

ZYGMUNT SZYMAŃSKI\*

DYNAMIKA UKŁADU NAPĘDOWEGO HYBRYDOWEGO  
POJAZDU KOŁOWEGO NAPĘDZANEGO SILNIKIEM  
SPALINOWYMDYNAMIC OF THE HYBRID VEHICLE DRIVE SYSTEM  
WITH EXPLOSION ENGINE DRIVES

## Streszczenie

W referacie przedstawiono przegląd rozwiązań konstrukcyjnych pojazdów kołowych z napędem hybrydowym z silnikami trakcyjnymi oraz spalinowymi. Opisano zjawiska fizyczne zachodzące w silniku spalinowym oraz przedstawiono model matematyczny układu kinematycznego pojazdu kołowego z napędem hybrydowym. W referacie zamieszczono schemat modelu symulacyjnego pojazdu opracowanego w programie Matlab-Simulink oraz przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych dla różnych wariantów: napęd spalinowy, napęd elektryczny, napęd mieszany. Wyniki obliczeń stanowiły podstawę do opracowania algorytmu sterowania, zapewniającego właściwy dobór przekładni oraz rodzaju napędu pojazdu hybrydowego. Wyniki obliczeń były częściowo sprawdzone badaniami laboratoryjnymi.

*Słowa kluczowe: silnik spalinowy, pojazd hybrydowy, model symulacyjny*

## Abstract

The paper present's review of constructions solution of wheel drives systems with different traction motors and explosion engine. Theoretical analysis of physical phenomenon in explosion engine are presented in the paper. Mathematical model of kinetic part of hybrid vehicle drive system are presented in the paper. For different solution of drive transfer system realized mathematical model and their projection in simulating version, performed with applications of Matlab-Simulink procedures. Simulate calculation realized for different work condition: drive of combustion motor, drive of electric motor, and hybrid drive: combustion and electric motor. Results of computer calculations enable elaborate of control algorithms, assured suitable choice of gears and drive transfer subsystem, and also switch over with particular drive system: combustion drive, hybrid drive. Results of computer calculations remains partially verified a laboratory experiments.

*Keywords: petrol motor, hybrid vehicle, simulation model*

---

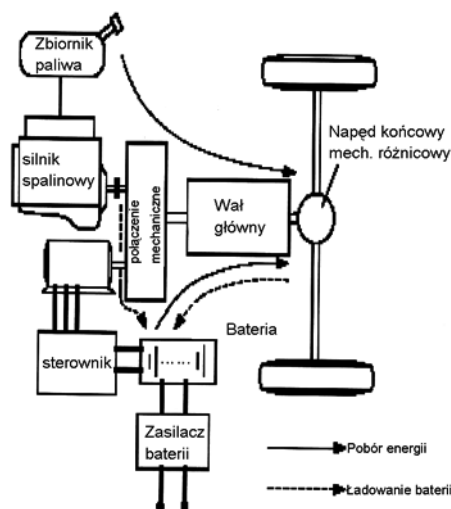
\* Dr inż. Zygmunt Szymański, Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska.

## 1. Wstęp

Masowy rozwój transportu spalinowego stwarza realne zagrożenia zanieczyszczenia środowiska naturalnego, generuje nadmierny hałas, drgania i wibracje oraz może być również źródłem zmian klimatycznych. Jednym z wariantów ograniczenia szkodliwych oddziaływań jest zastosowanie napędu elektrycznego lub hybrydowego (napęd elektryczny, napęd elektryczny i spalinowy, napęd spalinowy i mechaniczny zasobnik energii), wyposażonego w autonomiczne lub alternatywne źródła energii. Rozwiązania te ograniczą wielkość toksycznych zanieczyszczeń emitowanych przez pojazdy spalinowe oraz zmniejszą nadmierny hałas i wibracje [2–4]. Układ napędowy pojazdu kołowego zawiera silnik spalinowy z rozrusznikiem elektrycznym, układ przeniesienia napędu, obejmujący m.in. sprzęgło, przekładnię wielostopniową (skrzynię biegów), oraz zespół osi napędowych. Zastosowanie zmodernizowanego napędu elektrycznego oraz hybrydowego pozwoli wyeliminować z układu napędowego pojazdu kołowego rozrusznik elektryczny i częściowo przekładnię wielostopniową, a także umożliwi zmniejszenie mocy silnika spalinowego. Wypadkowa moc napędu hybrydowego (moc silnika spalinowego oraz układu silników elektrycznych) będzie zbliżona do mocy jednostki napędowej napędu klasycznego. Układ napędowy pojazdu kołowego z napędem elektrycznym będzie zawierać silnik trakcyjny lub zespół trakcyjnych silników elektrycznych stanowiących jednostkę napędową, moduł zasilaczy przekształtnikowych oraz układ przeniesienia napędu. Klasyczny układ napędowy pojazdu hybrydowego zawiera dwa tory przetwarzania energii: tor termodynamiczno-mechaniczny oraz elektromechaniczny. Tor termodynamiczno-mechaniczny obejmuje silnik cieplny (silnik spalinowy, turbina gazowa) oraz akumulator energii (bateria akumulatorów, superkondensator oraz mechaniczny zasobnik energii). Tor elektromechaniczny zawiera zespół elektrycznych silników trakcyjnych, zasilacz przekształtnikowy oraz układ przeniesienia napędu. Konfiguracja napędu musi zapewniać dwukierunkowy przepływ energii [2–4]. Dla założonej konstrukcji pojazdu hybrydowego opracowano modele matematyczne silnika spalinowego oraz układu kinematycznego. Model matematyczny silnika spalinowego opisuje zjawiska fizyczne zachodzące w silniku (gaźnik, cylindry) oraz umożliwia opracowanie algorytmów sterowania optymalnego ilością paliwa oraz jego składu, a także ich wpływu na parametry elektromechaniczne (moment napędowy, moc użyteczna oraz prędkość obrotowa) silnika spalinowego. Model kinematyczny pojazdu obejmuje zespół silników napędowych (silnik spalinowy i silnik elektryczny), sprzęgło, skrzynię biegów, układ różnicowy oraz zespół kół napędowych. W referacie zamieszczono wyniki obliczeń komputerowych przeprowadzonych dla wybranej konstrukcji silnika spalinowego oraz wyniki obliczeń komputerowych przeprowadzonych dla różnych wariantów napędu pojazdu kołowego: spalinowego, elektrycznego, mieszanego – elektrycznego i spalinowego. Analiza wyników obliczeń komputerowych umożliwiła opracowanie algorytmów sterowania optymalnego silnika spalinowego oraz algorytmów sterowania pojazdu kołowego, zapewniających płynne przejście z napędu spalinowego na napęd mieszany. Obliczenia symulacyjne zostały zweryfikowane badaniami laboratoryjnymi na modelu pojazdu kołowego z napędami elektrycznym i hybrydowym.

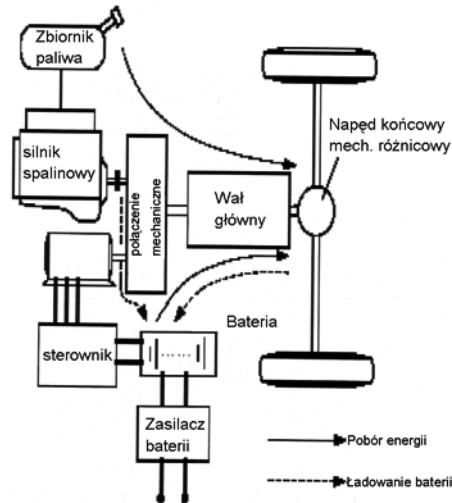
## 2. Przegląd układów napędowych hybrydowych pojazdów kołowych

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 generator, tworząc agregat prądowłórczy do ładowania baterii akumulatorów i zasilania zasilacza przekształtnikowego. Elektryczny silnik trakcyjny jest zasilany z baterii akumulatorów przez blok zasilaczy przekształtnikowych – napędza on przez układ przeniesienia napędu osie napędowe pojazdu. 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 lub – w układzie dwuosowym – przez superpozycję ich momentów napędowych przy wykorzystaniu przekładni planetarnej [3, 4, 6]. Schemat równoległego układu napędowego przedstawiono na rys. 1. Rozwiązaniem bardziej uniwersalnym jest układ szeregowo-równoległy zawierający przekładnię planetarną lub specjalny silnik z wirującym stojanem typu Transmotor [3, 6]. Schemat napędu szeregowo-równoległego przedstawiono na rys. 2. Układ napędowy i obwody sterowania pojazdu kołowego powinny zapewniać szeroką regulację prędkości jazdy, pracę pojazdu przy stałym momencie napędowym lub stałej mocy mechanicznej, regulację momentu napędowego przy minimalnych stratach energii, stabilną pracę silników napędowych oraz określoną wartość przeciążalności mechanicznej i elektrycznej: ( $p(p_M \in (1,5-2), p_E \in (1,5-2)$ ) [3, 6].



Rys. 1. Schemat równoległego napędu hybrydowego

Fig. 1. Scheme of parallel system of hybrid drive

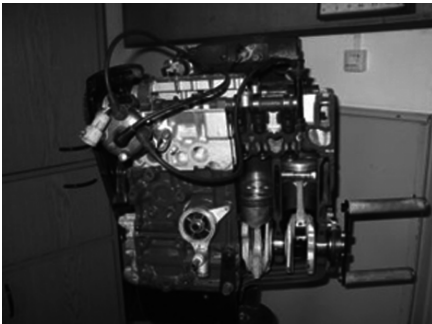


Rys. 2. Schemat napędu hybrydowego z przekładnią planetarną [3, 6]

Fig. 2. Scheme of hybrid drive with planetary gear [3, 6]

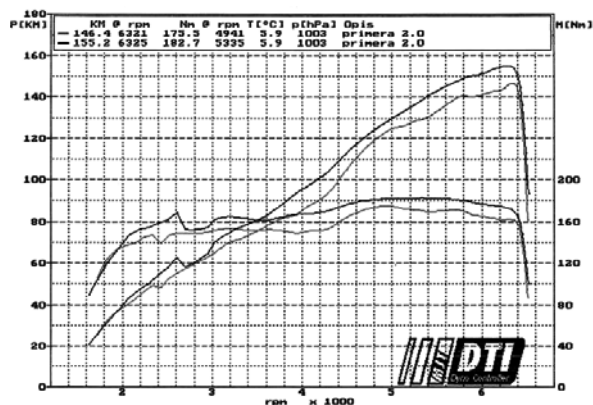
### 3. Model matematyczny silnika spalinowego

W układach napędowych pojazdów kołowych stosowane są silniki benzynowe o różnej liczbie cylindrów i różnym stopniu sprężania oraz silniki wysokoprężne Diesla lub Wankla, w których jako paliwo stosuje się cięższe frakcje ropy naftowej (oleje napędowe) [3, 4]. Silniki wysokoprężne są stosowane w pojazdach dostawczych i transportowych (samochody ciężarowe, autobusy, pojazdy szynowe: lokomotywy spalinowe, autobusy szynowe), silniki benzynowe natomiast przeważnie w samochodach osobowych. Każdy silnik spalinowy musi być wyposażony w gaźnik, układ zapłonowy, zbiornik paliwa z pompą paliwową oraz kolektor powietrza. Przykładowy przekrój silnika spalinowego przedstawiono na rys. 3. Własności elektromechaniczne silnika spalinowego określają jego charakterystyki eksploatacyjne:  $M_m$ ,  $P_m = f(\omega_m)$ , zależność momentu mechanicznego  $M_m$  oraz mocy użytecznej  $P_m$  od zmian prędkości obrotowej  $\omega_m$ . Przykładowy przebieg charakterystyk silnika przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Przekrój spalinowego silnika trakcyjnego

Fig. 3. Petrol traction motor intersection



Rys. 4. Przebiegi momentu i mocy mechanicznej

Fig. 4. Timing change of torque and mechanic power

Zjawiska fizyczne zachodzące w silniku spalinowym stanowiły przedmiot wielu analiz i prac badawczych [3–5], uwzględniających różne konstrukcje silnika, rodzaj zapłonu, liczbę cylindrów oraz rodzaj mieszanki paliwowej. Analiza matematyczna dotyczyła przeważnie zjawisk termodynamicznych zachodzących w gaźniku oraz w cylindrach silnika spalinowego. W referacie przedstawiono uproszczony model matematyczny czterozaworowego silnika benzynowego, sterowanego z gaźnika jako obiekt regulacji układu automatyki. Wielkościami wejściowymi dla silnika spalinowego są: ilość powietrza dostarczana do kolektora, ilość paliwa, rodzaj gaźnika, sposób sterowania przepustnicą oraz prędkość obrotowa silnika. W analizie silnika spalinowego pominięto mieszanekę zwracaną do gaźnika lub usuwaną z cylindrów podczas cyklu „wydech” [4]. Zgodnie z prawem ciągłości przepływu, masę mieszanki wpływającą do gaźnika o założonym stopniu sprężania opisuje równanie (1)

$$m = A_c \cdot p_m \cdot \Phi \sqrt{\frac{\gamma}{R T_u}} \quad (1)$$

gdzie:

$$\Phi = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{R T_u}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)}} & \text{dla } \left(\frac{p_d}{p_u}\right) > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} & \text{dla } \left(\frac{p_d}{p_u}\right) \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases}$$

- $R$  – uniwersalna stała gazowa,
- $p_u, T_u$  – górne wartości ciśnienia i temperatury w gaźniku,
- $p_d$  – dolna granica ciśnienia w gaźniku,
- $\gamma$  – współczynnik przemiany termodynamicznej dla:  $\frac{p}{V} = \text{const.}$

Wypadkowa powierzchnia otworu wlotowego gaźnika  $A_e$  jest określana dla następujących warunków eksploatacyjnych: powierzchni otworu wlotowego  $A$ , rodzaju przepływu mieszanki (powietrze i paliwo) – współczynnik przepływu  $C_d$ . Na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych dla silnika spalinowego o średnicy otworu wlotowego  $d = 0,03$  m, określono funkcję aproksymacyjną  $F(q)$ , określającą zależność ilości mieszanki od kąta otwarcia przepustnicy (2) [3–5].

$$F(q) = C_d(q). A(q) = 3,765 - 0,1058 q + 0,5479 q^2 \quad (2)$$

gdzie:

$q$  – kąt otwarcia przepustnicy gaźnika.

Gęstość mieszanki (w jednostkach względnych)  $\dot{M}$  wtryskiwanej do cylindra silnika spalinowego można określić z relacji (3)

$$\dot{M} = \frac{\omega_m}{\omega_{odn}} 0,58 + 0,0617 \cdot \frac{\omega_m}{\omega_{odn}} (0,17 p + 0,00098 p^2) \quad (3)$$

gdzie:

$p$  – ciśnienie w gaźniku,

$w_m$  – prędkość silnika spalinowego.

Moment mechaniczny silnika spalinowego wytwarzany w procesie spalania zależy od układu zapłonowego oraz jakości i ilości mieszanki wstrzykiwanej do cylindra. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych oszacowano wielomianową aproksymację przebiegu nieliniowego  $M_m = f(\omega)$  w postaci relacji (4)

$$M_m = \alpha_0 + 1,28 \dot{M} - 0,0016 \dot{M}^2 + 56,48 \frac{\omega}{\omega_{odn}} - 8,3144 \frac{\omega^2}{\omega_{odn}} + 1,393 \frac{\omega^3}{\omega_{odn}} - 0,034 \frac{\omega^4}{\omega_{odn}} \quad (4)$$

gdzie:

$$\alpha_0 = -86,52 - 8,3144 \left( \frac{A}{F} \right) + 1,28 \left( \frac{A}{F} \right)^2$$

dla  $\omega \in (1000-7000)$  obr./min.

Parametry wyjściowe silnika (skład spalin w rurze wydechowej) są kontrolowane przez układ czujników pomiarowych: ilości powietrza ( $A$ ) oraz paliwa ( $F$ ), sondę Ernsta oraz układ sterowania z regulatorem PI. Wielkością mieszanki paliwa wstrzykiwanej do gaźnika steruje nieliniowy regulator w zależności od składu chemicznego spalin. Nastawy regulatora zależą także od stopnia parowania i skraplania par etyliny. Zjawisko to opisuje układ równań (5)

$$\begin{aligned} \tau_f \frac{d\dot{m}_{f_i}}{dt} &= \dot{m}_{f_c} - \dot{m}_{f_i} \\ \tau_f \frac{d\dot{m}_p}{dt} &= \eta \dot{m}_{f_i} - \dot{m}_p \\ \dot{m}_f &= (1 - \eta) \dot{m}_{f_i} + \dot{m}_p \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:

- $\dot{m}_{fc}$  – masa paliwa wstrzykiwana do cylindra,
- $\dot{m}_f$  – masa paliwa w komorze gaźnika,
- $\dot{m}_p$  – ilość par etyliny,
- $\dot{m}_{fc}$  – znamionowa ilość mieszanki etyliny wstrzykiwana do silnika,
- $\tau_f$  – czas trysku paliwa (50 ms),
- $\tau_p$  – czas parowania i skraplania par etyliny,
- $\eta$  – stopień koncentracji mieszanki (~0,25).

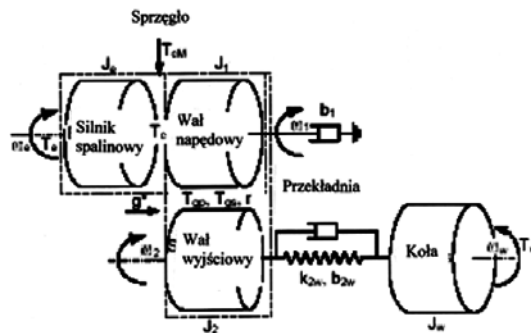
Stany przejściowe zachodzące w silniku spalinowym opisują zależności termodynamiczne (6)

$$\dot{p} = \frac{R \gamma}{V} (T_i \dot{m}_m - T \dot{m}_w) + \frac{\gamma - 1}{V} \dot{Q}_m \quad (6)$$

$$\dot{m} c_v T = \dot{Q}_m + (c_p T_i - c_v T) \dot{m}_M - R T \dot{m}_c$$

gdzie:

- $p$  – ciśnienie w cylindrze,
- $T$  – temperatura wewnątrz cylindra,
- $m_m$  – wypadkowa masa mieszanki na wlocie do cylindra,
- $m_c$  – wypadkowa masa mieszanki na wylocie z cylindra,
- $Q_m$  – ilość ciepła wydzielanego w cylindrze,
- $T_i$  – temperatura mieszanki na wlocie,
- $M$  – bieżąca masa mieszanki,
- $c_p, c_v$  – stałe gazowe rozpylonej mieszanki.



Rys. 5. Schemat poglądowy układu kinematycznego pojazdu

Fig. 5. Pictorial scheme of kinetic system of vehicle

Elektromechaniczny stan dynamiczny układu kinematycznego pojazdu, złożonego z silnika spalinowego, koła zamachowego, zespołu przeniesienia napędu (zespół przękładni i sprzęgło) oraz alternatora, opisuje równanie (7)

$$M_m - M_{\text{obc}} = \left( J_m + J_{\text{zam}} + \frac{1}{i^2} (J_{\text{alt}} + J_{\text{sk}}) \right) \frac{d\omega_m}{dt} \quad (7)$$

gdzie:

- $J_m, J_{\text{zam}}$  – momenty bezwładności silnika i koła zamachowego,
- $J_{\text{alt}}, J_{\text{sk}}$  – momenty bezwładności alternatora i skrzyni biegów,
- $I$  – bieżące przełożenie skrzyni biegów.

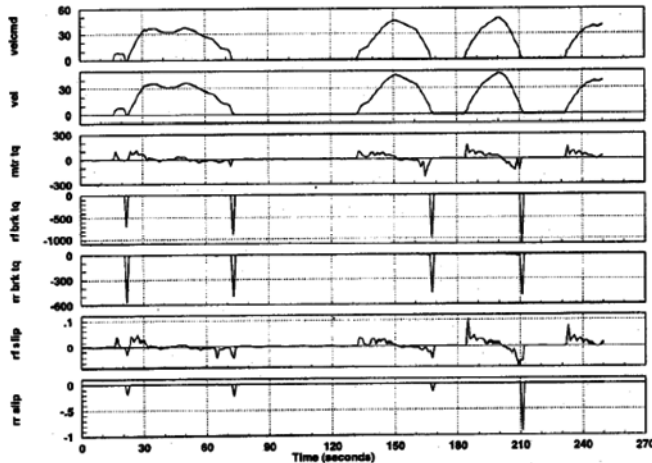
#### 4. Model układu kinematycznego pojazdu kołowego

Klasyczny układ kinematyczny pojazdu kołowego składa się z silnika napędowego, sprzęgła, układu przeniesienia napędu (skrzynia biegów) oraz osi napędowych. Schemat poglądowy układu kinematycznego pojazdu przedstawiono na rys. 5, a model matematyczny układu kinematycznego pojazdu opisuje układ równań (8):

$$\begin{aligned} J_e \dot{\omega}_e &= T_e - T_c(q, x, u) \\ J_1 \dot{\omega}_1 &= -b_1 \omega_1 + T_c(q, x, u) - T_{gm}(q, x, u) \\ J_2 \dot{\omega}_2 &= T_{gs}(q, x, u) - T_{2\omega} \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

- $T_{2\omega} = k_{2\omega} \theta_{2\omega} + b_{2\omega} (\omega_2 - \omega_\omega)$ ,
- $T_{2e}$  – moment oporów elementów sprężystych.



Rys. 6. Przebiegi czasowe zmian parametrów silnika spalinowego przy zmianach otwarcia przepustnicy gaźnika

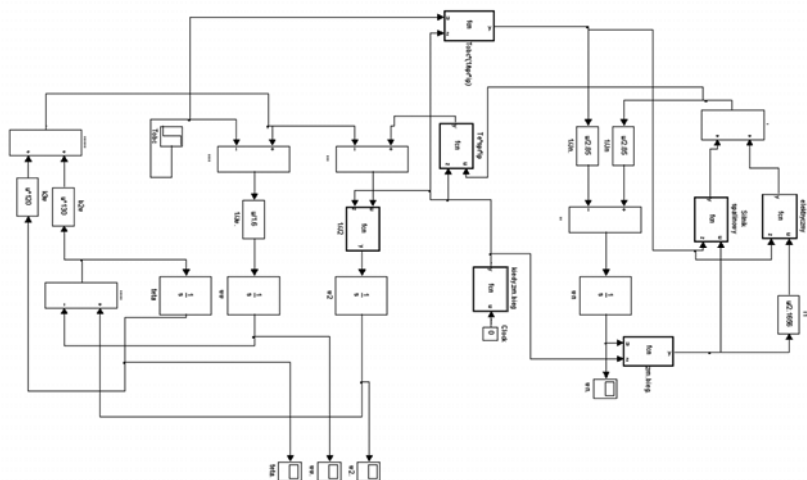
Fig. 6. Timing function of change petrol motor parameters in a change of opening throttling valve of carburetor



Układy równań różniczkowych (1–8) umożliwiają przeprowadzenie analizy zjawisk zachodzących w modelach części kinematycznej, spalinowej i mechanicznej pojazdu oraz opracowanie algorytmów sterowania wielopoziomowego pojazdu. Dokładną analizę matematyczną układu napędowego pojazdu kołowego przedstawiono w [4, 5].

## 5. Wyniki obliczeń komputerowych układu kinematycznego pojazdu kołowego

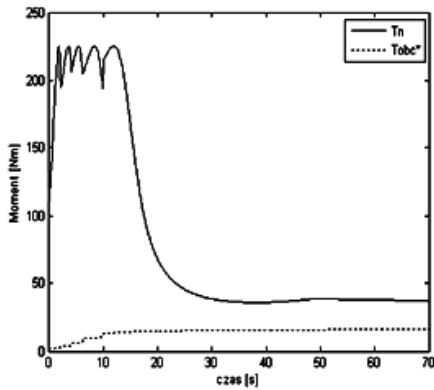
Układ równań różniczkowych (1–8) opisujący dynamikę pojazdu kołowego umożliwia opracowanie modelu symulacyjnego pojazdu. W referacie ograniczono się do analizy dynamiki układu kinematycznego pojazdu napędzanego silnikiem spalinowym, zakładając stan ustalony dla silnika elektrycznego, oraz do analizy stanów dynamicznych silnika spalinowego. W referacie zamieszczono wyniki analizy modelu symulacyjnego pojazdu kołowego złożonego z silnika spalinowego, silnika trakcyjnego (silnik indukcyjny), o założonej aproksymowanej charakterystyce mechanicznej  $M = f(n_M)$ , oraz układu kinematycznego zawierającego sprzęgło, skrzynię biegów, mechanizm różnicowy oraz zespół kół napędowych. Dla silnika spalinowego przeprowadzono analizę stanów dynamicznych dla skokowych zmian stopnia otwarcia przepustnicy gaźnika. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 6. Model symulacyjny pojazdu hybrydowego przedstawiono na rys. 7. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem procedur Matlab-Simulink.



Rys. 7. Model symulacyjny pojazdu hybrydowego

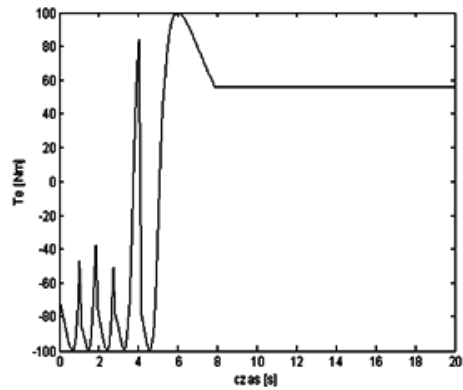
Fig. 7. Simulation model of hybrid vehicle

Dla układu kinematycznego przeprowadzono obliczenia zmian momentu obciążenia pojazdu przy różnych wariantach układu napędowego, zmian prędkości jazdy przy zmianie przełożenia przekładni oraz zmian rodzaju pracy pojazdu (rozwój, hamowanie mechaniczne, hamowanie elektryczne pojazdu). Wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rys. 8–10.



Rys. 8. Przebieg zmian momentu napędowego przy zmianie przełożenia przekładni

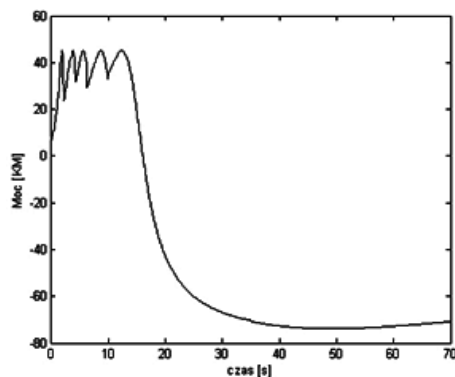
Fig. 8. Time torque change during axle ratio change of gear



Rys. 9. Przebieg momentu napędowego silnika spalinowego

Fig. 9. Time function of the petrol motor drive torque

Aby sprawdzić poprawność wyników obliczeń symulacyjnych, przeprowadzono pomiary laboratoryjne na uproszczonym modelu pojazdu kołowego z napędem elektrycznym oraz z napędem hybrydowym. Badania przeprowadzono dla silnika indukcyjnego mocy 30 kW, zasilanego z tranzystorowego falownika napięcia zbudowanego z tranzystorów IPM. Układ współpracował z silnikiem spalinowym o mocy 90 kW. Przeprowadzone pomiary potwierdziły stabilną współpracę napędu spalinowego z napędem elektrycznym oraz możliwości sterowania optymalnego pojazdem kołowym z wykorzystaniem algorytmów adaptacyjnych. Wyniki badań laboratoryjnych będą prezentowane w dalszych publikacjach.



Rys. 10. Przebieg czasowy zmian mocy mechanicznej przy przyspieszaniu pojazdu

Fig. 10. Time change of mechanic power during acceleration of vehicle

## 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 train dynamic*, Proceedings of the IEEE ISIE'05, June 2005, Dubrovnik, 269-278.
- [2] Lucente G., Montari M., *Hybrid modeling of a car driveline for servo-actuated gear shift*, Proceedings of the IEEE ISIE'05, June 2005, Dubrovnik, 223-228.
- [3] Miller J.M., Gao Y., Ehsani M., *Hybrid electric vehicle: overview and state of art*, Proceedings of the IEEE ISIE'05, June 2005, Dubrovnik, 307-315.
- [4] Szymañski Z., *Sterowanie energooszczędne trakcyjnego pojazdu kołowego z napędem elektrycznym lub hybrydowym*, Materiały Konferencyjne SEMTRAK'04, wrzesień 2004, Zakopane.
- [5] Szymañski Z., *Sterowanie optymalne pojazdów kołowych oraz szynowych z napędem hybrydowym*, Materiały Międzynarodowej Konferencji MET'05, październik 2005, Warszawa.
- [6] Szymañski Z., *Sterowanie wielopoziomowe pojazdu trakcyjnego z napędem elektrycznym lub hybrydowym*, Materiały Konferencyjne SEMTRAK'06, wrzesień 2006, Kraków–Zakopane.
- [7] Szymañski Z., *Dynamika układu kinematycznego pojazdu kołowego z napędem hybrydowym*, Materiały Międzynarodowej Konferencji MET'07, październik 2007, Warszawa.