

---

# WYBRANE PROBLEMY INŻYNIERSKIE

NUMER 2

INSTYTUT AUTOMATYZACJI PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH  
I ZINTEGROWANYCH SYSTEMÓW WYTWARZANIA

---

Gabriel KOST\*, Andrzej NIERYCHŁOK

Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów  
Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice  
\*gabriel.kost@polsl.pl

## STEROWANIE SILNIKIEM SPALINOWYM JAKO ŹRÓDŁEM ENERGII PIERWOTNEJ W HYBRYDOWYM UKŁADZIE NAPĘDOWYM

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wirtualny układ sterowania pojazdem kołowym z napędem hybrydowym spalinowo-elektrycznym, w którym silnik spalinowy pełni rolę pierwotnego źródła energii. Zastosowanie odpowiedniego algorytmu sterowania pracą silnika spalinowego pozwala na zmniejszenie ilości substancji toksycznych wydalanych do atmosfery oraz na zmniejszenie ilości zużycia paliwa. Algorytm sterowania uwzględnia zarówno warunki zewnętrzne jak i wewnętrzne badanego układu napędowego. W oczywisty sposób sterowanie silnikiem spalinowym powinno odbywać się bez ingerencji kierowcy w pracę jednostki spalinowej. To układ sterowania powinien dobierać odpowiednią prędkość obrotową do warunków pracy silnika spalinowego z wykorzystaniem synergii energii, która to w znaczący sposób poprawia dynamikę jazdy pojazdu kołowego z napędem hybrydowym.

### 1. Wstęp

Pojazdy kołowe z napędem hybrydowym spalinowo-elektrycznym wyróżnia znaczne zmniejszenie toksycznych substancji produktów spalania pochodzących z silnika spalinowego. Uwarunkowane jest to efektywnym zarządzaniem włączaniem i wyłączaniem jednostki spalinowej. Wraz z postępowaniem techniki i sposobów automatycznej regulacji samo włączanie i wyłączanie silnika spalinowego jest niewystarczające. Ważne jest efektywne regulowanie mocą i momentem pochodzącym z jednostki spalinowej dla konkretnych warunków pracy. Dlatego postanowiono zbudować wirtualny układ sterowania napędu hybrydowego pojazdu kołowego, w którym uwzględniono różne warianty pracy jednostki spalinowej.

Pracę silnika spalinowego wyróżnia wiele stanów ustalonych lub nieustalonych, które związane są z napędzaniem pojazdu kołowego lub urządzeń elektrycznych i komfortu. Każdy z przypadków zazwyczaj oceniany jest przez różne kryteria optymalnej pracy jednostki spalinowej, które to przekładają się na własności trakcyjne pojazdu kołowego, w szczególności na moment napędowy oraz prędkość liniową pojazdu.

Dlatego w pojazdach kołowych o napędzie hybrydowym nie powinno stosować się bezpośredniego powiązania pomiędzy kątem otwarcia przepustnicy a położeniem pedału

przyśpieszenia. To układ sterowania powinien optymalnie dobierać otwarcie przepustnicy zależnie od warunków zewnętrznych i wewnętrznych. Kierowca, dając sygnał przyśpieszenia pojazdu kołowego, zmienia położenie pedału przyśpieszenia, przez co układ sterowania analizuje jego wartość (wychylenie) oraz obecnie realizowane warunki zewnętrzne i wewnętrzne, i tak steruje otwarciem przepustnicy, aby zapewnić optymalne warunki pracy jednostki spalinowej [1,2].

Analizując najczęściej spotykany przypadek pracy silnika spalinowego (stan nieustalony), stwierdza się, że zachowanie kierowcy sprowadza się do zmiany obciążenia silnika w pełnym jego zakresie w czasie krótszym niż 0.5s. Tak szybko przebiegający proces napełniania cylindrów komplikuje proces przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej, przez co znacznie wzrasta ilość substancji toksycznych powstałych w wyniku niepełnego spalania. Zarówno gwałtowne otwarcie jak i przymknięcie przepustnicy prowadzi do dużych zmian wartości momentu napędowego, co jest związane ze zmianą prędkości liniowej pojazdu kołowego [2,3,4].

Ograniczenie prędkości ruchu otwarcia przepustnicy do zadanej wartości wiąże się z bardziej łagodnym przebiegiem procesu napełniania cylindra, co bezpośrednio przekłada się na bardziej ekonomiczną oraz nieznacznie bardziej dynamiczną jazdę, a unikanie gwałtownych działań związanych z otwieraniem lub przymknięciem przepustnicy skutkuje łagodniejszym narastaniem momentu napędowego bezpośrednio wpływającego na komfort jazdy.

## 2. Model i algorytm sterowania

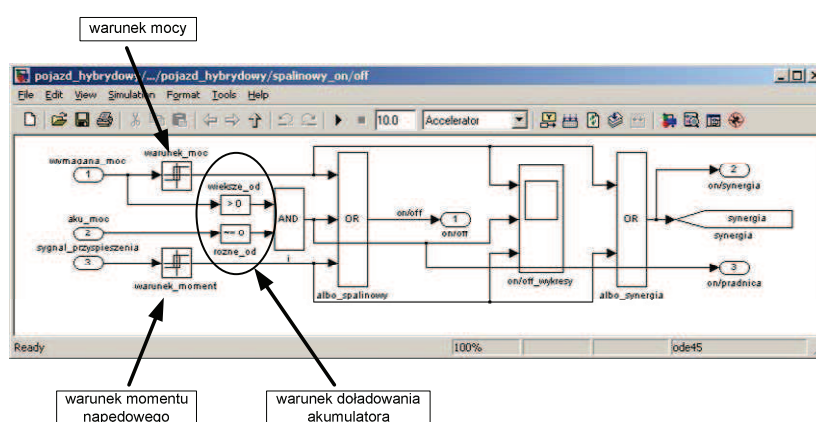
Pojazdy hybrydowe stanowią obecnie niewielki segment rynku motoryzacyjnego. Uwarunkowane jest to większą ceną pojazdu kołowego. Pojazdy kołowe z napędem hybrydowym spalinowo-elektrycznym dzielą się na dwie grupy: szeregowy i równoległy połączenie jednostek napędowych. Obecnie połączenie szeregowy w pojazdach kołowych nie jest stosowane. Częściej firmy motoryzacyjne wybierają model równoległego połączenia jednostek napędowych, dzięki któremu silnik spalinowy może napędzać generator jak również i sam pojazd kołowy. Jednakże większość pojazdów z równoległym napędem hybrydowym nie jest optymalizowana pod względem pracy jednostki spalinowej. W większości pojazdów silnik spalinowy pracuje nieprzerwanie, napędzając generator i pojazd kołowy. Dlatego postanowiono opracować algorytm sterowania napędem hybrydowym, w którym przyjęto pewne reguły pracy silnika spalinowego.

Podstawową kwestią opracowania takiego algorytmu sterowania jest aspekt ruszania pojazdu kołowego z miejsca postoju/zatrzymania oraz prawidłowe przełączanie między jednostki napędowymi lub wspomaganie jednego silnika drugim. W opracowanym algorytmie sterowania przyjęto ruszanie pojazdu kołowego wyłącznie na silniku elektrycznym. Układ napędowy silnika spalinowego został odrzucony z uwagi na niską sprawność przeniesienia momentu napędowego pomiędzy jednostką napędową, sprzęgłem, przekładnią i kołami pojazdu. Jednakże silnik spalinowy w hybrydowym układzie napędowym jest źródłem energii pierwotnej, dlatego należy dokładnie określić aspekty związane z jego włączaniem i wyłączaniem. Przyjęto następujące kryteria pracy silnika spalinowego (rys. 1):

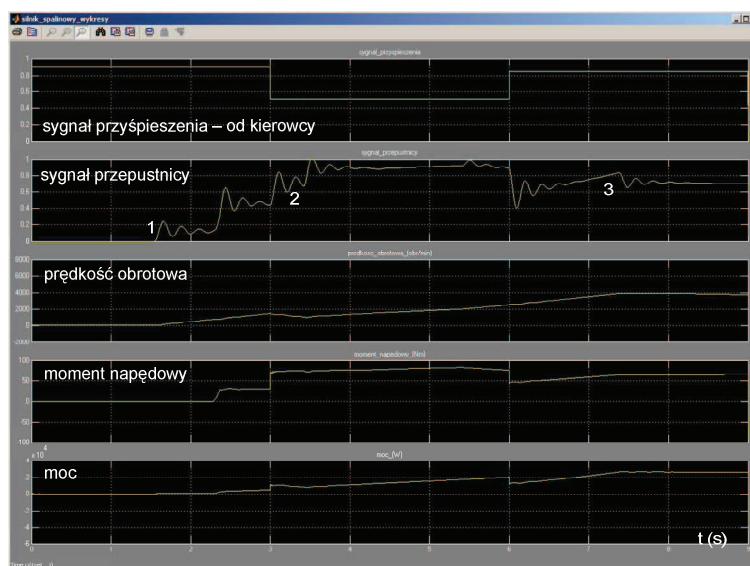
- wspomaganie silnika elektrycznego – zapotrzebowanie na moc; w przyjętym algorytmie nie uwzględniono sygnału z wychylenia pedału przyśpieszenia, przyjęto wartość 12kW,

- wspomaganie silnika elektrycznego – zapotrzebowanie na moment napędowy; w algorytmie uwzględnia się sygnał z wychylenia pedału przyspieszenia dla którego przyjętą wartością jest  $>0.9$ ,
- poruszanie się pojazdu kołowego tylko i wyłącznie na jednostce spalinowej,
- doładowanie akumulatora; jeżeli wartość rozładowania baterii spadnie poniżej przyjętego poziomu (SoC – State of Charge). W badanym modelu przyjęto  $<40\%$ .

Przyjęto również pewne ograniczenia co do prędkości obrotowej silnika spalinowego. W momencie napędzania generatora elektrycznego silnik spalinowy pracuje przy najmniejszym jednostkowym zużyciu paliwa przy stałej prędkości obrotowej. Kiedy silnik spalinowy wspomaga jednostkę elektryczną, prędkość obrotową ograniczono do 3500 obr/min. Pełną wartość obrotów silnik spalinowy uzyskuje tylko wtedy, gdy sam napędza pojazd kołowy, czyli poza granicami miast.



Rys.1. Sterowanie silnikiem spalinowym w zależności od przyjętych kryteriów  
Fig.1. Control of the internal combustion engine depending on the criteria



Rys.2. Uzyskane wyniki pomiarów w oprogramowaniu Simulink  
Fig.2. The obtained results of measurements in the Simulink

Uzyskane wyniki pomiarów (rys. 2) świadczą o poprawności zbudowanego modelu napędu hybrydowego. Sygnał przyspieszenia pochodzący od wychylenia przyspiesznika zadaje kierowca – pojazd rusza na silniku elektrycznym. Sygnał przepustnicy regulowany jest poprzez układ sterowania napędem hybrydowym. W pierwszy etap (1) włączany jest silnik spalinowy. W kolejnym etapie (2) układ sterowania dopasowuje prędkość obrotową do wartości optymalnej, czyli do najmniejszego jednostkowego zużycia paliwa. Następny etap (3) przedstawia wspomaganie silnika elektrycznego silnikiem spalinowym, przy jednoczesnym napędzaniu generatora elektrycznego. Zastosowana synergia energii pozwala na zwiększenie elastyczności i tym samym pozwala na zwiększenie ogólnej sprawności układu napędowego.

### 3. Podsumowanie

W pracy przedstawiono algorytm sterowania silnikiem spalinowym w pojeździe kołowym o napędzie hybrydowym. Przyjęty algorytm sterowania pozwala na optymalną pracę jednostki spalinowej w zależności od zapotrzebowania na energię. Przyjęcie koncepcji równoległego napędu hybrydowego jest niezwykle efektowne w zastosowaniu pojazdów kołowych poruszających się głównie w aglomeracjach miejskich. Silnik spalinowy uwzględnia różne kryteria pracy. Jednym z podstawowych jest stopień rozładowania akumulatorów elektrochemicznych. W takim wypadku silnik spalinowy pracuje przy swojej największej sprawności i stosunkowo niskiej prędkości obrotowej, co powoduje najmniejsze generowanie substancji toksycznych i najmniejsze jednostkowe zużycie paliwa.

### Literatura

1. Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1998.
2. Wendeker M.: Adaptacyjna regulacja wtrysku benzyny w silniku o zapłonie iskrowym. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 1998.
3. Jantos J.: Drive control in passenger car. "Journal of Kones, Internal Combustion Engine" 1999 vol. 6, no. 1-2, s. 48-57.
4. Mamala J.: Sterowanie napełnieniem silnika ZI w aspekcie ekologicznym. „Diagnostyka pojazdów samochodowych” 2000, vol. 2, s. 125-136.

## CONTROL OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE (ICE) OF PRIMARY ENERGY SOURCE IN HYBRID POWERTRAIN SYSTEM

**Summary:** The paper presents a virtual control system of a wheeled vehicle, a hybrid petroleum-electric powertrain, in which ICE is a primary energy source. The uses of an algorithm of controlling the internal combustion engine for reduce: the amount of excreted toxic substances into the atmosphere and also reduce of fuel consumption. Control algorithm should take into account both, external conditions and internal propulsion system. Clearly, control of internal combustion engine should be done without interfering with the driver in the work of the ICE unit.