

Gabriel **KOST**
Andrzej **NIERYCHŁOK**

MODELOWANIE NAPĘDU HYBRYDOWEGO POJAZDU KOŁOWEGO STEROWANEGO Z WYKORZYSTANIEM MAGISTRALI CAN¹

Streszczenie: W artykule przedstawiono wstępną analizę napędu pojazdu kołowego wykorzystującego hybrydowy spalinowo-elektryczny układ napędowy. Zaproponowano zastosowanie sieci CAN do pojazdu hybrydowego oraz strukturę i reprezentację komputerową układu napędowego w systemie Simulink. Opisano proces symulacji pracy napędu spalinowo-elektrycznego.

Słowa kluczowe: napęd hybrydowy, pojazd kołowy, magistrala CAN.

1. WPROWADZENIE

Możliwości komunikacji pomiędzy poszczególnymi elementami automatyki (sensory, aktuatory, układy sterowania-US) oraz dostępna technologia umożliwiająca komunikację między danymi elementami, stanowią podstawę wszelkich systemów przekazywania informacji. Współczesne systemy automatyki opierają się na technikach komputerowych, których architektura oparta jest na systemach rozproszonych i komunikacji sieciowej. Sieci przemysłowe, w tym sieci stosowane w diagnostyce pojazdów kołowych, są sieciami wymiany danych o specyficznych wymaganiach, które w znaczący sposób różnią się od powszechnie znanej sieci komputerowej. Sieci przemysłowe spełniają następujące warunki:

- determinizm czasowy,
- duża niezawodność działania (sieć odporna na czynniki zewnętrzne – zakłócenia, np. pól elektromagnetycznych),
- możliwość wykrywania błędów.

Powyższe warunki zostały uwzględnione w projektowaniu magistrali CAN, stworzonej na potrzeby rynku motoryzacyjnego przez firmę Bosch, m.in. do integracji sterowania złożonymi układami napędowymi, jakimi są samochody hybrydowe.

2. MAGISTRALA CAN

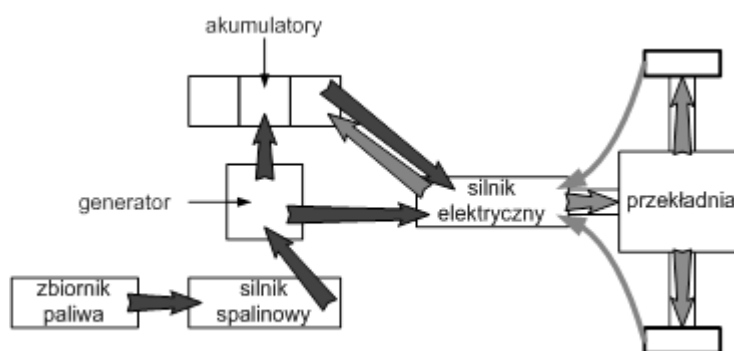
Obecnie stosowane pojazdy kołowe wyposażone są w szereg urządzeń elektronicznych (czujników, aktuatorów), których głównym zadaniem jest nadzorowanie i regulacja pracy układu napędowego, a przez to sterowanie komfortem jazdy [3, 4]. Niezwykle ważnym zagadnieniem jest odpowiednie sterowanie jednostkami napędowymi. Wymaga to stosowania odpowiednich sieci wymiany danych, w których najpopularniejsze to magistrale danych. W pojazdach kołowych wykorzystuje się kilka rozwiązań sieci, których zadanie jest ściśle określone. Powszechnie w pojazdach kołowych wykorzystuje się magistrale danych: CAN, LIN, MOST i FlexRAY [3, 4].

¹ Praca realizowana w ramach projektu rozwojowego nr O R00 0048 05

Po wprowadzeniu w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia pierwszych mikroprocesorowych systemów sterowania w pojazdach kołowych (Motronic i ABS), konieczna okazała się wymiana danych między tymi systemami (sterownikiem Motronic, a sterownikiem układu ABS), a urządzeniami zewnętrznymi, najczęściej związanymi z elementami przeniesienia napędu. Początkowo wymiana danych między systemami pokładowymi pojazdu odbywała się w konfiguracji „punkt-punkt” [4] i dotyczyła sygnałów analogowych lub prostych sygnałów nastawczych i przełączających. Niezbędne okazało się przyjęcie odpowiednich rozwiązań, które to właściwie umożliwiło zatwierdzenie specyfikacji transmisji danych w pojazdach kołowych. Przyjęta specyfikacja opierała się na interfejsie komunikacyjnym RS232C/V24. Warto zaznaczyć, że przez wiele firm samochodowych nawet w latach 2003/04 stosowano ciągle tego typu komunikację wymiany danych pomiędzy jednostkami sterującymi.

3. STRUKTURA SIECI CAN W POJEŹDZIE HYBRYDOWYM

Sieć CAN [1,7] w pojazdach kołowych wykorzystywana jest głównie do diagnostyki i nastaw regulatorów (np. sterujących pracą silnika spalinowego). W pojazdach hybrydowych używana jest w celu szybkiej regulacji układu napędowego, co związane jest ze zmianami jego parametrów pracy, np. opory ruchu, przyspieszanie i hamowanie. Stosowanie jednego z rozwiązań połączeń (szeregowego lub równoległego) jednostek napędowych umożliwia optymalną pracę całego układu napędowego. W niniejszym artykule przyjęto układ szeregowy [6], w którym pokazano przepływ energii od źródła energii do kół pojazdu. Połączenie szeregowe (rys. 1) charakteryzuje się nieprzerwaną pracą jednostki spalinowej, napędzającej generator elektryczny. Wytworzony prąd w generatorze kierowany jest do silnika elektrycznego napędzającego pojazd, a jego nadmiar do akumulatorów elektrochemicznych.



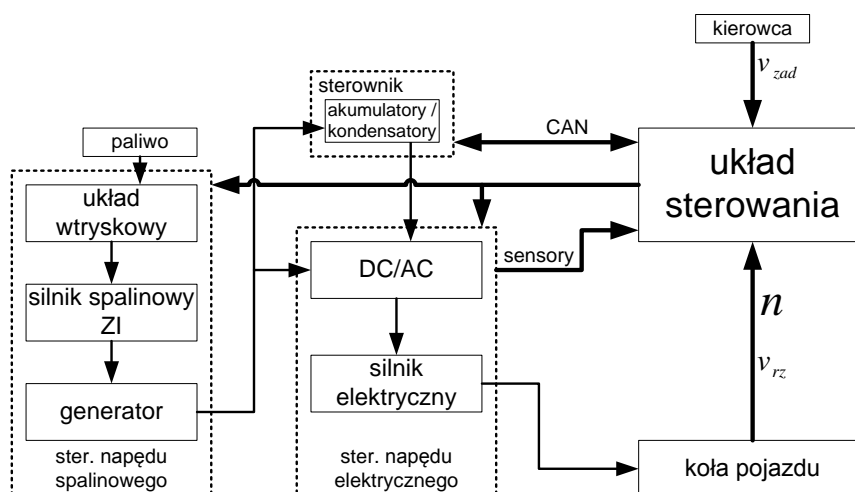
Rys. 1. Układ hybrydy o strukturze szeregowej [6]

Strzałkami grubymi przedstawiono przepływ energii od źródła energii pierwotnej do kół pojazdu. Silnik spalinowy napędza generator, a wytworzona energia napędza silnik elektryczny. Nadmiar wytworzonej energii elektrycznej kierowany jest do akumulatorów i super-kondensatorów.

Strzałkami cienkimi zobrazowano możliwość rekuperacji energii kinetycznej pojazdu. Silnik elektryczny w takim przypadku staje się generatorem i oddaje wytworzoną energię akumulatorom.

Przedstawiony schemat blokowy układu sterowania (rys. 2) odpowiada założeniu koncepcji hybrydy szeregowej. Strzałki pogrubione przedstawiają magistralę CAN.

Układ sterowania kontroluje pracę całego układu napędowego, zbierając informację od sensorów oraz sterowników poszczególnych układów wykonawczych napędu hybrydowego. Kierowca, regulując wychyleniem pedału przyspieszenia lub hamowania daje sygnał zwiększenia lub zmniejszenia prędkości zadanej pojazdu. Układ sterowania, odczytuje prędkość rzeczywistą pojazdu i reguluje poszczególne silniki napędowe tak, aby prędkość rzeczywista zrównoważyła się z prędkością zadaną. Zastosowane sensory w każdym układzie napędowym (elektrycznym lub spalinowym) mają za zadanie dostarczyć informacje do układu sterowania o chwilowej pracy danej jednostki, czyli np.: czy dana jednostka jest w stanie pracy, jeżeli tak to z jaką prędkością obrotową pracuje, czy temperatura pracy nie przekracza temperatury dopuszczalnej.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania napędem hybrydowym [5]

Zaprezentowany układ napędu hybrydowego składa się z silnika elektrycznego synchronicznego, silnika spalinowego z zapłonem iskrowym.

4. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO

Pełny model matematyczny układu napędowego pojazdu kołowego składa się z modeli matematycznych poszczególnych układów napędowych (np. silnika trakcyjnego – spalinowego i elektrycznego, układu kinematycznego – skrzynki przekładniowej). Zjawiska zachodzące w poszczególnych modelach opisane są poprzez układy równań różniczkowych nieliniowych.

W układach napędowych pojazdów kołowych z napędem elektrycznym lub hybrydowym stosuje się najczęściej silniki: indukcyjne i synchroniczne (na magnesach trwałych), głównie trójfazowe zasilane prądem przemiennym. Silniki prądu stałego (na magnesach trwałych) wykorzystuje się najczęściej w koncepcji instalowania silnika w miejscu koła napędowego.

Model matematyczny silnika indukcyjnego w układzie zmiennych biegunowych przedstawia układ równań (1). Rozważamy zarówno parametry elektryczne, jak i mechaniczne obwodu wirnika poprzez zdefiniowanie równań różniczkowych modelujących działanie silnika:

- model matematyczny silnika elektrycznego z punktu widzenia części elektrycznej:

$$\left. \begin{aligned} U_z &= U_{Rw} + U_{Lw} + E \\ U_{Rw} &= R_w \cdot i_w \\ U_{Lw} &= L_w \cdot \frac{di_w}{dt} \\ E &= k_e \cdot \omega_s \\ U_z &= R_w \cdot i_w + L_w \cdot \frac{di_w}{dt} + k_e \cdot \omega_s \end{aligned} \right\}$$

(1)

➤ model matematyczny silnika elektrycznego opisujący część mechaniczną:

$$\left. \begin{aligned} M_s &= M_a + M_v + M_{obc} \\ M_s &= k_m \cdot i_w \\ M_a &= I \cdot \frac{d\omega_s}{dt} \\ M_v &= B \cdot \omega_s \\ k_m \cdot i_w &= I \cdot \frac{d\omega_s}{dt} + B \cdot \omega_s + M_{obc} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

gdzie:

U_z – napięcie zasilające wirnik,

i_w – prąd płynący w uzwojeniach wirnika,

R_w – rezystancja zastępcza uzwojeń wirnika,

L_w – indukcyjność zastępcza uzwojeń wirnika,

E – SEM indukcji,

ω_s – prędkość kątowna wirnika,

M_s – moment obrotowy wirnika,

B – współczynnik tarcia lepkiego zredukowany do wału wirnika,

I – moment bezwładności zredukowany do wału wirnika,

M_{obc} – stały moment obciążenia silnika,

M_a – moment oporowy od sił bezwładności związany z przyspieszeniem wału,

M_v – moment oporowy od sił tarcia związany z prędkością wału,

k_m – stała mechaniczna,

k_e – stała elektryczna.

Układ równań różniczkowych modelu silnika elektrycznego:

$$\left\{ \begin{aligned} U_z &= R_w \cdot i_w + L_w \cdot \frac{di_w}{dt} + k_e \cdot \omega_s \\ k_m \cdot i_w &= I \cdot \frac{d\omega_s}{dt} + B \cdot \omega_s + M_{obc} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Model matematyczny jednostki spalinowej można opisać następującymi równaniami:

$$\left. \begin{aligned} \dot{p} &= \frac{kR}{V} \left(W_i \cdot T_a - W_o \cdot T + \frac{\dot{Q}}{c_p} \right) \\ \dot{T} &= \frac{RT}{pV} \left(k(W_i \cdot T_a - W_o \cdot T) - T(W_i - W_o) + \frac{\dot{Q}}{c_v} \right) \\ Q &= h \cdot A_w (T_w - T) \\ h &= K_h \left(\frac{W_i + W_o}{2} \right)^{0.75} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

gdzie:

\dot{p} – strumień ciśnienia,

p – ciśnienie,

\dot{Q} – strumień ciepła,

Q – ciepło,

c_p – ciepło właściwe pod stałym ciśnieniem,

c_v – ciepło właściwe pod stałą objętością,

h – entalpia,

K_h – współczynnik, stała równowagi,

A_w – iloczyn strumienia masy oraz ciepła właściwego gazu,

R – uniwersalna stała gazowa,

V – objętość,

T – temperatura bezwzględna,

k – stała Boltzmanna,

W_o – wartość opałowa paliwa,

W_i – ciepło spalania,

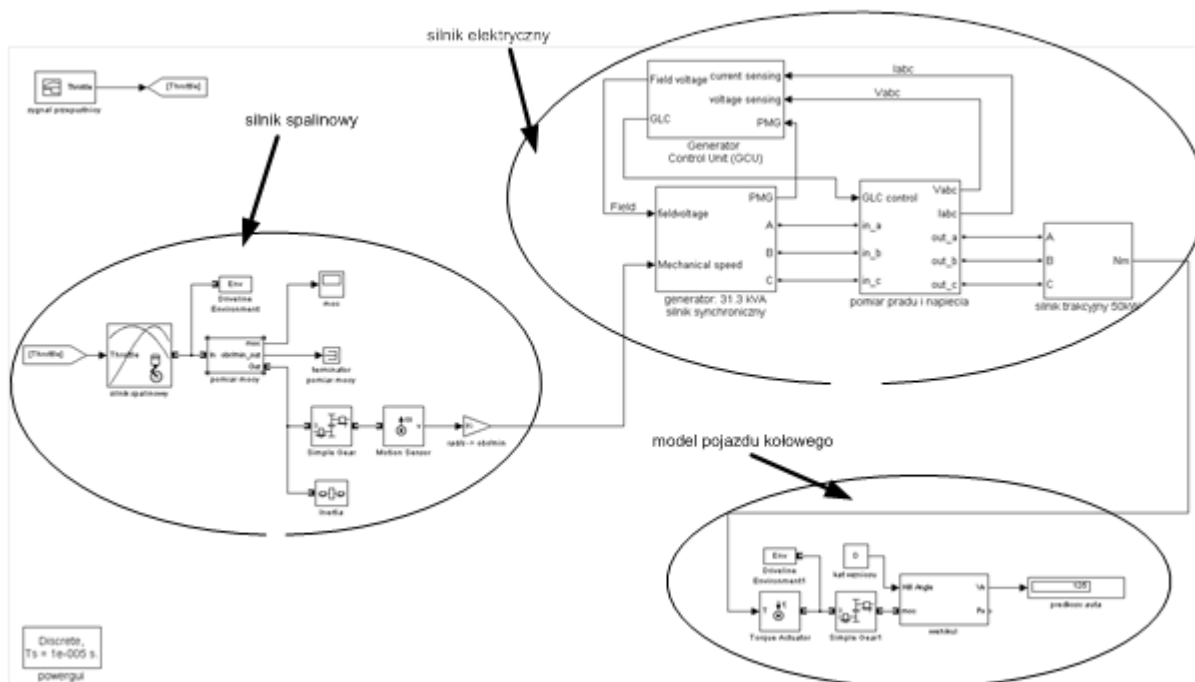
T_a - temperatura źródła górnego,

T_w - temperatura źródła dolnego.,

Powyższe układy równań umożliwiają przeprowadzenie analiz oraz zjawisk zachodzących w hybrydowym napędzie pojazdu kołowego, w którym wyróżniono część przeniesienia napędu dla jednostki elektrycznej i spalinowej.

5. WYNIKI BADAŃ

Dla powyższych równań przeprowadzono symulację hybrydowego pojazdu kołowego o strukturze szeregowej w oparciu o oprogramowanie MatLAB/Simulink. Silnik spalinowy to jednostka o zapłonie iskrowym i mocy maksymalnej wynoszącej 50 kW przy 4500 min⁻¹. Prędkość obrotową ograniczono do 6000 min⁻¹. Generatorem jest silnik synchroniczny trójfazowy o maksymalnej mocy chwilowej wynoszącej 31.3 kVA. Maksymalna prędkość obrotowa generatora wynosi 1500 min⁻¹. W celu połączenia jednostki spalinowej z generatorem zastosowano przekładnię mechaniczną, co umożliwiło redukcję maksymalnej prędkości z 6000 min⁻¹ do 1500 min⁻¹. Silnikiem napędzającym pojazd jest jednostka synchroniczna trójfazowa o mocy 50kW zasilana z układu falownikowego (DC/AC, rys.2). Rys. 3 przedstawia zamodelowany hybrydowy pojazd kołowy w MatLAB/Simulink.

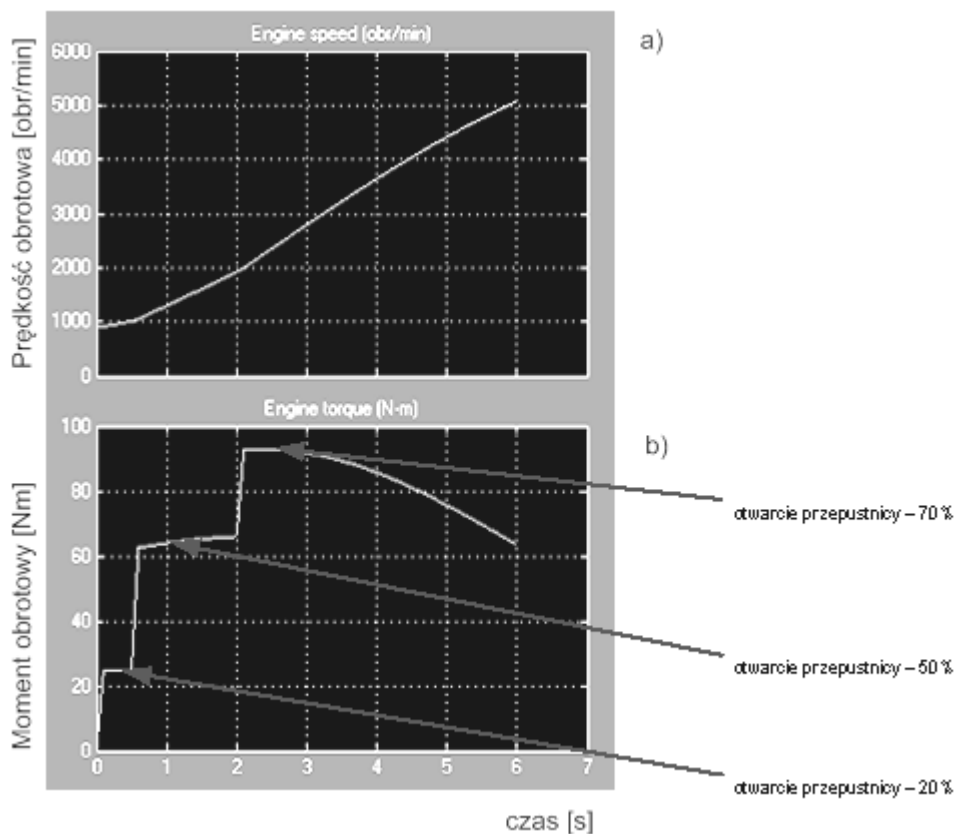


Rys. 3. Model pojazdu hybrydowego w MatLAB/Simulink

W modelu dokonano następujących uproszczeń:

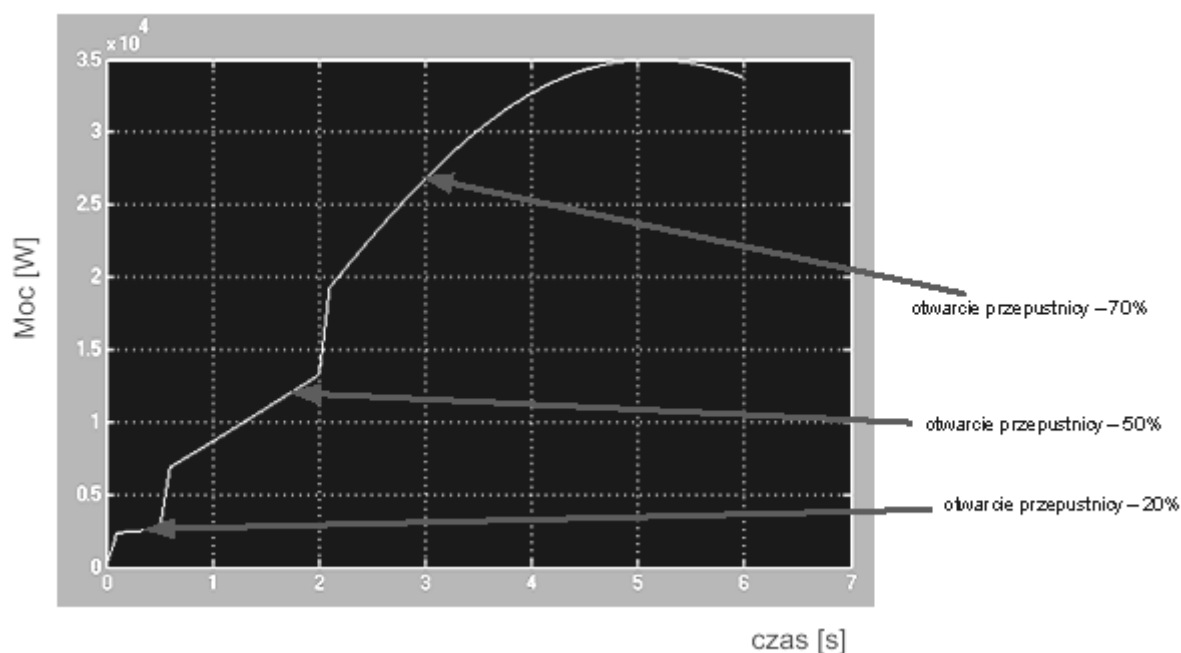
- nie uwzględniono regulatora biegu jałowego dla silnika spalinowego, za regulację biegu jałowego służy moduł „Initial Condition”, w którym ustawiono granicę dolnych obrotów na 900 min^{-1} ,
- w niewielkim stopniu (kąt nachylenia drogi równy zero) uwzględniono warunki drogowe dla pojazdu kołowego,
- model pojazdu kołowego w dużym uproszczeniu odpowiada samochodowi Opel Corsa B 1.0,
- nie uwzględniono baterii elektrochemicznej, silnik trakcyjny bezpośrednio zasilany jest prądem z generatora, co w ekstremalnych warunkach (przy prędkości obrotowej bliskiej maksymalnej) okazało się warunkiem niewystarczającym.

Przedstawione wykresy (rys. 4) momentu i prędkości obrotowej oraz mocy (rys. 5) odpowiadają pracy silnika spalinowego przy otwarciu przepustnicy w zakresie 20% - 70%. Rys. 4 przedstawia zależność prędkości obrotowej od czasu, w którym proces rozpędzania pojazdu kołowego się rozpoczął. Silnik spalinowy pracuje na biegu jałowym, a zwiększenie otwarcia przepustnicy powoduje wzrost prędkości obrotowej silnika i momentu obrotowego. Można także zauważyć niewielką zmianę nachylenia krzywej (a) odpowiadającej prędkości obrotowej od czasu, w momencie zmiany kąta otwarcia przepustnicy. Rys. 5 obrazuje wartość mocy od otwarcia przepustnicy w czasie. Widoczne jest jaką mocą dysponuje silnik spalinowy przy różnych kątach otwarcia przepustnicy. Wykres takiej charakterystyki ważny jest przy doborze generatora elektrycznego, od którego zależy ilość energii elektrycznej dostarczonej do silnika elektrycznego.



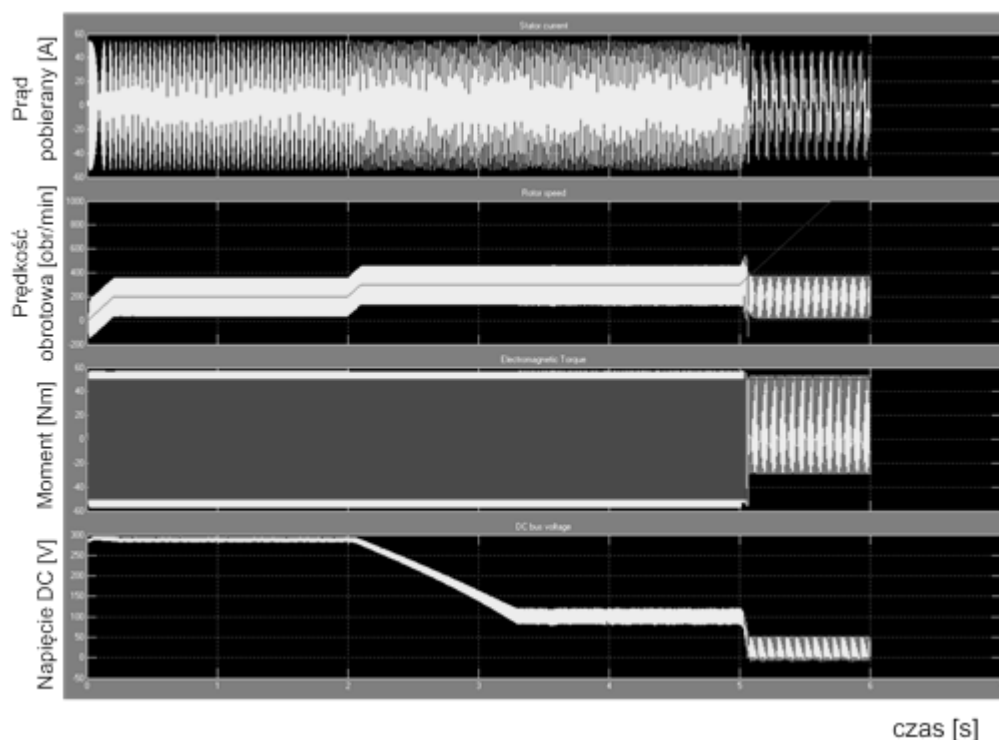
Rys. 4. Wartości prędkości obrotowej i momentu dla silnika spalinowego

Wytworzona przez silnik spalinowy moc wykorzystywana jest przez napęd generatora. Najekonomiczniejsza praca silnika spalinowego stosowanego w hybrydzie szeregowej odpowiada najmniejszemu jednostkowemu zużyciu paliwa, w którym silnik spalinowy pracuje przy największej sprawności, a prędkość obrotową na wyjściu z silnika spalinowego powinno się powiązać z maksymalną sprawnością generatora.



Rys. 5. Wartość mocy silnika spalinowego w zależności od otwarcia przepustnicy

Wykresy przedstawione na rys. 6 odpowiadają pracy silnika trakcyjnego. Porównując wykresy z rys. 4, 5 i 6 widać zmianę charakterystyki silnika w zależności od wartości zadanej pedału przyspieszenia. Wciskając pedał przyspieszenia mocniej, jednostka nadrzędna podaje sygnał zwiększający otwarcie przepustnicy (zakres 50%) przez co rośnie wartość prędkości obrotowej silnika spalinowego i tym samym generatora elektrycznego, a silnik elektryczny rozpędza się do prędkości obrotowej 200 obr./min. Zwiększając położenie pedału przyspieszenia jeszcze bardziej (otwieramy przepustnicę do wartości 70%) przez co zwiększa się prędkość obrotową silnika spalinowego jak i jego moc. Powoduje to zwiększenie prędkości obrotowej silnika elektrycznego z zakresu 200 obr./min. do 300 obr./min. Silnik elektryczny pracuje w stanie ustalonym, a generator dostarcza wystarczającą wartość prądu. Po 5 sekundach charakterystyka silnika spalinowego ulega zmianie (moc silnika spalinowego zaczyna spadać) przez co generator elektryczny nie dostarcza odpowiedniej ilości energii elektrycznej i tym samym silnik elektryczny nie może podjąć stawianemu mu zadaniu. Prędkość obrotowa silnika elektrycznego zaczyna spadać i silnik elektryczny przestaje pracować w stanie ustalonym.



Rys. 6. Wielkości: prąd stojana, prędkość obrotowa, moment dla jednostki elektrycznej napędzającej pojazd kołowy

Po zwiększeniu prędkości obrotowej (co zachodzi dla czasu symulacji równego 5 sekund) zauważyć można nagły spadek napięcia zasilającego oraz brak ustalonej pracy jednostki elektrycznej. Napęd elektryczny nie osiąga zadeklarowanej wartości prędkości obrotowej, co spowodowane jest niewystarczającą energią dostarczaną z generatora do silnika elektrycznego.

6. WNIOSKI

Wyniki badań symulacyjnych przedstawiają koncepcję szeregowego napędu hybrydowego spalinowo-elektrycznego. Zastosowany silnik spalinowy o mocy 50kW wystarcza do napędzania generatora. W modelu nie zamieszczono akumulatorów elektrochemicznych, dlatego w pewnym zakresie widoczny jest niedobór prądu dla wyższych prędkości obrotowych jednostki elektrycznej. Jednakże powyższy model pozwala na dokładne określenie wartości prądu zasilającego jednostkę elektryczną, a co za tym idzie także dobór odpowiedniego generatora oraz prędkości obrotowej silnika spalinowego napędzającego generator.

Kolejnym etapem badań jest wprowadzenie do modelu baterii elektrochemicznej oraz pewnej modyfikacji sterowania jednostki elektrycznej, co powinno skutkować pracą silnika elektrycznego w pełnym zakresie prędkości obrotowej. Planuje się także zastosowanie połączenia napędów w sposób równoległy, co umożliwi wspomaganie silnika elektrycznego przez silnik spalinowy w chwilach zwiększonego zapotrzebowania na siłę napędową.

Budowa modelu matematycznego w oprogramowaniu MatLAB zostanie zaimplementowana w systemie LabVIEW, dzięki któremu powstać ma wirtualny sterownik napędu hybrydowego, co przy wykorzystaniu urządzeń dedykowanych do symulacji wyposażonych w moduł magistrali CAN, pozwala na prowadzenie badań oraz wykorzystanie sterownika w rzeczywistym pojeździe kołowym.

Planowane jest innowacyjne sterowanie przełączaniem jednostek napędowych, wykorzystujące sterowanie adaptacyjne połączone ze sterowaniem ślizgowym, w którym to pojazd kołowy w aglomeracjach miejskich będzie napędzany za pomocą silnika elektrycznego, a poza obszarem zabudowanym za pośrednictwem jednostki spalinowej. Podejście takie ma spowodować zmniejszenie szkodliwych substancji w procesie spalania zachodzącym w silniku spalinowym w aglomeracjach miejskich przez całkowite wyłączenie jednostki spalinowej lub jego pracę w obszarze największej sprawności.

Przedstawiony model może zostać wykorzystany do budowy wirtualnego sterownika symulującego pracę hybrydowego układu napędowego, w szczególności do badań jednostek napędowych i ich wzajemnej współpracy jako oddzielnych silników napędzających pojazd kołowy, lub ich połączenia. Wirtualny sterownik pozwoli także na symulację pracy hybrydowego układu napędowego przy różnych koncepcjach połączeń silników napędowych, co przyczyni się do doboru odpowiednich jednostek napędowych dla konkretnego cyklu jezdnego (pojazd kołowy poruszający się głównie w aglomeracjach miejskich) oraz modelu i klasy pojazdu kołowego. W dalszych pracach w symulatorze zaimplementowane zostaną super-kondensatory, co przyczyni się do badania procesu odzysku energii kinetycznej poruszającego się pojazdu kołowego.

7. LITERATURA

- [1] Lawrenz W.: CAN System Engineering. Springer, Germany 1997.
- [2] Larminie J., Lowry J.: Electric vehicle technology explained. John Wiley & Sons, England 2003.
- [3] Zimmermann W., Schmidgall R.: Magistrale danych w pojazdach. Protokoły i standardy, Germany 2007.
- [4] Bosch: Sieci wymiany danych w pojazdach samochodowych. WKiŁ, Warszawa 2002.
- [5] Kost G., Nierychłok A.: Napęd hybrydowy. Koncepcja sterowania, Przegląd Mechaniczny 2010.
- [6] Kost G., Nierychłok A.: Napęd hybrydowy. Analiza stanu aktualnego, Przegląd Mechaniczny 2010.
- [7] Norma ISO 11898: CAN specification – version 2.0, Robert Bosch GmbH, 1991.

THE APPLICATION OF CAN BUS IN A HYBRID VEHICLE

Abstract: This paper presents the application of CAN bus in a vehicle based on a hybrid propulsion system. Describes control system structure and communication between different units of propulsion, intermediary devices and the fundamental issues of building such a network.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Arkadiusz MEŻYK – OBRUM sp. z o.o., Gliwice