

# Korzyści wynikające z mechatronicznego sterowania układów napędowych pojazdów

Zbigniew Pawelski

## Wpływ rodzaju skrzyni na postać układu napędowego jako obiektu regulacji

Do uzyskania przez pojazd wysokich prędkości maksymalnych i pokonywania dużych wzniesień konieczna jest przekładnia, która umożliwi zmianę przełożenia podczas jazdy.

Ze względu na sposób przełączania skrzynie biegów dzielą się na:

- mechaniczne (konwencjonalne) – zmianę przełożeń uzyskuje się za pomocą przekładni zębatych, które pozostają w stałym zazębieniu. Odpowiednie przełożenie, a tym samym drogę przepływu mocy w przekładni wybiera się dźwignią zmiany biegów;
- sekwencyjne – rodzaj skrzyń mechanicznych, w których zmiana przełożenia realizowana jest za pomocą elementu sterującego mającego możliwość jednorazowo zmiany tylko o jeden bieg w górę lub w dół. Często stosowane w motocyklach;
- automatyczne – zmianę przełożenia uzyskuje się za pośrednictwem przekładni planetarnej oraz zmiany szybkości krążenia cieczy w przekładni hydrokinetycznej;
- bezstopniowe – przełożenie realizowane jest za pomocą przekładni bezstopniowej, np. CVT, hydrostatycznej bądź elektrycznej.

**Streszczenie:** W pracy porównano układy napędowe, w których zastosowano mikroprocesorowe systemy sterowania. Z wyboru silnika spalinowego jako źródła napędu wynika koncepcja sterowania, która pozwala zbliżyć się do opracowania jednego algorytmu modyfikowanego odpowiednio do zastosowanej przekładni: stopniowej i bezstopniowej.

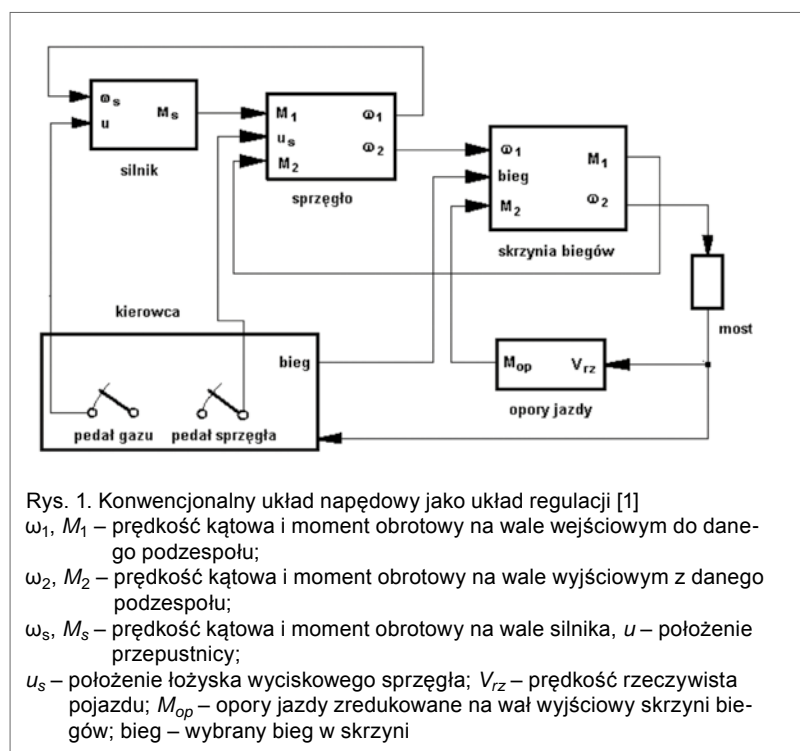
## 🇬🇧 BENEFITS OF USAGE MECHATRONIC STEERING OF VEHICLE POWERTRAINS

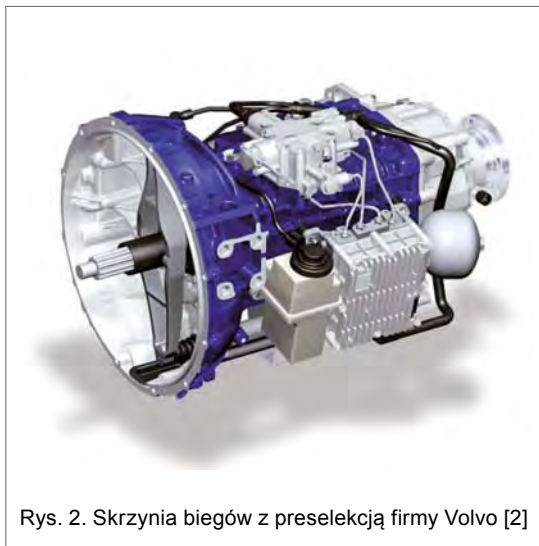
**Abstract:** At this paper there were compared powertrains with microprocessor steering systems. According to internal combustion as a power source, it consequents the conception of steering what enables elaboration of one algorithm which is modified due to used gear: classical and stepless.

Konwencjonalny układ napędowy można przedstawić w ujęciu automatyki jak na rys. 1 [1], w którym kierowca pełni rolę regulatora (sterownika). Obserwując rzeczywistą prędkość pojazdu, oddziałuje on odpowiednio: przepustnicą (pedałem gazu)

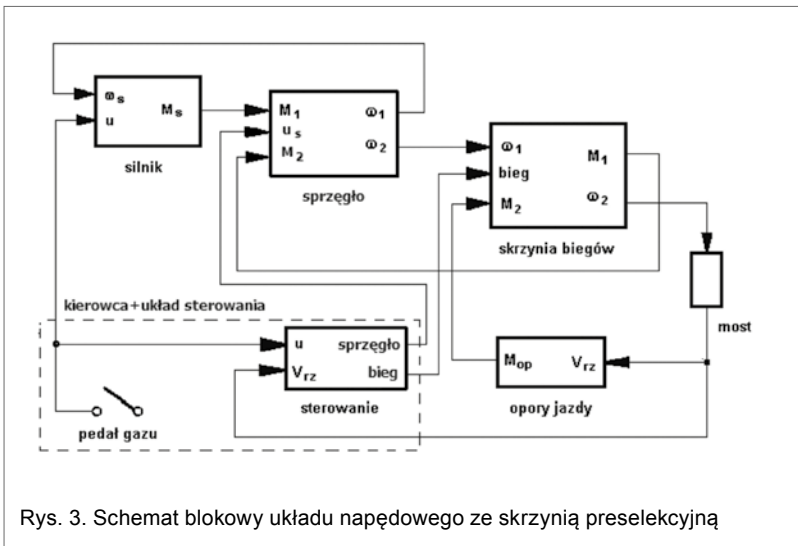
na silnik, pedałem sprzęgła na sprzęgło, dźwignią zmiany biegów na wartość przełożenia w skrzyni biegów i przystosowuje w ten sposób charakterystykę rzeczywistą układu napędowego do przebiegu idealnego. Pozostałe wielkości są sygnałami wewnętrznymi opisującymi własności każdego podzespołu w stanach ustalonych i nieustalonych oraz sumarycznie całego układu napędowego. Wynika stąd potrzeba ich określenia zarówno na drodze teoretycznej, jak i weryfikacja na drodze doświadczalnej. Od sposobu sterowania realizowanego przez kierowcę zależą chwilowe parametry pracy silnika i ostatecznie zużycie paliwa oraz poziom składników szkodliwych spalin.

Skrzynia biegów sekwencyjna (z preselekcją) to „tradycyjna” skrzynia uzupełniona o układ zautomatyzowanej zmiany biegów. Łączy w sobie niezawodność i mały ciężar skrzyni mechanicznej z wygodą przekładni automatycznej. Charakteryzuje się sterowaniem zoptymalizowanym pod kątem współpracy z silnikiem w celu zapewnienia płynnej i komfortowej zmiany biegów. Optymalny proces zmiany biegów oznacza także niski poziom zużycia paliwa oraz składników szkodliwych w spalinach. Jako przykład skrzyni z pre-





Rys. 2. Skrzynia biegów z preselekcją firmy Volvo [2]



Rys. 3. Schemat blokowy układu napędowego ze skrzynią preselekcyjną

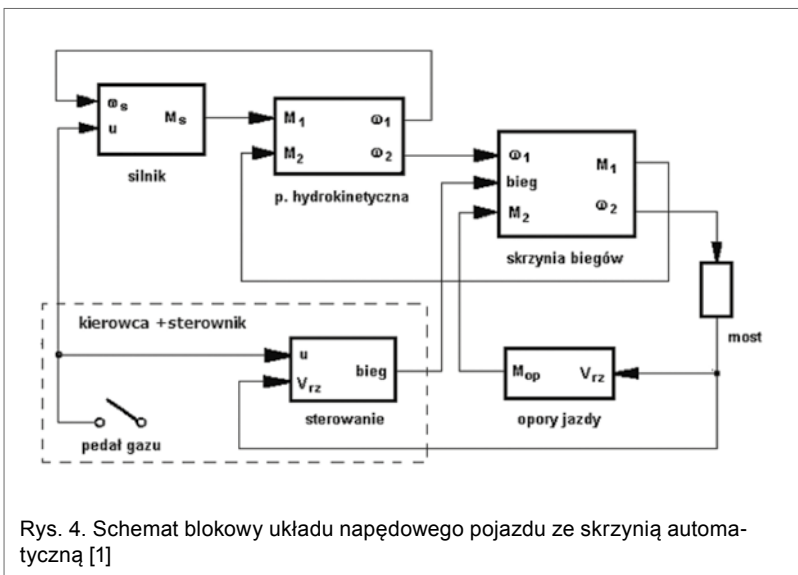
selekcją mogą stanowić rozwiązania zastosowane w samochodach ciężarowych, np. Volvo, MAN – rys. 2 [2], oraz dwusprzęgłowa skrzynia biegów DSG VW.

Układ napędowy pojazdu z preselekcyjną skrzynią biegów można przedstawić jako obiekt regulacji, jak na rys. 3. W porównaniu do konwencjonalnego układu napędowego (rys. 1) łatwo dostrzec różnice. Przede wszystkim kierowcę wspomaga układ sterujący nadzorujący pracę silnika oraz skrzyni biegów, w którym wybór biegu zależy od chwilowej wartości prędkości rzeczywistej pojazdu  $V_{rz}$  oraz oczekiwań kierowcy  $u$  sygnalizowanych przepustnicą (pedałem gazu).

W skrzyniach z preselekcją wyeliminowano pedał sprzęgła, a jego rozłączeniem steruje mikroprocesor za pomocą siłownika. Dzięki możliwości szybkiej zmiany przełożenia skrzynie te łatwo przystosowują układ napędowy do zmieniających się warunków ruchu, a dzięki przetwarzaniu sygnałów za pośrednictwem mikroprocesora możliwe jest tworzenie różnych funkcji sterowania dla różnych przypadków ruchu.

Automatyczna skrzynia biegów (rys. 4) w najprostszym wydaniu składa się z przekładni hydrokinetycznej oraz przekładni planetarnej z co najmniej trzema biegami do przodu oraz jednym do tyłu. Prowadzenie pojazdu wyposażonego w automatyczną skrzynię biegów ogranicza się do obsługi pedałami: gazu (przepustnicą) i hamulca, tj. podobnie jak ze skrzynią preselekcyjną. Obecne konstrukcje skrzyń automatycznych osiągnęły poziom, gdzie ich trwałość jest ograniczona jedynie trwałością łożysk, tj. odpowiadającą przebiegom kilku milionów kilometrów. Dzisiejsze rozwiązania pozwalają na pracę skrzyni, która w zależności od potrzeb może sama zmieniać biegi, realizując jazdę: ekonomiczną, sportową, zimową bądź w razie życzenia kierowcy „udawać” konwencjonalną skrzynię biegów, umożliwiając wybieranie przez niego poszczególnych przełożeń. Osiąga się to przez zwiększenie liczby biegów do 4, 5, a nawet 8.

Przekładnia hydrokinetyczna, samoczynnie przystosowując się do zmian obciążenia w układzie napędowym, przybliża charakterystykę napędu do idealnej i nie wymaga sterowania, co wynika również z rys. 4. Niestety cechuje ją zmienna i niższa sprawność niż w pozostałych podzespołach układu napędowego. Chcąc zwiększyć sprawność przeniesienia napędu na wyższych



Rys. 4. Schemat blokowy układu napędowego pojazdu ze skrzynią automatyczną [1]

biegach, „omija się” tę przekładnię przez blokowanie wirników pompy i turbiny za pomocą sprzęgła ciernego – i jest to jedyne sterowanie w odniesieniu do przekładni hydrokinetycznej.

Jeżeli w miejsce przekładni hydrokinetycznej zastosuje się inną przekładnię bezstopniową, np. cierną CVT, hydrostatyczną bądź elektryczną, otrzymuje się kolejne odmiany układu napędowego, a w przedstawionym na rys. 4 schemacie powinny pojawić się wtedy dodatkowo sygnały sterujące tymi przekładniami bezstopniowymi. Odpowiednim modyfikacjom musi ulec również algorytm sterowania w układzie sterującym.

Łatwo zauważyć, że we wszystkich tych odmianach układu napędowego na proces sterowania składają się następujące zadania:

- sterowanie silnikiem,
- sterowanie skrzynią biegów.

Silnik i skrzynia biegów mają swoje indywidualne, autonomiczne sterowniki, a pracę całego układu nadzoruje kierowca i sterownik nadrzędny, którego zadaniem jest wypracowanie takich żądań w stosunku do silnika i skrzyni, aby ich współpraca przebiegała optymalnie ze względu na postawione kryteria. W module nadrzędnym „przetwarzane” jest życzenie kierowcy na tzw. strategię sterowania, które przyporządkowują położeniu przepustnicy (pedału gazu) optymalne parametry silnika i prze-

łożenie w skrzyni biegów. Ta koncepcja sterowania nie zmieniła się od kilkudziesięciu lat. Zmieniał się natomiast sposób jej realizacji zwłaszcza po zastosowaniu techniki mikroprocesorowej pozwalającej uwzględniać coraz więcej przypadków szczególnych występujących podczas napędu samochodu.

reklama

### Sterownik silnika

Model silnika najczęściej opiera się na wynikach z badań stanowiskowych w stanach ustalonych, pozwalające określić charakterystyki typu 3D: momentu obrotowego silnika, jednostkowego zużycia paliwa, emisji składników szkodliwych:  $NO_x$ ,  $C_nH_m$ , CO oraz cząstek stałych PM, w funkcji: prędkości kątowej (obrotowej) silnika oraz kąta otwarcia przepustnicy, odpowiadającego położeniu pedału gazu. Przykładowo na rys. 5 przedstawiono taką charakterystykę dla momentu obrotowego. Widoczne są przebiegi częściowego kąta otwarcia przepustnicy. W tym przypadku w zakresie 0–30% kąta otwarcia przepustnicy istnieje obszar niskich, prawie stałych wartości momentu obrotowego. Właściwość ta jest uwzględniana przez wiele firm jako niesterowalny zakres na wykresach przełączeń biegów.

Dla każdej z wymienionych charakterystyk (rys. 5, 6 i 7) można wyznaczyć tzw. linie optymalne, ale brak jest informacji, jak zbudować funkcję optymalizacyjną dla wielu parametrów o silnie zróżnicowanych wartościach bezwzględnych oraz odmiennych miarach i własnościach fizycznych.

Za propozycją własną autora, przy zastosowaniu przykładowo metody Pareto, można przyjąć minimum następującej funkcji:

$$K = w_{ge}K_{ge} + w_{CO}K_{CO} + w_{NO_x}K_{NO_x} + \\ + w_{CnHm}K_{CnHm} + w_{PM}K_{PM} + \dots$$

gdzie:

$w_{xy}$  – waga parametru  $xy$ ; uzależniając wartość wagi od aktualnie „obsługiwanej” mocy, można uwzględnić różne warunki „brzegowe” spełniające poniższe równanie:

$$w_{ge} + w_{CO} + w_{NO_x} + w_{CnHm} + w_{PM} + \dots = 1$$

$K_{xy}$  – względna wartość parametru  $xy$  odniesiona do wartości minimalnej np. z norm toksyczności spalin (EURO VI), obliczana z zależności jak poniżej; przykładowo dla jednostkowego zużycia paliwa  $ge$ :

$$K_{ge} = \frac{ge_{pcel} - \frac{\sum_{i=1}^N ge_i}{N}}{ge_{pcel}}$$

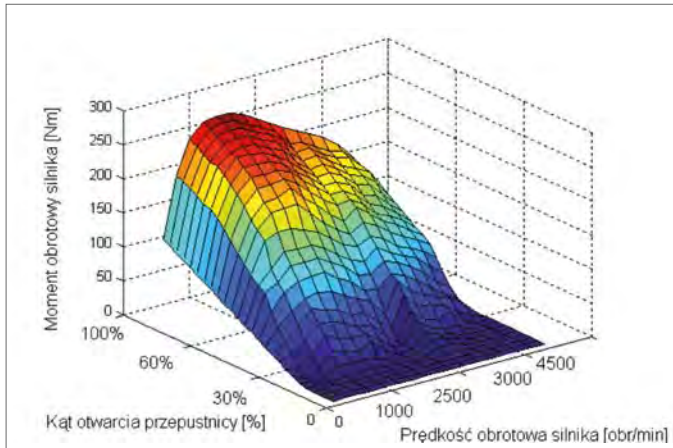
gdzie:

$N$  – liczba punktów obliczeniowych dla danej krzywej;

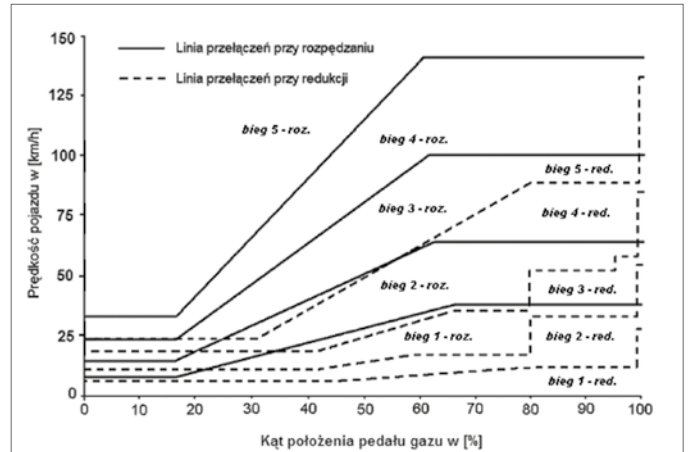
$ge_{pcel}$  – wartość docelowa jednostkowego zużycia paliwa (minimum);

$ge_i$  – wartość jednostkowego zużycia paliwa w  $i$ -tym punkcie pracy silnika.

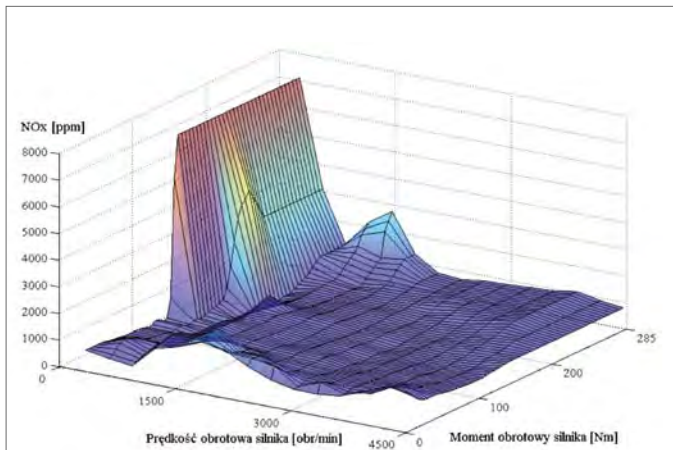
Wartości odniesienia przyjętych do analizy parametrów stanowią współrzędne punktu celu optymalizowanej funkcji. Posługiwanie się wartościami względnymi pozwala unormować składniki, a ich równoważność uzyskuje się, gdy ich wartości względne są tego samego rzędu. Przedstawiona powyżej pro-



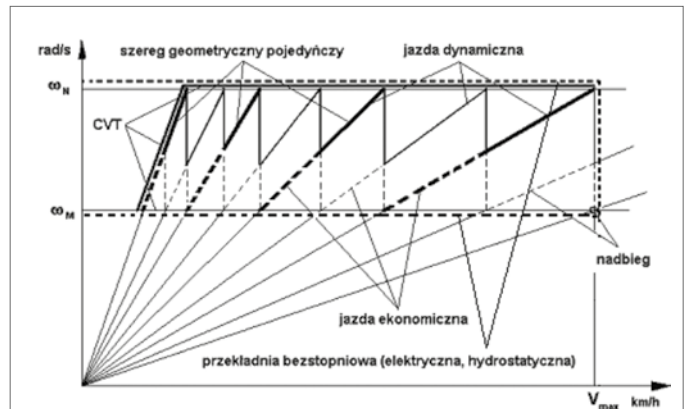
Rys. 5. Charakterystyka momentu obrotowego silnika spalinowego [1]



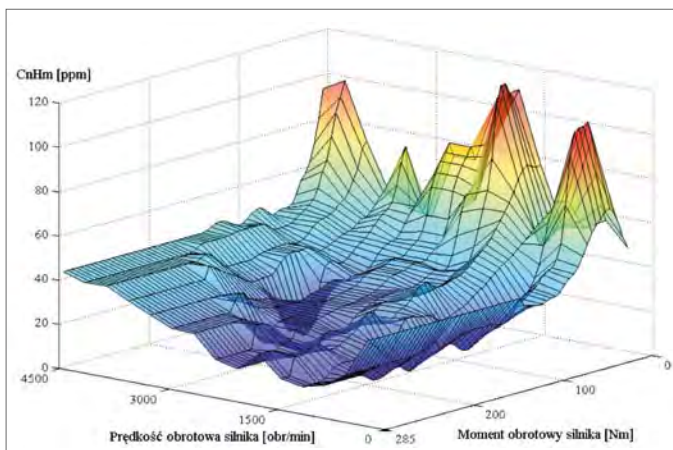
Rys. 8. Podstawowe charakterystyki przełączeń [1]



Rys. 6. Emisja tlenków azotu  $NO_x$  [1]



Rys. 9. Wykres piłowy dla stopniowej skrzyni biegów podczas jazdy ekonomicznej i dynamicznej (sportowej) oraz przekładni bezstopniowych



Rys. 7. Emisja węglowodorów  $C_nH_m$  [1]

pozycja pozwala zwiększać liczbę rozważanych parametrów i traktować je w sposób równoważny względem siebie. Oczwistym jest tworzenie także innych funkcji optymalizacyjnych.

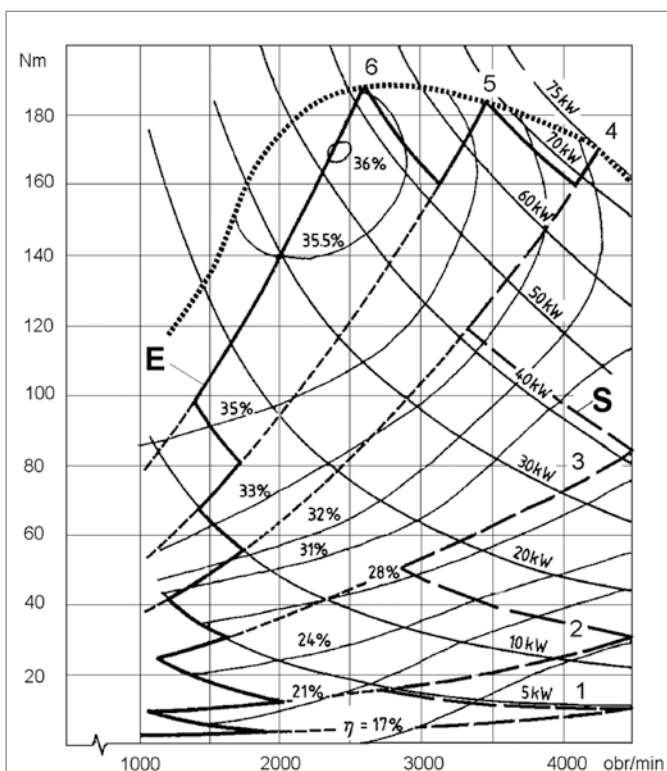
Taka filozofia sterowania zintegrowanych układów napędowych pozwala na spełnienie ostrzejszych norm toksyczności spalin na drodze programowej, bez konieczności dokonywania

zmian konstrukcyjnych. Zagadnienie określenia pola pracy silnika oraz sposób podejścia do niego jest zadaniem złożonym samym w sobie, zwłaszcza że korzysta się tu z charakterystyk silnie nieliniowych. Zaproponowana metoda postępowania jest na tyle uniwersalna, że może być wspólna dla napędów i w niewielkim stopniu zależna od rodzaju zastosowanej przekładni bezstopniowej: automatycznej, CVT, elektrycznej, z równoległym przepływem mocy bądź stopniowej, dwusprzęgłowej DSG.

### Sterownik stopniowej skrzyni biegów

Jak już wspomniano, w układach napędowych sterowanych „mikroprocesorowo” decyzja o przełączeniu biegu nie pochodzi bezpośrednio od kierowcy, lecz zostaje wypracowana w układzie sterowania, a logika przełączeń określa, który bieg jest załączany i kiedy zostanie zmieniony.

Bazę decyzji przełączeń stanowi tzw. program przełączeń podstawowych, na który składają się linie przełączeń przy rozpedzaniu i przy redukcji dla wszystkich biegów jazdy do przodu. Przykładowo, rys. 8 przedstawia linie przełączeń dla skrzyni 5-biegowej do samochodu osobowego. Z wielkości wejściowych: kąta wychylenia przepustnicy (pedału gazu) i prędkości pojazdu wynika stosowana w danej chwili charakterystyka przełączeń i wybór biegu.



Rys. 10. Wpływ sposobu sterowania skrzynią 6-biegową na obciążenie silnika  
 E – jazda ekonomiczna, S – jazda sportowa, 1, 2, 3, 4, 5 i 6 – bieg (opory jazdy)

Na decyzję o przełączeniu wpływają różne sposoby przygotowania i prowadzenia przełączeń, tzw. strategie: jazda ekonomiczna, sportowa, zimowa itp. Istnieje wiele metod, w których strategia zostaje dopasowana do danego układu napędowego przez wybór różnych charakterystyk, rys. 9.

W przypadku przekładni bezstopniowych: hydrostatycznej i elektrycznej realizowane są przełożenia o zmianie ciągłej, przez co dostępne są wszystkie punkty na rys. 9 ograniczone liniami: prędkości kątowych silnika:  $\omega_N$  i  $\omega_M$  oraz maksymalnej prędkości pojazdu  $V_{max}$ . Z minimalnej wartości przełożenia realizowanego przez przekładnię CVT wynika ograniczenie pola przełożeń z lewej strony wykresu na rys. 9, a z ograniczenia prędkości kątowej silnika spalinowego z pracą stabilną – ograniczenie pola od dołu przy  $\omega_M$ .

Wzrost liczby przełożeń, np. z 4 do 7 jak na rys. 9, pozwala zrealizować sterowanie skrzynią biegów według różnych algorytmów, np. jazdę ekonomiczną lub sportową. Przy jeździe ekonomicznej praca silnika spalinowego zostanie zawężona do otoczenia prędkości kątowej przy maksymalnym momencie obrotowym (linie przerywane w dolnej części wykresu), które zwykle odpowiadają pracy z maksymalną sprawnością. Jazda sportowa odpowiada pracy silnika w otoczeniu maksymalnej mocy (górną część wykresu na rys. 9 – linia ciągła). Te sposoby sterowania można przenieść na charakterystykę uniwersalną silnika spalinowego, jak na rys. 10.

Przy delikatnym naciskaniu przepustnicą (pedał gazu), linia E na rys. 10, samochód przyspiesza łagodnie, a kolejne wyższe biegi włączają się przy łagodnym rozpędzaniu; efekt – najmniejsze zużycie paliwa. Szybkie przesunięcie przepustnicą, linia S na rys. 10, powoduje, że przez dłuższy czas utrzy-



Rys. 11. Elementy sterujące systemem Tiptronic na obudowie selektora oraz na kierownicy [3]

mywane są niższe biegi i samochód rozpędza się dynamicznie. Także gwałtowne przesunięcie przepustnicą podczas jazdy na najwyższym biegu, np. przy wyprzedzaniu, wywołuje redukcję na bieg niższy, np. z 6. na 4. i w efekcie zwiększa „manewrowość” pojazdu. Na rys. 10 łatwo zauważyć inne obszary pracy silnika (inna sprawność, jednostkowe zużycie paliwa i poziomy hałas) podczas realizacji trybu pracy *E* lub *S* oraz związaną z nimi kolejność przełączeń biegów.

W przypadku przekładni bezstopniowych odpowiednie linie łamane ulegają „wyprostowaniu” oraz zmieniają się równocześnie udziały czasu pracy silnika w danym obszarze charakterystyki uniwersalnej.

Sterowanie mikroprocesorowe skrzyń samochodowych umożliwia wybór całkowicie automatycznego sposobu pracy odpowiedniego do ruchu miejskiego i półautomatycznego, bardziej angażującego kierowcę i bardziej właściwego dla mniej zatłoczonych dróg. Przykładem może tu być system Tiptronic, rys. 11, w którym selektor zmiany biegów jest montowany tradycyjnie na tunelu środkowym. Ma dwie płaszczyzny obsługi: tryb automatyczny i ręczny. W trybie automatycznym są pozycje dźwigni selektora: P, R, N, D, 3, 2, 1, znane z tradycyjnych przekładni automatycznych. Dzięki takiemu uporządkowaniu zachowany został sposób obsługi „automatyków”.

W trybie ręcznym zmiana biegów następuje sekwencyjnie, tj. kolejno bez możliwości omijania poszczególnych biegów (pozycje + i –). Obecne skrzynie mają najczęściej 6 biegów. Dzięki temu kierowca ma możliwość doboru przełożeń i samodzielnego wpływu na dynamikę jazdy. Przydaje się to np. podczas zjeżdżania z góry, gdzie przez świadome operowanie biegami można dobrać moment hamujący silnika. Maksymalną prędkość jazdy osiąga się na 5. biegu. Bieg 6. jest nadbiegiem o długim przełożeniu, co pozwala na obniżenie obrotów silnika i tym samym na zredukowanie zużycia paliwa. Szczególnie jest to przydatne podczas jazdy na autostradzie. Opcjonalnie funkcjami Tiptronic można sterować za pomocą przycisków na kierownicy, rys. 11.

## Podsumowanie

Rozwiązania układów sterowania skrzyń biegów produkowanych pojazdów posiadają zbliżone algorytmy sterowania, co pozwala zmierzać do jednego algorytmu i odpowiednich modyfikacji, w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego skrzyni biegów. Wynika to z faktu, że opierają się na tym samym schemacie układu napędowego, w którym wybór biegu zależy od chwilowej wartości prędkości rzeczywistej pojazdu  $V_{rz}$  oraz oczekiwań kierowcy  $u$  sygnalizowanych „pedałem gazu” – przepustnicą. Sposób jej realizacji zmieniał się w czasie wraz z rozwojem technologii przetwarzania sygnałów. Obecne techniki mikroprocesorowe pozwalają uwzględniać coraz więcej przypadków szczególnych występujących podczas napędu samochodu i stąd wynikają rozbudowywane algorytmy sterowania. W skrzyniach tych praktycznie tylko elementy wykonawcze i najważniejsze blokady pozostają mechaniczne i hydrauliczne, natomiast wszystkie funkcje sterowania i kontroli sprawuje układ elektroniczny sterujący hydrauliką skrzyni za pomocą zespołu zaworów. Za utrzymywanie ważnych parametrów ciśnienia i pracy układu hydraulicznego skrzyni nie odpowiadają już żadne regulatory mechaniczno-hydrauliczne, ale pętle: czujniki – mikroprocesor – zawory sterujące.

Analiza istniejących i ciągle rozwijanych rozwiązań pozwala stwierdzić, że przejście od hardware’u do software’u przy realizacji elektroniczno-hydraulicznego sterowania daje następujące korzyści:

- dopasowanie charakterystyk przełączeń z mniejszą tolerancją dla różnorodnych wymagań;
- większa liczba opracowywanych wielkości;
- redukcja elementów mechanicznych w urządzeniach sterujących;
- podwyższenie komfortu przełączeń dzięki „ingerencji” silnika podczas przełączania;
- wybór programu dla różnorodnych przypadków zastosowania;
- większy potencjał dalszego rozwoju.

## Literatura

- [1] PAWELSKI Z.: *Skrzynie automatyczne. Podstawy działania*. Politechnika Łódzka, 2010.
- [2] [www.volvotrucks.com](http://www.volvotrucks.com)
- [3] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Automatyczna\\_skrzynia\\_biegow](http://pl.wikipedia.org/wiki/Automatyczna_skrzynia_biegow)

prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Pawelski – Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Łódzka;  
e-mail: [zbigniew.pawelski@p.lodz.pl](mailto:zbigniew.pawelski@p.lodz.pl)

artykuł recenzowany