

Wirtualny adaptacyjny algorytm sterowania układem napędowym pojazdu kołowego

Gabriel Kost, Andrzej Nierychlok

Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania,
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

Streszczenie: W pracy przedstawiono model wirtualnego układu napędowego pojazdu kołowego z adaptacyjnym algorytmem sterowania pracą jednostek napędowych: silnika spalinowego oraz elektrycznego. W pracy wyszczególniono też algorytm sterowania jednostką spalinową jako źródłem energii pierwotnej w spalinowo-elektrycznym układzie napędowym. Wykorzystano także synergię energii silnika spalinowego i elektrycznego do napędu pojazdu kołowego.

Słowa kluczowe: sterowanie adaptacyjne, algorytm, układ napędowy

1. Wprowadzenie

Sterowanie układem napędowym pojazdu kołowego, wyposażonego w jednostkę spalinową i elektryczną, jest niezwykle trudne w praktyce. Konieczne jest przyjęcie wielu kryteriów związanych z samym ruchem pojazdu kołowego (w szczególności siły zewnętrzne działające na pojazd – opory ruchu), oraz przyjęcie odpowiednich algorytmów sterujących pracą obu silników napędowych. Także odpowiedni dobór oraz warunki włączania silnika spalinowego są bardzo istotne w ciągłej i nieprzerwanej pracy całego układu napędowego. To właśnie silnik spalinowy (pierwotne źródło energii) odpowiedzialny jest za dostarczenie energii elektrycznej do silnika elektrycznego, baterii elektrochemicznej, a w ekstremalnych sytuacjach także do wspomagania jednostki elektrycznej poprzez synergię energii. Silnik spalinowy, pracujący w zakresie obrotów optymalnych (dla których w pracy przyjęto kryterium najmniejszego jednostkowego zużycia paliwa oraz najmniej produkowanych substancji toksycznych), napędza pojazd kołowy i/lub generator elektryczny. Wyżej wymienione zagadnienia zostały przedstawione w pracach autorów [4, 5, 6, 7].

Dobór odpowiedniego algorytmu sterowania oraz kryteriów z nim związanych jest niewątpliwie trudny. Wiele niewiadomych, pochodzących głównie od sił i momentów działających na pojazd (sygnałów zakłócających), nie może zostać pominięte w algorytmie sterowania. W większości przypadków są to zjawiska nieliniowe szybkozmiennne. Dlatego opracowanie konwencjonalnego algorytmu sterowania jest praktycznie niemożliwe. W takim przypadku należy skorzystać z alternatywnych rozwiązań: w pracy przyjęto sterowanie adaptacyjne.

2. Sterowanie adaptacyjne pojazdem kołowym spalinowo-elektrycznym

Sterowanie formalnie zajmuje się podstawami analizy oraz projektowania systemów sterowania i zarządzania. Jednym z najważniejszych etapów związanych ze sterowaniem pewnych obiektów jest przygotowanie oraz zaprojektowanie algorytmów sterujących, które pozwalają wyznaczyć decyzje realizowane przez urządzenia sterujące. Niejednokrotnie algorytm sterowania wyposażony jest w pewne procedury związane z urządzeniami technicznymi, dzięki którym na bieżąco zbierane są informacje o obiekcie oraz późniejsze ich przetwarzanie i podejmowanie decyzji [1, 2, 3].

W sterowaniu adaptacyjnym z góry zakłada się, że istnieje już pewien podstawowy algorytm sterowania, natomiast dodatkowe informacje wykorzystywane są do stopniowego polepszania algorytmu podstawowego. Sterowanie adaptacyjne zalicza się do koncepcji systemów parametrycznych, tzn. poprawianie algorytmu sterowania polega na zmianie wybranych parametrów ze zbioru możliwych wartości dla algorytmu podstawowego (systemu odpornego). Poprawę parametrów wprowadza się po to, aby dostosować algorytm podstawowy do sterowanego obiektu. Stąd właśnie pochodzi nazwa sterowania adaptacyjnego [1, 2, 3].

Adaptacja potrzebna, a niekiedy wymagana, jest wtedy, gdy z powodu niepewności nie zaprojektowano algorytmu podstawowego w taki sposób, aby działał on optymalnie lub wtedy, kiedy obiekt ciągle zmienia się, a przyjęte dane w procesie projektowania nie uwzględniają pewnych krytycznych informacji lub przestają być aktualne.

Algorytm sterowania w systemie adaptacyjnym składa się z (rys. 1) [2, 3]:

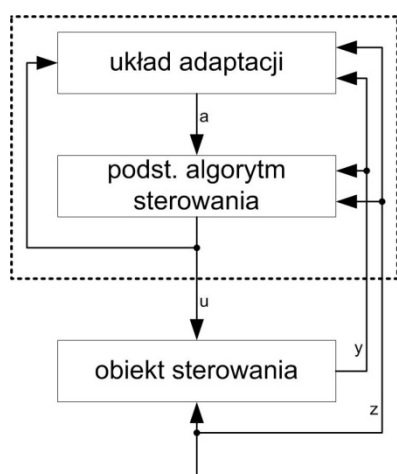
- algorytmu podstawowego,
- algorytmu adaptacji, tzn. algorytmu poprawiającego algorytm podstawowy.

Wyróżnić można w systemie sterującym dwa poziomy [2, 3]:

- poziom niższy, na którym działa podstawowe urządzenie sterujące. Układ bezpośrednio przyjmuje dane z obiektu i wyznacza decyzje sterujące [4],
- poziom wyższy, na którym działa układ adaptacyjny.

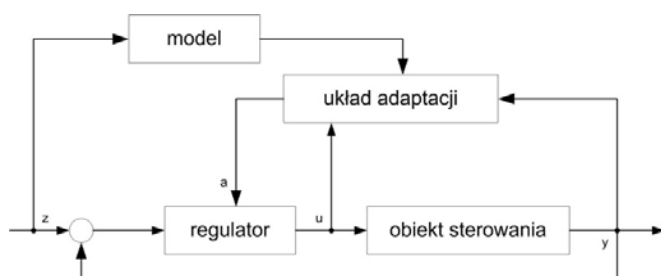
Schemat pokazany na rys. 1, przedstawia ogólnie algorytm sterowania adaptacyjnego. W pracy przyjęto pewien model sterowania adaptacyjnego opartego na układzie adaptacyjnym z modelem odniesienia (*model-reference*

adaptive system). Model takiego systemu sterowania przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Schemat podstawowej idei algorytmu adaptacji

Fig. 1. Diagram of the basic idea of adaptive algorithm



Rys. 2. Schemat blokowy układu adaptacyjnego z modelem odniesienia

Fig. 2. Block diagram of reference-model adaptive algorithm

W układzie adaptacyjnym z modelem odniesienia możemy wyróżnić dwie pętle sprzężenia zwrotnego:

- wewnętrzna lub podstawowa – złożona z procesu i regulatora,
- zewnętrzna lub adaptacyjna – do zmiany ustawień regulatora, mechanizm dostrajania parametrów przebiega na podstawie sprzężenia od błędu, który jest różnicą między wyjściem układu, a wyjściem modelu odniesienia.

Mechanizm dostosowywania parametrów może być otrzymany za pomocą:

- metod gradientowych,
- przy użyciu metod stabilności Lapunowa.

W pracy posłużono się badaniem stabilności układu metodą Lapunowa, szczegółowo opisaną przez autorów w następujących pracach [8, 9].

2.1. Przyjęte założenia sterowania adaptacyjnego

Uwzględniając w algorytmie sterowania przyjęte założenie adaptacji (rys. 2), zbudowano model pojazdu kołowego spalinowo-elektrycznego w oprogramowaniu MATLAB/Simulink, w którym algorytm układu adaptacyjnego steruje układem napędowym. Wirtualny model pojazdu

kołowego spalinowo-elektrycznego zbudowano przyjmując następujące założenia:

- rzeczywisty pojazd porusza się wyłącznie w aglomeracjach miejskich,
- silnik spalinowy to jednostka o pojemności 1.0 l rozwijająca moc maksymalną 40 kW,
- silnik elektryczny to maszyna elektryczna typu PMSM o mocy 50 kW,
- generator elektryczny to także konstrukcja zbudowana na bazie PMSM o mocy 30 kW [4,5].

Zgodnie z założonym adaptacyjnym algorytmem przyjęto następujące sterowanie silnikiem spalinowym:

- poziom adaptacji,
- poziom podstawowy – regulacji.

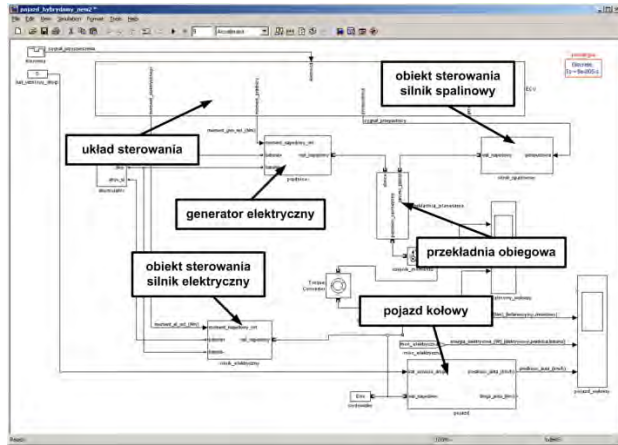
W pracy wyróżniono trzy kryteria regulacji silnika spalinowego:

- etap pracy silnika spalinowego napędzającego tylko i wyłącznie generator elektryczny,
- etap pracy silnika spalinowego wspomagającego silnik elektryczny (zapotrzebowanie na moc i moment),
- etap pracy silnika spalinowego napędzającego pojazd kołowy.

Głównym kryterium adaptacji jest dopasowanie układu napędowego, w tym szczególnie jednostek napędowych, do zmiennych warunków drogowych (warunki zewnętrzne), jak i warunków energetycznych (warunki wewnętrzne). Warunki zewnętrzne odpowiadają za sprawne poruszanie się pojazdu kołowego (siła napędowa i moc występująca na kołach napędowych musi zapewnić dostatecznie sprawne poruszanie się pojazdu). Z kolei warunki wewnętrzne odpowiadają ściśle za przepływ mocy i energii w systemie hybrydowym między kolejnymi źródłami energii. Stąd koncepcja sterowania adaptacyjnego pojazdem kołowym spalinowo-elektrycznym jest konieczna. Moc i moment napędowy, pochodzący z układu napędowego jest ściśle określony i w większości przypadków służy do pokonania oporów ruchu pojazdu kołowego. Regulacja kierowcy przez odpowiednie wychylenia pedału przyspieszenia lub hamowania w konwencjonalnym układzie napędowym skutkuje jednoznacznym otwarciem przepustnicy w układzie dolotowym silnika spalinowego, a siła hamowania zależy od siły nacisku kierowcy na pedał hamulca. Nasuwa się prosty wniosek: regulatorem w konwencjonalnym układzie napędowym jest kierowca, a sygnały pochodzące od jego ruchów (sygnały sterujące) są wzmacniane i przekazywane do urządzeń roboczych, czyli układ takiego sterowania można porównać do regulatora typu „P”. W układzie hybrydowym takie rozwiązanie jest nie do przyjęcia, gdyż od wychylenia pedału przyspieszenia zależy nie tylko kąt otwarcia przepustnicy ($\varphi=0\div 90^\circ$, lub jak przyjęto w pracy $0\div 1$, gdzie 0 – przepustnica zamknięta, 1 – przepustnica całkowicie otwarta), lecz także od regulatora silnika elektrycznego.

Na rys. 3 przedstawiono model pojazdu kołowego elektryczno-spalinowego, w którym wyszczególniono podstawowe elementy układu napędowego wirtualnego pojazdu kołowego. Obiektem sterowania jest układ napędowy: silnik spalinowy, połączony za pomocą przekładni obiegowej z generatorem elektrycznym oraz silnik elektryczny.

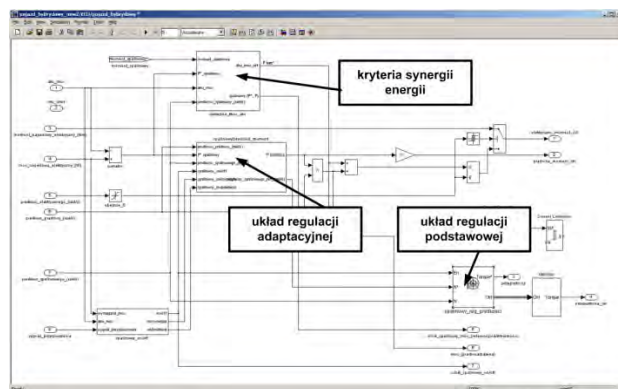
Połączenie silnika spalinowego i silnika elektrycznego za pomocą przekładni obiegowej odpowiada koncepcji połączenia równoległego jednostek napędu elektryczno-spalinowego. Przy takim rozwiązaniu silnik spalinowy napędza zarówno pojazd kołowy, jak i generator elektryczny, a silnik elektryczny może wspomagać silnik spalinowy.



Rys. 3. Model pojazdu hybrydowego w oprogramowaniu MATLAB/Simulink

Fig. 3. Hybrid vehicle model in MATLAB/Simulink

Na rys. 4 przedstawiono układ sterowania, w którym zaimplementowany został układ regulacji adaptacyjnej oraz układ regulacji podstawowej wraz z kryteriami opisującymi synergię energii obu jednostek napędowych. Regulacja silnika spalinowego polega na odpowiednim otwieraniu i przamykaniu elektronicznie przepustnicy. Pomiar prędkości obrotowej wału korbowego silnika spalinowego w pętli sprzężenia zwrotnego dostarcza układowi sterowania informacji niezbędnej do określenia kryterium pracy jednostki spalinowej. Zadaniem układu adaptacyjnej regulacji jest nadzór nad pracą silnika spalinowego w zależności od przyjętych kryteriów oraz chwilowego zapotrzebowania na moc i moment napędowy. Chwilowe zapotrzebowanie na moc i moment napędowy zależy jest od przyjętego algorytmu podstawowego i zależy od warunków zewnętrznych (warunki drogowe, takie jak: kąt wzniosu drogi, opory ruchu pochodzące od sił aerodynamicznych itp.).



Rys. 4. Układ sterowania pojazdem hybrydowym

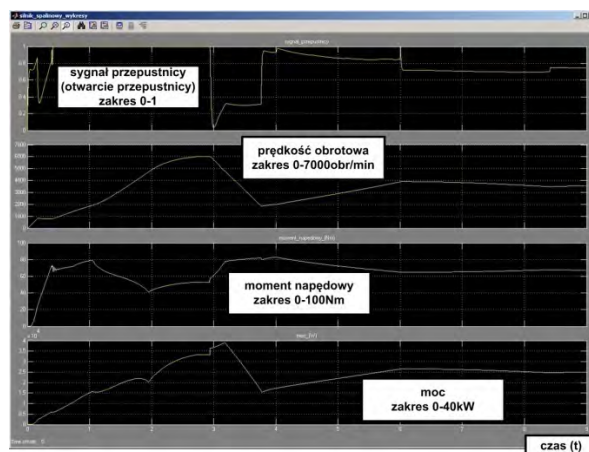
Fig. 4. Hybrid vehicle control system

Na rys. 5 przedstawiono układ regulacji adaptacyjnej z przyjętą szczegółową mapą jednostkowego zużycia paliwa dla silnika spalinowego. Adaptacja polega więc na odpowiednim doborze takiej prędkości obrotowej silnika spalinowego, dla której osiąga się najmniejsze jednostkowe zużycie paliwa przy odpowiednim ciśnieniu użytecznym. Adaptator uwzględnia więc pracę silnika spalinowego jako maszyny napędzającej generator elektryczny oraz jako silnika napędzającego pojazd kołowy.



Rys. 5. Układ regulacji adaptacyjnej

Fig. 5. Adaptive control system



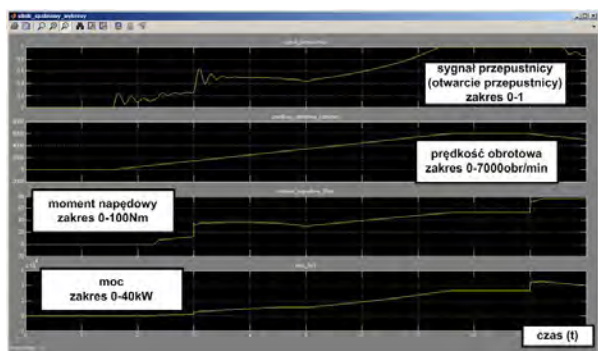
Rys. 6. Wyniki symulacji dla układu sterowania bez algorytmu adaptacji

Fig. 6. Sim results without adaptation algorithm

Na rys. 6 i rys. 7 przedstawiono wyniki symulacji wykonanej w oprogramowaniu MATLAB/Simulink. Wyniki symulacji przedstawiają parametry silnika spalinowego w funkcji czasu symulacji (od góry):

- sygnał otwarcia przepustnicy dla której zakres regulacji wynosi 0-1,
- prędkość obrotową silnika spalinowego dla którego wielkość na drugim schemacie zawarto w zakresie 0-7000 obr/min.,
- moment napędowy (zakres 0-100 Nm),
- moc (0-4x10⁴ W).

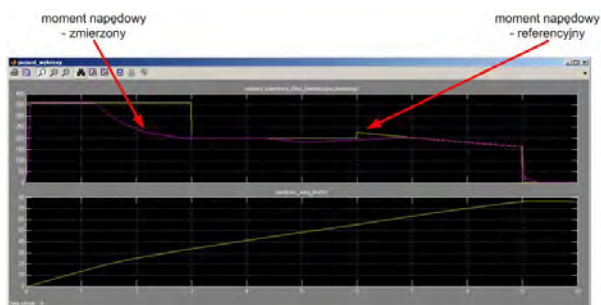
Zauważalna jest znacząca poprawa pracy silnika spalinowego (rys. 7) z sterowaniem adaptacyjnym w stosunku do pracy, bez uwzględnienia odpowiednich adaptacyjnych procedur sterujących (rys. 6). Silnik spalinowy łagodniej wchodzi na obroty oraz utrzymuje wartość prędkości obrotowej zadanej dla konkretnego warunku pracy.



Rys. 7. Wyniki symulacji dla układu sterowania z algorytmem adaptacji

Fig. 7. Sim results with adaptation algorithm

Możemy wyróżnić trzy stany pracy silnika spalinowego: uruchomienie silnika spalinowego występujące w zakresie do ok. 2,2 sek. trwania symulacji, obciążenie od generatora elektrycznego zauważalny jest niewielki wzrost momentu i mocy wytworzonej przez silnik spalinowy, następnie wspomaganie silnika elektrycznego (synergia energii) widoczne po 3 sek. symulacji oraz nagłym wzrostem momentu napędowego generowanego przez silnik spalinowy. Ostatni etap to przełączenie jednostek napędowych, czyli silnik elektryczny zostaje odłączony od napędu pojazdu kołowego, w tej chwili tylko silnik spalinowy napędza pojazd kołowy. Widoczne jest to na rys. 8, na którym przedstawiono wyniki symulacji momentu napędowego referencyjnego oraz momentu generowanego przez układ napędowy, z uwzględnieniem prędkości liniowej pojazdu kołowego.



Rys. 8. Wyniki symulacji: moment napędowy oraz prędkość liniowa pojazdu

Fig. 8. Sim results: torque and linear speed of the vehicle

Założone kryterium przełączenia jednostki napędowej przy prędkości 50 km/h zostało sprawdzone i potwierdzone przez niewielki spadek momentu napędowego w chwili wyłączenia silnika elektrycznego. Układ sterowania adaptacyjnego bardzo szybko dopasowuje moment napędowy do wymagań ruchu (moment referencyjny).

3. Podsumowanie

Przedstawione w pracy wyniki badań wirtualnego pojazdu kołowego pozwalają stwierdzić, że regulacja adaptacyjna w pojazdach spalinowo-elektrycznych jest niezwykle korzystna, gdyż przyczynia się do płynnej i dokładnej regulacji silnika spalinowego. Silnik spalinowy w układzie napędowym elektryczno-spalinowego pojazdu kołowego jest sterowany tylko i wyłącznie za pośrednictwem elektronicznego regulatora przepustnicy. Kierowca nie ma bezpośredniej możliwości sterowania prędkością obrotową oraz momentem generowanym przez silnik spalinowy. Odpowiednio przygotowany układ sterowania przyczynia się do optymalizacji pracy jednostki spalinowej, jednakże to układ adaptacyjny poprawia pracę silnika spalinowego. Wykorzystując adaptator do regulacji silnikiem spalinowym możliwe jest ograniczenie zużycia paliwa, a co za tym idzie zmniejszenie emisji substancji toksycznych.

3.1. Bibliografia

1. Kaczorek T.: *Teoria sterowania i systemów*, Warszawa: PWN, 1999.
2. Bubnicki Z.: *Teoria i algorytmy sterowania*. Warszawa: PWN, 2005.
3. Niederliński A., Mościński J., Ogonowski Z.: *Regulacja adaptacyjna*, Warszawa PWN 1995.
4. Kost G., Nierychłok A.: *Napęd hybrydowy. Koncepcja sterowania*. „Przegląd Mechaniczny”, 03, 2011.
5. Kost G., Nierychłok A.: *Zastosowanie magistrali CAN w pojeździe kołowym z napędem hybrydowym*. „Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe”.
6. Kost G., Nierychłok A.: *Przeptyw energii w pojeździe kołowym o napędzie hybrydowym wyposażonym w akumulatory elektrochemiczne oraz superkondensatory*, w druku.
7. Kost G., Nierychłok A.: *Sterowanie silnikiem spalinowym jako źródłem energii pierwotnej w hybrydowym układzie napędowym*, w druku.
8. Kost G., Nierychłok A.: *Badanie hybrydowego układu napędowego wg stabilności Lapunowa*, w druku.
9. Kost G., Nierychłok A.: *Presentation the concept of stability of the hybrid powertrain by the Lyapunov theory*, w druku. ■

Virtual adaptive control algorithm of wheeled powertrain vehicle

Abstract: The paper presents a virtual model of a Wheeler vehicle propulsion system with an adaptive algorithm of engines: ICE and electric motor. This paper details the algorithm ICE unit as a source of primary energy in the propulsion system, and used the synergy of energy.

Keywords: adaptive control, algorithm, powertrain

dr hab. inż. Gabriel Kost (ur. 17.02.1960 r.) jest profesorem nadzwyczajnym w Instytucie Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej i kierownikiem Zakładu Automatykacji i Robotyzacji Procesów Technologicznych.



W swoich zainteresowaniach naukowo-badawczych koncentruje się na zagadnieniach automatyzacji i robotyzacji procesów technologicznych, w tym sterowania elastycznymi zrobotyzowanymi systemami produkcyjnymi oraz programowania off-line robotów przemysłowych i planowania zadań robotów.

e-mail: gabriel.kost@polsl.pl

mgr inż. Andrzej Nierychlok (ur. 27.01.1980 r.) ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym w 2008 roku. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie. Interesuje się automatyzacją i robotyzacją procesów technologicznych w tym urządzeń transportowych i robotów przemysłowych, sterowaniem maszyn CNC oraz komputerowym oprogramowaniem wspomagającym projektowanie, wytwarzanie, symulacje inżynierskie klasy CAD/CAM/CAE. W latach 2005-08 pracował w przemyśle na stanowisku technolog-konstruktor urządzeń dźwignicowych.



e-mail: andrzej.nierychlok@polsl.pl
