \end{aligned} \tag{13}$$

gdzie:

$C_m = m_{\mathrm{Cu}}\, c_{\mathrm{Cu}} + m_{\mathrm{Al}}\, c_{\mathrm{Al}} + m_{\mathrm{Fe}} c_{\mathrm{Fe}} + m_{iz}\, c_{iz}$,
C_m – koszt użytkowania materiałów czynnych,
C_0 – koszt użytkowania silnika,
C_m^0 – koszt użytkowania silnika wykonanego z określonych materiałów,
η_n – sprawność znamionowa silnika,
x, y – współrzędne wektorów będących zmiennymi optymalizacyjnymi,
X, Y – zbiory wielkości dopuszczalnych.

Aby zapewnić ograniczony pobór energii przez silniki napędowe pojazdu, musi być spełniony warunek

$$\exists_{k=1}^{n} \forall_j \left[I_k \cdot j \le I_{k\max} \right] \cap \max \left[\eta_k \cdot \cos \varphi_k \right] \quad \text{przy} \quad \omega \in \left(0,\, \omega_{M\max} \right) \tag{14}$$

gdzie:

I_k – prąd pobierany z zasilacza przez k-ty silnik trakcyjny,
$\omega_{M\max}$ – maksymalna prędkość obrotowa k-tego silnika trakcyjnego.

Ruch pojazdów może się odbywać po trasach o różnych konfiguracjach i strukturze. Aby zapewnić realizację zadań przewozowych, należy obliczyć minimum wskaźnika jakości

$$J_1 = \int_0^{t_j} \left\{ q_E \left[(1 - k_H) F_P(t) + (1 + k_H) \left| F_P(t) \right| \right] \upsilon_p(t) + q_R F_P^2(t) \right\} dt \tag{15}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gdzie:

t_j – zadany czas przejazdu danego odcinka trasy,

k_H – stosunek kosztów pracy potrzebnej do jazdy do sumy kosztów jazdy i hamowania,

q_E, q_R – współczynniki wagowe określające udział kosztów poboru energii i strat mocy w bilansie energii układu.

Aby ograniczyć błędy sterowania suboptymalnego: adaptacyjnego lub nadążnego, należy obliczyć minimum wskaźnika jakości zdefiniowanego jako

$$J_n = f_l \varepsilon_l^2(t) + f_v \varepsilon_v^2(t) + \int_0^{t_j} \left[g_l \varepsilon_l^2(t) + g_v \varepsilon_v^2(t) + q_R F_P^2(t) \right] dt \tag{16}$$

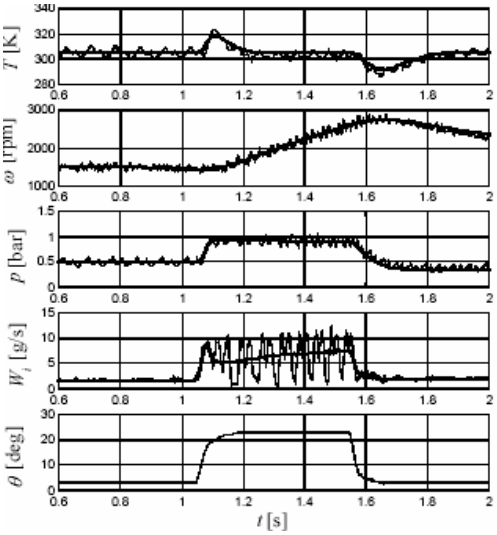
gdzie:

$\varepsilon_l(t) = l_z(t) - l_R(t)$ – różnica między zadaną a rzeczywistą zmianą drogi,

$\varepsilon_v(t) = v_z(t) - v_R(t)$ – różnica między zadaną a rzeczywistą prędkością jazdy pojazdu,

f_l, f_v, q_l, q_R, q_v – współczynniki wagowe poszczególnych parametrów jazdy.

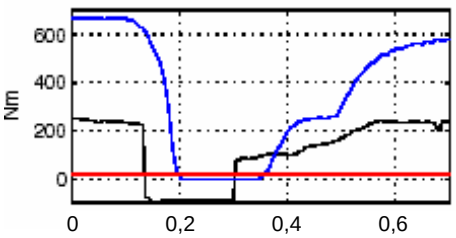
Warunki (11)–(16) opisują lokalne funkcje celu, uwzględniające zagadnienia elektromagnetyczne, elektromechaniczne oraz kinematyczne i transportowe. Wypadkowa funkcja celu, wynikająca z wymogów sterowania wielopoziomowego, uwzględnia także współczynniki wagi oraz funkcje kary [3, 6]. Szczegółowe algorytmy sterowania będą prezentowane w dalszych publikacjach [6]. Dla modeli pojazdów kołowych: z napędem elektrycznym oraz z napędem hybrydowym, złożonym z silnika spalinowego o mocy 6 KM, silnika elektrycznego o mocy 5 kW, obciążonych maszyną prądu stałego, opracowano model symulacyjny, algorytmy sterowania oraz program komputerowy. Wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na ryc. 8–10 [1, 2, 6]. Na rycinie 8 przedstawiono wyniki symulacji zjawisk zachodzących w silniku spalinowym przy zmianie mieszanki dopływającej do gaźnika silnika. Na rycinie 9 pokazano przebiegi czasowe momentu napędowego, a na ryc. 10 przebiegi zmian prędkości obrotowej w układzie kinematycznym pojazdu. Opracowany model sterowania wielopoziomowego został częściowo zweryfikowany badaniami laboratoryjnymi. Wyniki badań potwierdziły celowość wprowadzenia sterowania wielopoziomowego do sterowania pojazdem kołowym z napędem elektrycznym oraz z napędem hybrydowym.



Ryc. 8. Wyniki obliczeń modelu symulacyjnego napędu spalinowego pojazdu [2, 6]

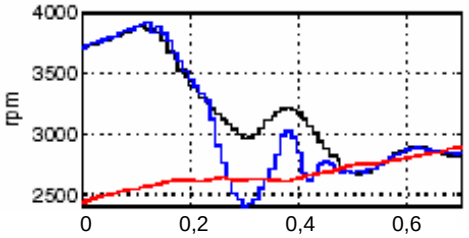
Fig. 8. Calculations results of combustion drive system of the vehicle [2, 6]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 9. Przebiegi czasowe momentów: T_e, T_{cM}, T_w

Fig. 9. Timing run of the torques: T_e, T_{cM}, T_w



Ryc. 10. Przebiegi czasowe prędkości: ω_e, ω_l, ω_w

Fig. 10. Timing run of the rotational speed: ω_e, ω_l, ω_w

6. Zakończenie

Sterowanie pojazdem kołowym powinno uwzględniać: rodzaj napędu (napęd spalinowy, napęd elektryczny, napęd hybrydowy), układ kinematyczny pojazdu (rodzaj zapłonu, układ przeniesienia napędu) oraz parametry eksploatacyjne (konfiguracja terenu, maksymalne prędkości i przyspieszenia). Czynniki te uwzględnia w pewnym stopniu sterowanie wielopoziomowe. W zależności od przyjętych priorytetów, uzyskuje się odpowiednią globalną funkcję celu. Przy obliczeniach przybliżonych uwzględnia się tylko wybrane algorytmy sterowania, przyjmując pozostałe parametry jako stałe. Zastosowanie komputerów pokładowych w pojeździe kołowym zapewni realizację złożonych algorytmów sterowania, niezależnie od ingerencji kierowcy.

Literatura

[1] Deur J., Petric J, Asgari J., *Recent advances in control-oriented modeling of automotive power train dynamics*, Proceedings of the IEEE ISIE'05, Dubrovnik, June 2005, 269-278.

[2] Lucente G., Montari M., *Hybrid modeling of a car driveline for servo-actuated gear shift*, Proceedings of the IEEE ISIE'05, Dubrovnik, June 2005, 223-228.

[3] Miller J.M., Gao Y., Ehsani M., *Hybrid electric vehicle: overview and state of art*, Proceedings of the IEEE ISIE'05, Dubrovnik, June 2005, 307-315.

[4] Szymański Z., *Sterowanie energooszczędne trakcyjnego pojazdu kołowego z napędem elektrycznym lub hybrydowym*, Materiały Konferencyjne Semtrak'04, Zakopane, wrzesień 2004.

[5] Szymański Z., *Sterowanie optymalne pojazdów kołowych oraz szynowych z napędem hybrydowym*, Materiały Międzynarodowej Konferencji MET'05, Warszawa, październik 2005.

[6] Szymański Z., *Nowoczesne napędy pojazdów kołowych oraz szynowych*, Monografia, Gliwice 2006, w druku.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ