

dr hab. inż. Gabriel Kost, prof. Pol. Śl.

mgr inż. Andrzej Nierychlok

Institut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów
Wytwarzania, Politechnika Śląska

SYMULACJA STEROWNIKA NAPĘDU HYBRYDOWEGO POJAZDU KOŁOWEGO W OPROGRAMOWANIU MATLAB/SIMULINK

W pracy przedstawiono sterowanie pojazdem kołowym wyposażonym w napęd hybrydowy elektryczno-spalinowy. Poruszono zagadnienia związane z wzajemną współpracą dwóch różnych źródeł napędu pojazdu kołowego, oraz możliwością rekuperacji energii kinetycznej. Przedstawiono algorytm sterowania, w którym uwzględniono poruszanie się pojazdu kołowego z wykorzystaniem jednego źródła napędu, lub obu jednocześnie z ograniczeniem do minimum pracy silnika spalinowego w aglomeracjach miejskich. Wykorzystano podwójne źródła magazynów energii elektrycznej: baterię akumulatorowa oraz superkondensatory.

DRIVER SIMULATION OF HYBRID POWERTRAIN VEHICLE IN THE MATLAB / SIMULINK SOFTWARE

The paper presents the control of the hybrid wheeled vehicle equipped with a ICE-electric engines. Questions connected with the mutual cooperation of two different power sources wheeled vehicle, and the possibility of recuperation of kinetic energy. Presented control algorithm, which incorporates the movement of a wheeled vehicle using a single power source, or both simultaneously with minimum engine work in urban areas. Used a double source of electricity storage: rechargeable battery and supercapacitors.

1. WPROWADZENIE

Początki motoryzacji związane są z wynalazkami Otta, Benza oraz Diesla, czyli silnikami cieplnymi o spalaniu wewnętrznym. Wynalazki te sięgają drugiej połowy XIX wieku. Wraz z wynalezieniem silników spalinowych trwały nieustanne prace nad silnikami elektrycznymi, co przyczyniło się na początku XX wieku do podziału pojazdów kołowych na te zasilane silnikiem spalinowym oraz te zasilane silnikiem elektrycznym.

Szybki rozwój silników spalinowych oraz w miarę niska cena paliwa i jego dostępność rynkowa sprawiły, że napędy elektryczne nie rozwijały się w taki sam dynamiczny sposób jak napędy spalinowe. Główną przyczyną hamującą upowszechnianie się napędów elektrycznych w pojazdach kołowych była mała wydajność akumulatorów o znacznej masie własnej (tzw. energetyczny współczynnik masowy), które wymagały częstego, wielogodzinnego ładowania [1]. Największym problemem w adaptacji silników elektrycznych do zasilania samochodów, jest sposób pozyskiwania i magazynowania energii elektrycznej, dlatego wdrożenie na szeroką skalę pojazdu kołowego z napędem elektrycznym, napotyka na następujące przeszkody [3]:

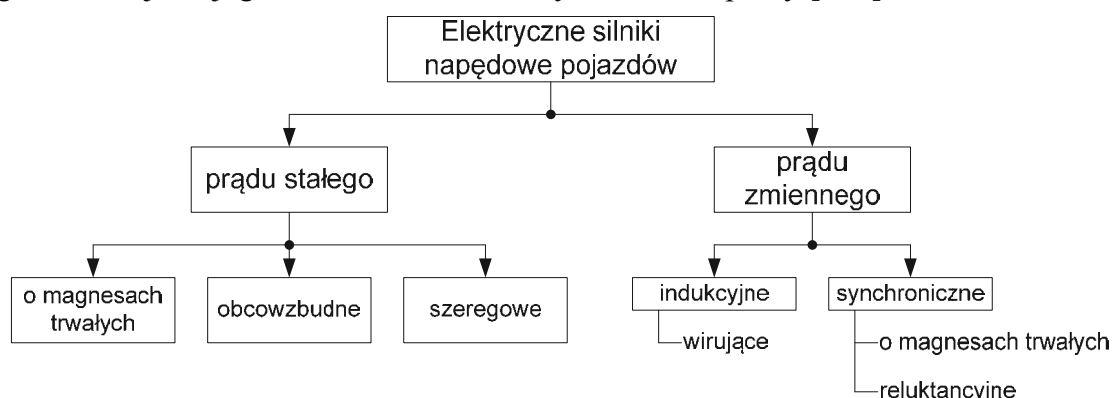
- samochód elektryczny zasilany prądem z silowni spalających węgiel, gaz czy ropę naftową umożliwia poprawę warunków ekologicznych na obszarze jego eksploatacji, nie polepszając w odczuwalnym stopniu zanieczyszczenia atmosfery globalnie, dla całego obszaru Ziemi; rzeczywista poprawa może być odczuwalna dopiero po opanowaniu pozyskiwania energii elektrycznej na dużą skalę, przy wykorzystaniu

- energii wód, wiatru, a przede wszystkim słońca,
- brak jest dotychczas wiarygodnych koncepcji utylizacji, błąd rezyrkulacji akumulatorów,
- sprawy bezpieczeństwa nie są jeszcze w pełni wyjaśnione, ponieważ zbyt mało wiadomo na temat skutków zderzenia pojazdów z akumulatorami o masie kilkuset kilogramów (np. uszkodzenia akumulatorów).

W chwili obecnej słuźnym rozwizaniem wydaje się pojazd kołowy o napędzie hybrydowym, w którym silnik spalinowy nie jest jedyną maszyną napędzającą pojazd, ale pracuje tak że jako maszyna dostarczająca energię po trzebną do ładowania akumulatorów i zasilania silnika elektrycznego.

2. SILNIK ELEKTRYCZNY W POJEZDZIE KOŁOWYM

W przeszłości silniki prądu stałego były powszechnie wykorzystywane w zastosowaniach wymagających zmiennej prędkości obrotowych z uwagi na prostotę ich sterowania, jednakże dzięki ostatnim postępom w elektronice wysokich mocy, silniki prądu przemiennego wypierają silniki prądu stałego, stając się podstawowym napędem elektrycznym. Głównym aspektem przemawiającym za wyborem silników prądu przemiennego są: większa sprawność samego silnika, jak i jego sterownika w szerszym zakresie pracy [6, 7].



Rys. 1. Silniki elektryczne stosowane do napędu pojazdów kołowych [5]

Przy doborze silnika napędowego projektowanego pod pojazd kołowy w dużej mierze decyduje [3, 5]:

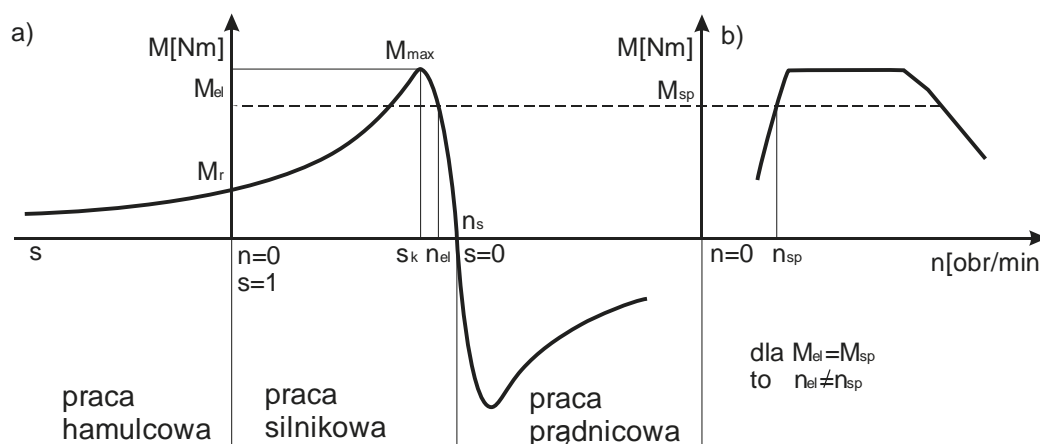
- dogodność jego charakterystyk mechanicznych,
- możliwości sterowania w obszarze pracy silnikowej i prądnicowej,
- moc jednostkowa silnika,
- sprawność energetyczna,
- niezawodność,
- koszt.

W tabeli 1 zestawiono wybrane parametry silników elektrycznych o takiej samej mocy, jednakże w różnych wykonaniach. Silniki prądu stałego obecnie są stosowane w wózkach magazynowych i przeładunkowych. Silniki prądu przemiennego trójfazowego wymagają stosowania złożonych układów sterujących i przetwarzających energię pobieraną z akumulatorów, co było główną przyczyną hamowania rozwoju tychże maszyn w pojazdach elektrycznych lub hybrydowych. Przy obecnym stanie techniki preferowane są silniki asynchroniczne i synchroniczne o zwiększonym momencie rozruchowym lub silniki zbudowane na magnesach trwałych [2,5].

Tabela 1: Porównanie silników prądu stałego oraz prądu przemiennego [5]

parametr		silniki prądu stałego		silniki prądu zmiennego	
		obcowzbudny	szeregowy	indukcyjny	o magnesach trwałych
masa	[kg]	100	115	45	39
wymiary	[cm]	43 x 30	53 x 36	30 x 30	18 x 46
maks. prędkość obr.	[obr/min]	5000	5000	15000	15000
maks. sprawność	-	0,9	0,85	0,92	0,95
koszt porównawczy	-	1	0,9	0,5	0,5
moc jednostkowa	[W/kg]	150	130	333	358

Właściwości trakcyjne samochodu elektrycznego (m.in. moment obrotowy silnika elektrycznego) dają mu dodatkową przewagę nad samochodami z napędem spalinowym. Wynika to ze specyficznego przebiegu charakterystyki momentu obrotowego silnika elektrycznego w porównaniu z silnikiem spalinowym. Maksymalny moment obrotowy w silniku elektrycznym (rys. 2) dostępny jest już od minimalnej prędkości obrotowej.



Rys. 2. Porównanie charakterystyk silników spalinowego oraz elektrycznego [6]

Do ruszania pojazdu z wykorzystaniem silnika elektrycznego nie jest wymagane sprzęgło. Zapewnia ono, że bardziej korzystne niż w przypadku silnika spalinowego w właściwości dynamiczne, zależne w ruchu miejskim od momentu obrotowego, a nie od jego mocy. O właściwościach trakcyjnych pojazdu w ruchu miejskim decydują głównie parametry silnika uzyskiwane przy prędkościach obrotowych, których wartość nie przekracza 3000 obr/min [5, 6, 7].

3. KONCEPCJA STEROWANIA POJAZDEM HYBRYDOWYM

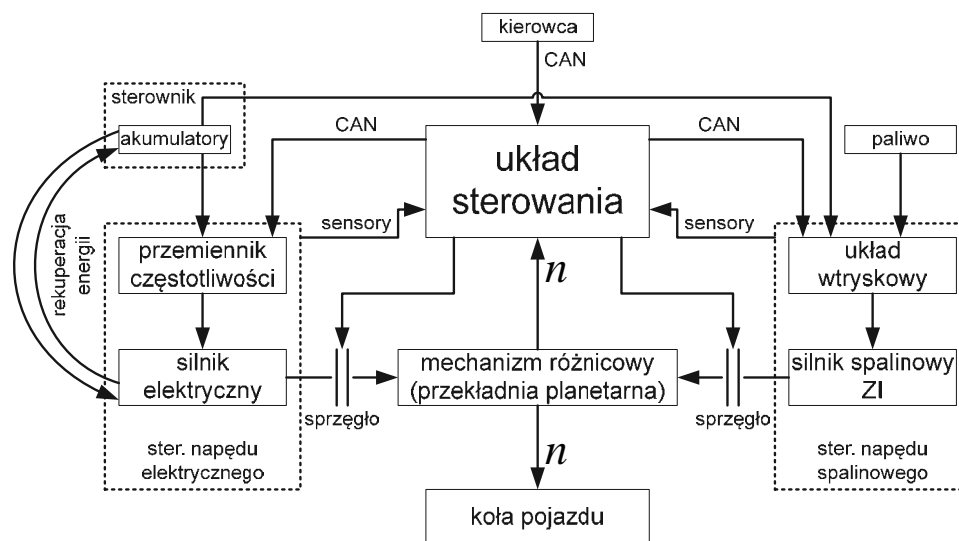
Silnik elektryczny wraz ze sterownikiem są podstawowymi elementami wyposażenia pojazdów hybrydowych i elektrycznych. W systemach napędu hybrydowego sterownik ustala wartość prądu i napięcia, które otrzymuje silnik elektryczny. Zadaniem sterownika jest pobranie sygnału położenia pedału przyśpieszenia oraz przekazanie informacji kontrolującej wartość energii elektrycznej dostarczanej do silnika. Energia ta przetwarzana jest na moment obrotowy, który w sposób pośredni (napędy hybrydowe – HEV) lub bezpośredni

(napędy elektryczne – EV) doprowadzony jest do kół napędowych pojazdu. Ostatnio coraz częściej proponuje się odzysk energii kinetycznej i jej magazynowaniu, co wpływa na zwiększenie ogólnej sprawności układu napędowego i przekłada się na mniejsze zużycie paliwa [5, 6].

Bardzo dużego znaczenia przy stosowaniu silników elektrycznych w pojazdach nabiera sam moduł sterujący. Dlatego, obecnie nie porównuje się silników elektrycznych pojazdów kołowych, dopóki nie wyposaży się ich w odpowiedni elektroniczny element sterujący, przeznaczony pod dany typ silnika elektrycznego. W skład elektrycznego napędu pojazdu EV, HEV, wchodzi [2, 5, 7]:

- prostownik – przekształca prąd przemienny AC na prąd stały DC,
- inwerter (falownik) – przekształca prąd stały DC na prąd przemienny AC,
- konwerter DC-DC (sterownik impulsowy) – powoduje wzrost lub spadek napięcia stałego, np. w celu dostosowania wysokonapięciowego systemu do pokładowego napięcia 12V,
- transformator – powoduje zmianę (podwyższenie lub obniżenie) napięcia przemiennego,
- kontroler silnika elektrycznego,
- system kontroli – układy elektroniczne sterujące przyśpieszaniem i hamowaniem pojazdu, dopływem energii od akumulatora do silnika elektrycznego, zmianą kierunku obracania się wału silnika i kontrolujące hamowanie regeneracyjne.

Na rys. 3 przedstawiono uproszczony schemat sterowania pojazdem kołowym o napędzie hybrydowym wyposażonym w jednostkę spalinową oraz elektryczną. Zamieszczono najważniejsze elementy wymagane do pracy w układzie napędu hybrydowego.



Rys. 3. Uproszczony schemat sterowania pojazdu hybrydowego [6]

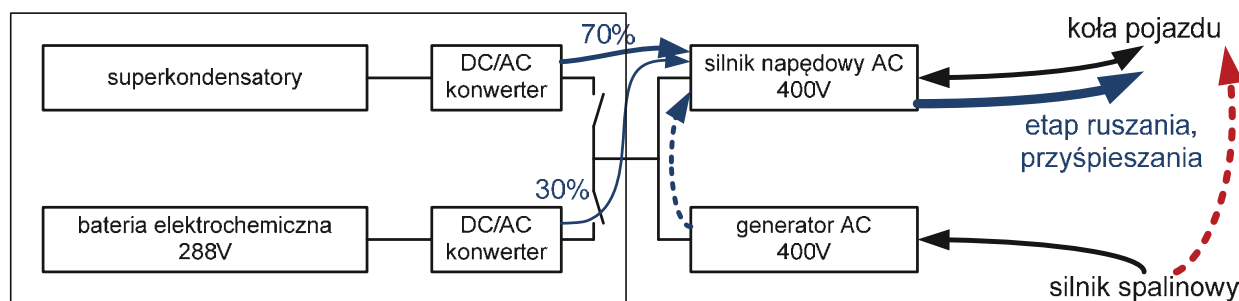
Układy sterowania urządzeń napędowych pojazdu hybrydowego (zarówno silniki elektryczne, jak i spalinowe) odgrywają podstawową rolę w spełnianiu jego funkcji ruchowych i eksploatacyjnych, umożliwiając [2, 5, 7]:

- precyzyjne sterowanie napędem przy małej prędkości pojazdu,
- uzyskiwanie żądanego przyśpieszenia do wymaganej prędkości jazdy,
- utrzymanie stałej prędkości jazdy,
- precyzyjne hamowanie elektryczne,

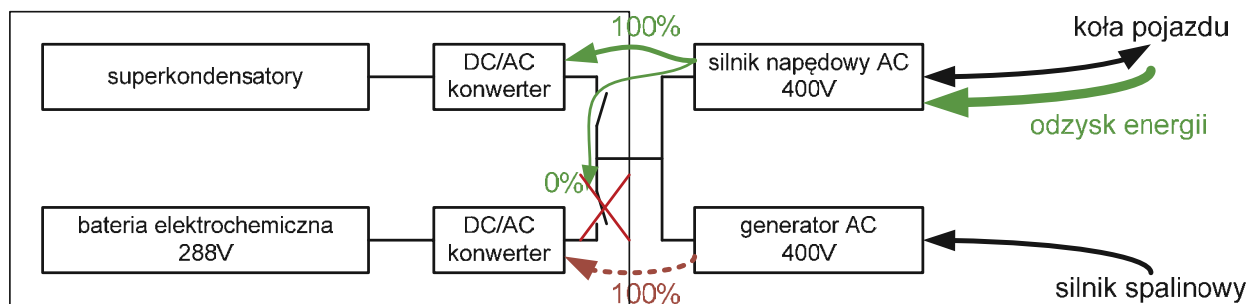
- zabezpieczenie elektrycznych podzespołów mocy przed przeciążeniem,
- najkorzystniejsze gospodarowanie energią,
- ładowanie akumulatorów elektrochemicznych oraz superkondensatorów,
- kontrolę stanu pracy głównych podzespołów napędowych.

Do głównych zadań układu sterowania należy realizacja, przewidziana zgodnie z życzeniem kierowcy, możliwych zmian stanu pracy z jednostronnym zabezpieczeniem przed ewentualnym przeciążeniem lub zmianami, które mogą wpłynąć niekorzystnie na działanie podzespołów sterowanych lub samego sterownika. W czasie poruszania się pojazdu silnik elektryczny może pracować w dwóch stanach (rys. 4, 5). Pierwszy stan to jazda silnikowa, podczas której silnik ten rozwija moment napędowy i napędza pojazd, w przeciwieństwie do jazdy wybiegowej, podczas której silnik zachowuje się biernie. Drugim stanem jest stan hamowania, w czasie którego silnik elektryczny pracuje jak o generator (praca prądnicowa), rozwijając tym samym moment hamujący pojazd i dostarczający energię służącą do ładowania akumulatorów i superkondensatorów. Hamowanie może być oporowe, gdy rezystory stanowią obciążenie lub odzyskowe (regeneracyjne), gdy energia hamowania jest przekazywana do baterii akumulatorów. W czasie hamowania, przy małych prędkościach pojazdu hybrydowego występuje problem współpracy z hamulcami ciernymi [2, 5, 7].

Sterownik mocy stanowi ogniwo pośrednie między źródłem energii (w postaci baterii akumulatorów elektrochemicznych i superkondensatorów) a silnikiem elektrycznym. Jego podstawową funkcją jest sterowanie przepływem energii pomiędzy urządzeniami wykonawczymi, z uwzględnieniem jednoczesnego przekształcenia tej samej energii, np. z prądu stałego na prąd zmienny. W pojeździe hybrydowym źródłem energii jest bateria akumulatorowa, stanowiąca źródło prądu stałego, oraz po zaimplementowaniu odpowiednich procedur w sterowniku źródłem prądu może być dodatkowo silnik spalinowy, silnik elektryczny, superkondensatory, mechaniczne magazyny energii [2, 3, 5, 6, 7]. Sterownik mocy pełni rolę urządzenia dopasowującego, umożliwiającego sterowany przepływ energii w obu kierunkach, z uwzględnieniem warunków prądowo-napięciowych. Z tego względu często jest on nazywany przetwornikiem mocy. Zastosowanie napędu hybrydowego w pojeździe elektrycznym pozwala na zmniejszenie rozmiarów akumulatorów i zwiększenie zasięgu pojazdu [5, 7].



Rys. 4. Uproszczony schemat sterowania przepływem energii dla etapu ruszania i przyspieszania pojazdu kołowego [7]



Rys. 5. Uproszczony schemat sterowania przepływem energii dla etapu rekuperacji energii kinetycznej pojazdu kołowego [7]

Zadania układu sterowania pojazdu hybrydowego w głównej mierze opierają się na zadaniach zewnętrznych i wewnętrznych. Do zadań zewnętrznych (trakcyjnych – zależnych w głównej mierze od kierowcy) należą [2, 3, 5]:

- sterowanie silnikiem napędowym podczas przyspieszania, jazdy ustalonej i hamowania,
- sterowanie rekuperacją (odzyskiwaniem) energii,
- kontrola stanu urządzeń napędowych,
- informowanie kierowcy o warunkach napięciowo-prądowych w zewnętrznych obwodach mocy.

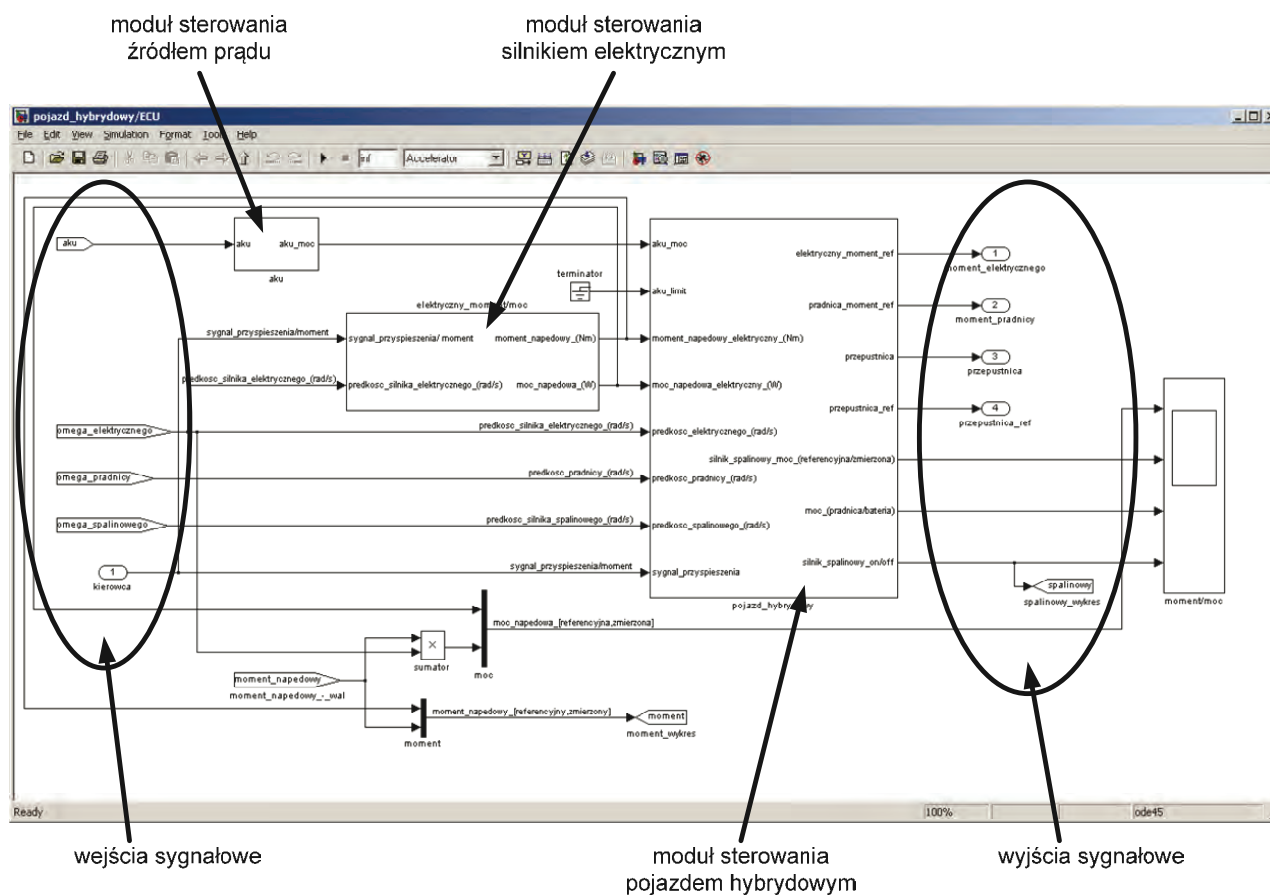
Do zadań wewnętrznych (dotyczą w głównej mierze źródła energii, oraz są ograniczone do działań kierowcy) należą [4]:

- utrzymywanie silnika spalinowego w zaprogramowanym stanie pracy podczas wszystkich stanów obciążenia, lub z góry w ustalonych stanach obciążenia,
- utrzymywanie właściwego stanu naładowania akumulatorów energii,
- sterowanie rozdziałem mocy wewnątrz pojazdu,
- informowanie kierowcy o stanie pracy urządzeń.

Podstawowym zadaniem układu sterowania jest utrzymywanie silnika spalinowego w najkorzystniejszych warunkach pracy (niekoniecznie przy maksymalnym momencie napędowym) oraz stanem naładowania akumulatorów przez sterowanie rozdziałem energii [4, 5]. W klasycznym układzie napędowym można wpływać na zminimalizowanie zużycia paliwa, a przez to na zmniejszenie toksyczności spalin, m.in. przez dobór przełożeń. Układ taki ma zastosowanie w pojeździe poruszającym się w warunkach względnie stabilnego natężenia ruchu. Podczas jazdy w zagałęszczonym ruchu, szczególnie w ruchu miejskim, układy takie mogą okazać się rozwiązaniem niewłaściwym, zarówno z ekonomicznego, jak i ekologicznego punktu widzenia, gdyż trudno zapewnić pracę silnika w obszarze wysokich sprawności przy zmiennej parametrach ruchu (moment i prędkość obrotowa koła samochodowego). Zjawisko niezgodności występuje niezależnie od dysponowanej liczby przełożeń skrzynki przekładniowej.

4. MODEL UKŁADU STEROWANIA POJAZDEM HYBRYDOWYM

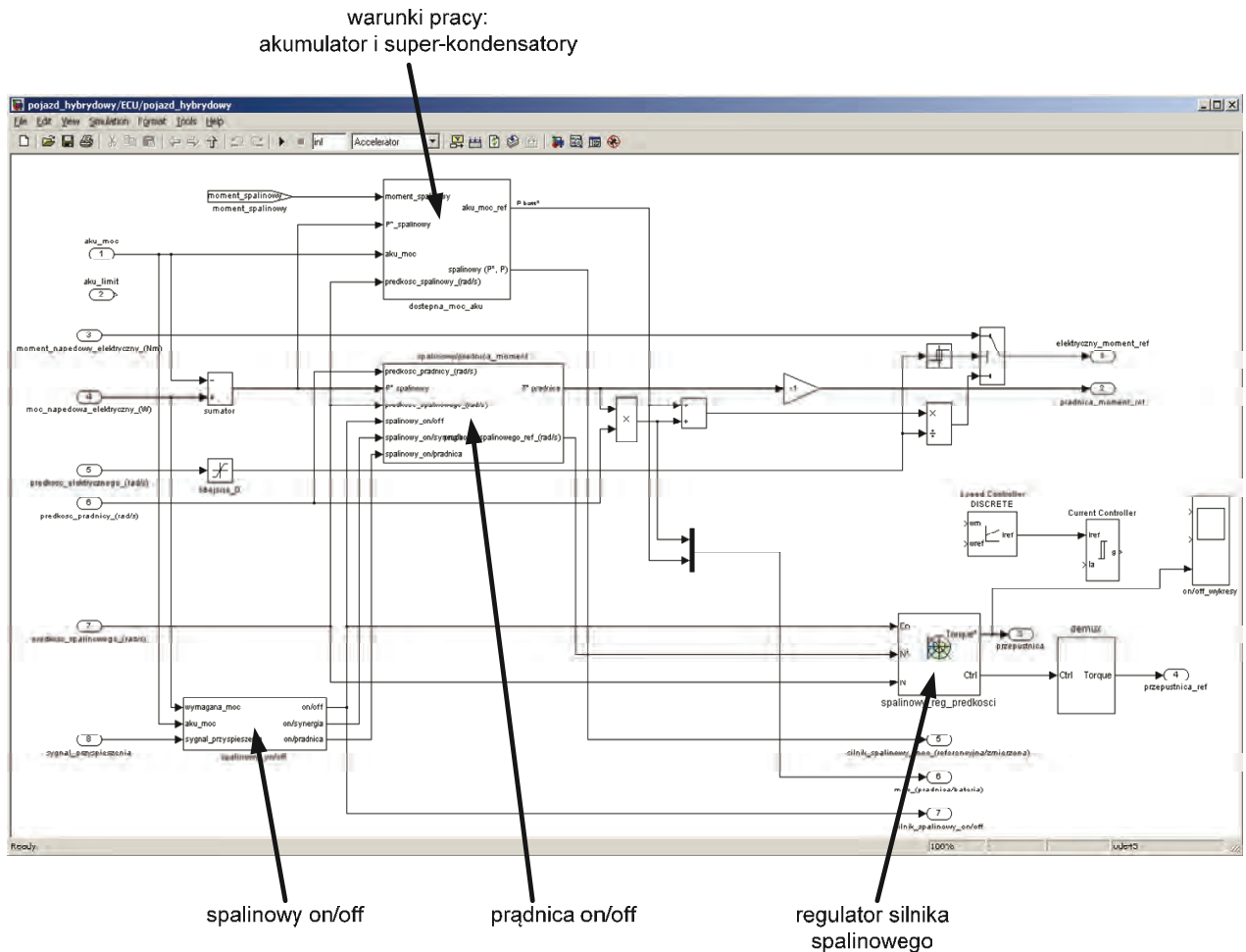
Na rys. 6 przedstawiono wirtualny układ sterowania pojazdem kołowym o napędzie hybrydowym, wyposażonym w silnik spalinowy oraz elektryczny.



Rys. 6. Model wirtualnego sterownika pojazdu hybrydowego

Z koncepcji układu sterowania możemy wyróżnić układ wejść sygnałowych po lewej stronie, oraz układ wyjść po prawej stronie. Wirtualny sterownik podzielony został na pewne moduły związane z baterią i akumulatorami oraz superkondensatorami, układem sterowania silnikiem elektrycznym trakcyjnym oraz modułem sterującym napędem hybrydowym. Takie rozmieszczenie elementów oraz klasyfikacja modułów jest wymagana w tak skomplikowanym systemie sterowania jakim jest pojazd kołowy o napędzie hybrydowym. Podział pewnych elementów na moduły poprawia wzajemną komunikację poprzez celowe przypisanie pewnych sygnałów, regulatorów i nastawników do konkretnego modułu sterującego. Opracowanie takiego układu sterowania wydaje się być jak najbardziej wskazane poprzez swoją przejrzystość co przyczynia się do efektywniejszej analizy oraz rozbudowy układu sterowania.

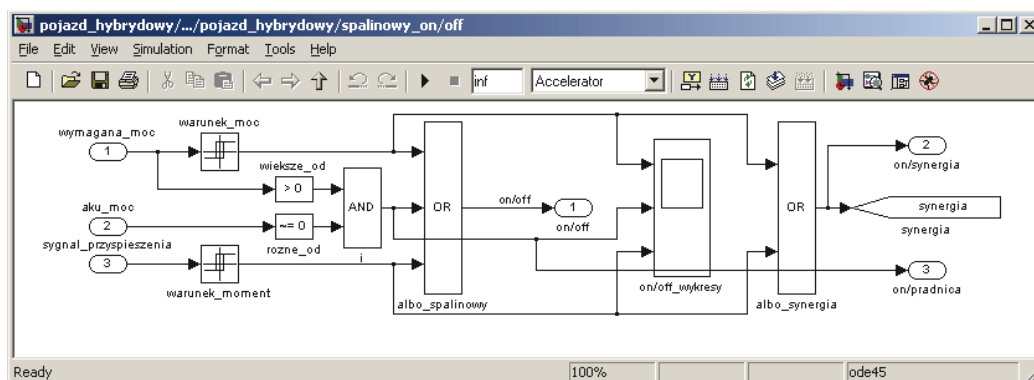
Rys. 7 przedstawia kompletny moduł sterowania pojazdem hybrydowym. W module tym uwzględniono warunki pracy dla poszczególnych jednostek napędowych, baterii elektrochemicznej i superkondensatorów oraz prądnic. Za poprawną pracę silnika spalinowego odpowiada regulator PI [4].



Rys. 7. Moduł sterowania pojazdem hybrydowym

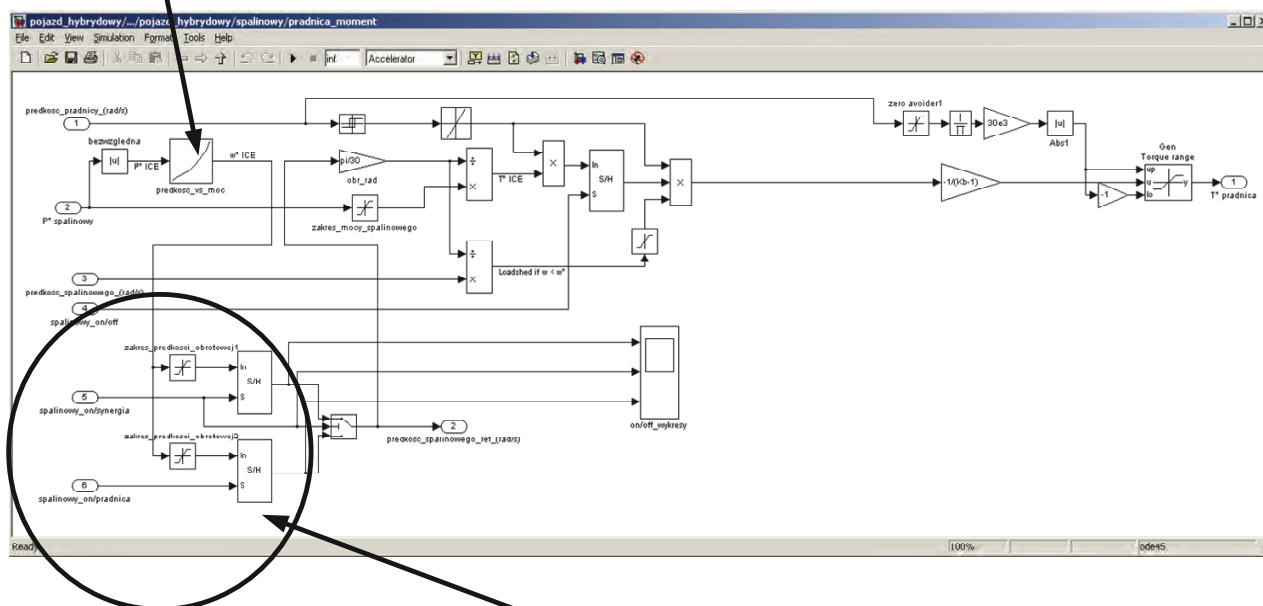
Rys. 8 przedstawia warunki pracy dla silnika spalinowego. W koncepcji przyjęto trzy możliwe warunki pracy silnika spalinowego. Warunek mocy opisuje wartość mocy potrzebnej do napędu pojazdu kołowego. Wartość mocy przy której silnik spalinowy wspomaga jednostkę elektryczną ustalono na 12 kW. W warunku tym brak jest także ograniczenia prędkości obrotowej jednostki spalinowej. Kolejnym warunkiem jest warunek momentu napędowego potrzebnego do przyspieszenia pojazdu kołowego. W warunku tym sygnałem sterującym jest sygnał pedału przyspieszenia, w którym wartość powinna przekroczyć 0,9 wartości całkowitego wychylenia przyśpiesznika. W warunku tym także nie uwzględniono ograniczenia prędkości obrotowej silnika spalinowego. Ostatnim warunkiem jest warunek rozładowania jednostki elektrochemicznej poniżej przyjętego minimum. Jeżeli wartość rozładowania akumulatorów spadnie do poziomu SOC 40 %, wtedy silnik elektryczny napędza tylko i wyłącznie generator. Prędkość obrotowa została ograniczona do wartości 3000 obr/min. z uwzględnieniem priorytetu dla najwyższej sprawności – najmniejszego jednostkowego zużycia paliwa [4].

Na rys. 9 przedstawiono moduł sterujący prądnicą z uwzględnieniem warunków pracy jednostki spalinowej. Blok „charakterystyka silnika spalinowego” odpowiada za pracę silnika spalinowego w zakresie najwyższej sprawności. Uwzględniono także warunki wyboru pracy pomiędzy napędem prądnicą oraz wspomaganie jednostki elektrycznej lub tylko napędem pojazdu kołowego przy wykorzystaniu silnika spalinowego.



Rys. 8. Warunki pracy silnika spalinowego

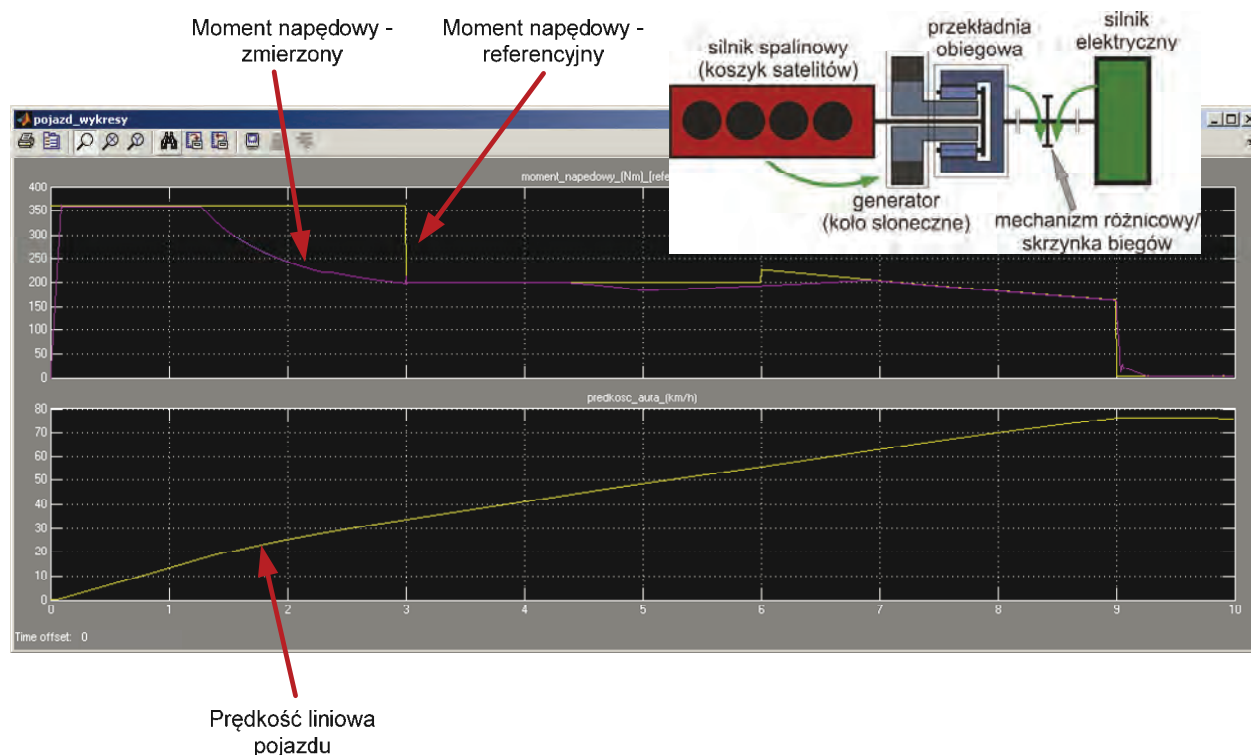
charakterystyka silnika spalinowego



warunki pracy silnika spalinowego: synergia lub napęd prądnicy

Rys 9. Moduł sterujący prądnicą w hybrydowym układzie napędowym

Na rys. 10 przedstawiono wyniki symulacji wirtualnego sterownika pojazdu kołowego o napędzie hybrydowym. Wykres przedstawia charakterystykę momentu napędowego na kołach pojazdu, z uwzględnieniem synergii energii silnika spalinowego oraz elektrycznego (krzywa purpurowa). Zauważyć można, że w fazie ruszania pojazdu moment napędowy przekazywany jest od silnika elektrycznego, który praktycznie od początku ruszania jest maksymalny i stały. Po czasie 5 s (tj. w czasie dla którego prędkość pojazdu wynosi > 50 km/h) silnik spalinowy wspomaga silnik elektryczny, widoczne jest to na krzywej momentu zmierzzonego, która nieznacznie narasta by pokryć zapotrzebowanie na siłę napędową (krzywa koloru żółtego). Część druga wykresu przedstawia prędkość pojazdu kołowego uzyskaną w czasie 9 s, oraz utrzymywanie prędkości zadanej.



Rys. 10. Wyniki symulacji dla synergii energii silnika spalinowego i elektrycznego

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono koncepcję układu sterowania napędem hybrydowego pojazdu kołowego w oprogramowaniu MatLab/Simulink. Opisano także założenia, które muszą zostać spełnione przy sterowaniu napędem hybrydowym spalinowo-elektrycznym oraz podstawiono najważniejsze warunki pracy takiego układu napędowego. Przedstawiony układ sterowania został zamodelowany w sposób uporządkowany i przejrzysty, tj. podzielony na moduły odpowiadające za każdy sterowany element w napędzie hybrydowym.

Układ sterowania pojazdem kołowym wyposażonym w dwie jednostki napędowe nie jest zadaniem prostym. Wiele trudności w sterowaniu takim napędem hybrydowym sprawia złożony algorytm sterowania, dla którego należy uwzględnić wiele czynników, tj. ruszanie pojazdu kołowego, jazda ze stałą prędkością, przyspieszanie, hamowanie, rekuperacja energii, układ źródła energii elektrycznej. Dla każdego z tych czynników należy uwzględnić poruszanie się na jednej jednostce napędowej, lub jako synergię energii wykorzystać oba źródła energii. W pracy zostało to poruszone i przedstawiony algorytm sterowania uwzględnia wszystkie wyżej wymienione aspekty. Do tego przedstawiono także podwójne źródło energii elektrycznej: akumulatory elektrochemiczne oraz superkondensatory. Przedstawiono także innowacyjne podejście do warunków sterowania oraz pracy silnika spalinowego, co powinno przyczynić się do zmniejszonego zużycia paliwa i tym samym do mniejszej ilości substancji toksycznych wydalananych przez silnik do atmosfery.

Problemem, który wymaga głębszej analizy jest sposób połączenia pomiędzy jednostkami napędowymi, uwzględniający brak przenoszonych drgań na karoserię samochodu i tym samym na odczucia pasażerów w czasie jazdy.

Praca finansowana z grantu badawczo-rozwojowego nr PBR-6/RMT2/2010: Mechatroniczny integrator procedur sterowania pojazdem przez osoby niepełnosprawne (decyzja MNiSzW nr 0894/R/T02/2010/10).

Praca była współfinansowana ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Projektu „Aktywizacja społeczności akademickiej jako element realizacji Regionalnej Strategii Innowacji” POKL.08.02.01-24-019/08”.

BIBLIOGRAFIA

1. G. Jastrzębska: „Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne”, Warszawa, WNT, 2007.
2. J. Larmine, J. Lowry: „Electric vehicle technology explained”, England, John Wiley & Sons, 2003.
3. J. Merkisz, I. Pielecha: „Alternatywne napędy pojazdów”, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006.
4. G. Kost, A. Nierychlok: „Sterowanie silnikiem spalinowym w pojeździe kołowym o napędzie hybrydowym”, Konferencja Naukowa „Nauka i przemysł”, Kraków, 2010, w druku.
5. K. Michałowski, J. Ocieciński: „Pojazdy samochodowe o napędzie elektrycznym i hybrydowym”, Warszawa, WKiŁ, 1989.
6. G. Kost, A. Nierychlok: „Napęd hybrydowy. Koncepcja sterowania”, Przegląd Mechaniczny, w druku.
7. G. Kost, A. Nierychlok: „Przepływ energii w pojeździe kołowym o napędzie hybrydowym wyposażonym w akumulatory elektrochemiczne oraz superkondensatory”, Konferencja Naukowa „Problemy rozwoju maszyn roboczych”, Zakopane, 2011, w druku.