

Zbigniew PAWELSKI¹

WPLYW RODZAJU SKRZYNI BIEGÓW NA PARAMETRY PRACY SILNIKA SPALINOWEGO

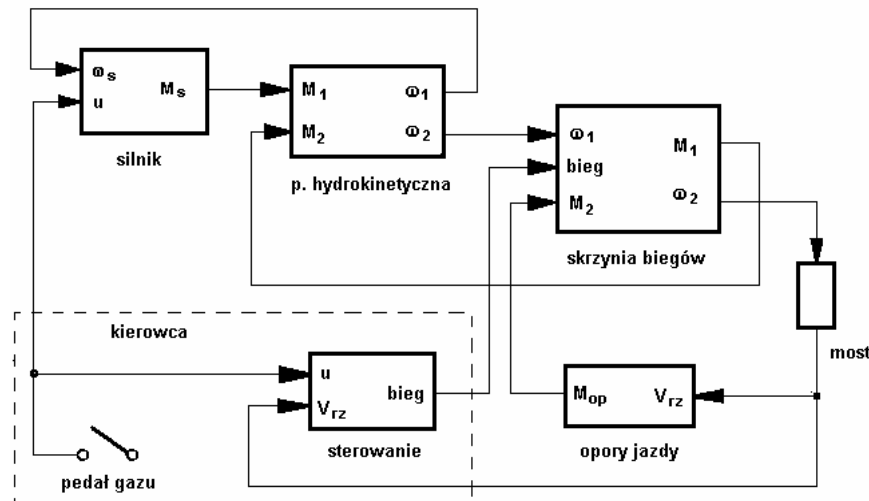
Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych układów napędowych z różnymi skrzyniami biegów, możliwymi do zastosowania w tym samym samochodzie i określono wpływ ich konstrukcji na pracę silnika spalinowego. Zaproponowano metodę postępowania przy opracowaniu sterownika skrzyni biegów. Metoda ta jest na tyle uniwersalna, że może być wspólna dla napędów niekonwencjonalnych i w niewielkim stopniu zależna od rodzaju zastosowanej przekładni bezstopniowej: automatycznej, CVT, elektrycznej, z równoległym przepływem mocy bądź stopniowej, dwusprzęgłowej DSG.

1. WSTĘP

Przy realizacji skrzyń biegów przełączalnych pod obciążeniem bez przerywania siły napędowej, z automatycznymi i ręcznymi sposobami przełączeń, istnieją dwie drogi postępowania. Pierwsza z nich to rozwój skrzyń automatycznych „nietypowych” np. z dwoma sprzęgłami jak w skrzyni DSG VW [4]. Zalety, to przede wszystkim wysoka sprawność i możliwość swobodnego dopasowywania przełożenia. Droga druga prowadzi przez stosowanie istniejących na rynku, przełączalnych pod obciążeniem, automatycznych skrzyń biegów i zwiększanie w nich ilości programów (trybów) pracy. Istotnymi zagadnieniami są wtedy: optymalny dobór skrzyni do silnika, dobór prędkości obrotowych, przy których realizowane są przełączenia oraz poprawne sterowanie przełożeniami.

Przedstawiane szeroko w literaturze, m.in. [1],[2],[3], rozwiązania układów sterowania w różnych automatycznych skrzyniach biegów posiadają zbliżone algorytmy sterowania w swoich podstawowych fragmentach. Wynika to z faktu, że opierają się na tym samym schemacie układu napędowego pokazanym na rys.1, w którym wybór biegu zależy od chwilowej wartości prędkości rzeczywistej pojazdu „ V_{rz} ” oraz oczekiwań kierowcy „u”, sygnalizowanych „pedałem gazu”. Ta koncepcja sterowania nie zmieniła się, gdyż pochodzi ze struktury układu napędowego. 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.

¹ Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Łódzka



Rys. 1. Schemat blokowy układu napędowego pojazdu ze skrzynią automatyczną
 Fig. 1. The block diagram of the power transmission system with the automatic gearbox

Pozwalają one na:

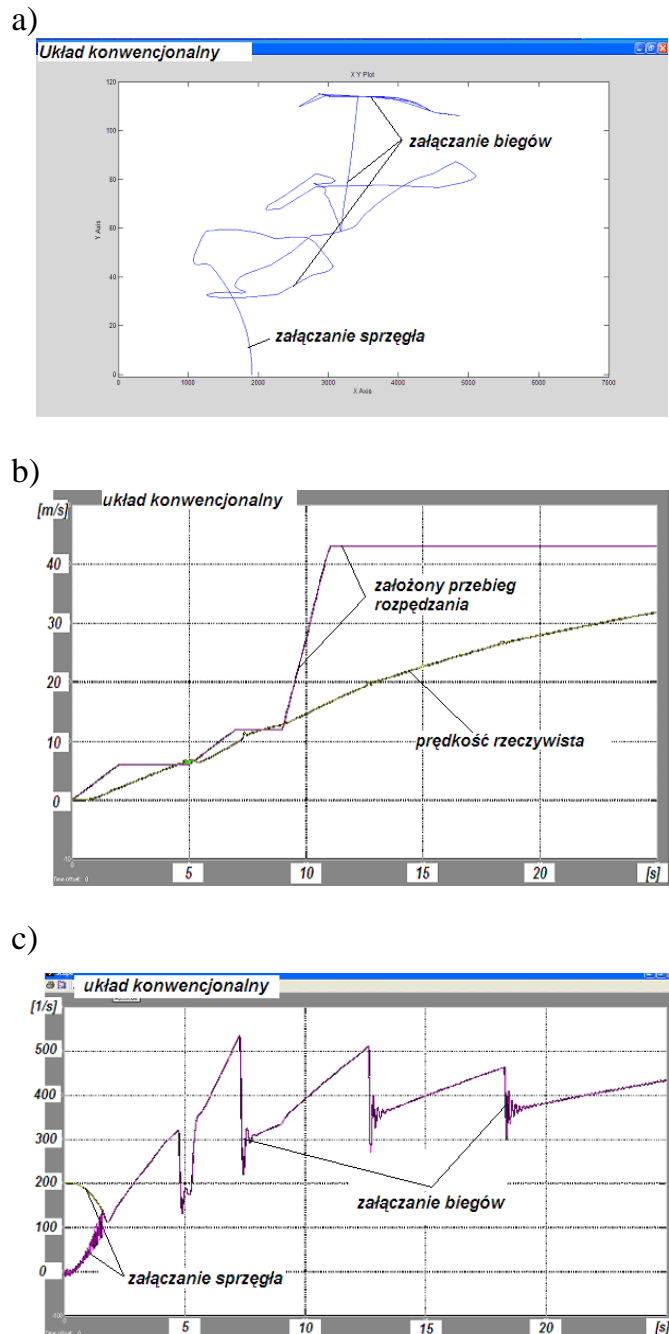
- dopasowanie charakterystyk przełączeń z mniejszą tolerancją dla różnorodnych wymagań,
- większą liczbę analizowanych i opracowywanych wielkości,
- redukcję nakładów na urządzenia sterujące i połączenia mechaniczne,
- podwyższenie komfortu przełączeń dzięki równoczesnemu wysterowaniu silnika na pracę bliską biegowi jałowemu, podczas przełączania skrzyni biegów,
- wybór programu dla różnorodnych przypadków zastosowania,
- większy potencjał dalszego rozwoju.

Podstawą powyższej wymienionych zadań układu sterowania jest umiejętność budowy modeli dynamicznych podzespołów i układów napędowych oraz ich weryfikacja. Na ich podstawie można opracowywać strategie sterowania już na etapie powstawania prototypu. Jako przykład takiego działania, w niniejszym opracowaniu, przedstawiono wyniki z badań symulacyjnych układów napędowych z różnymi skrzyniami biegów, możliwymi do zastosowania w tym samym samochodzie i określenie wpływu ich konstrukcji na pracę silnika spalinowego.

2. WPŁYW SKRZYNI NA TRAJEKTORIĘ PRACY SILNIKA

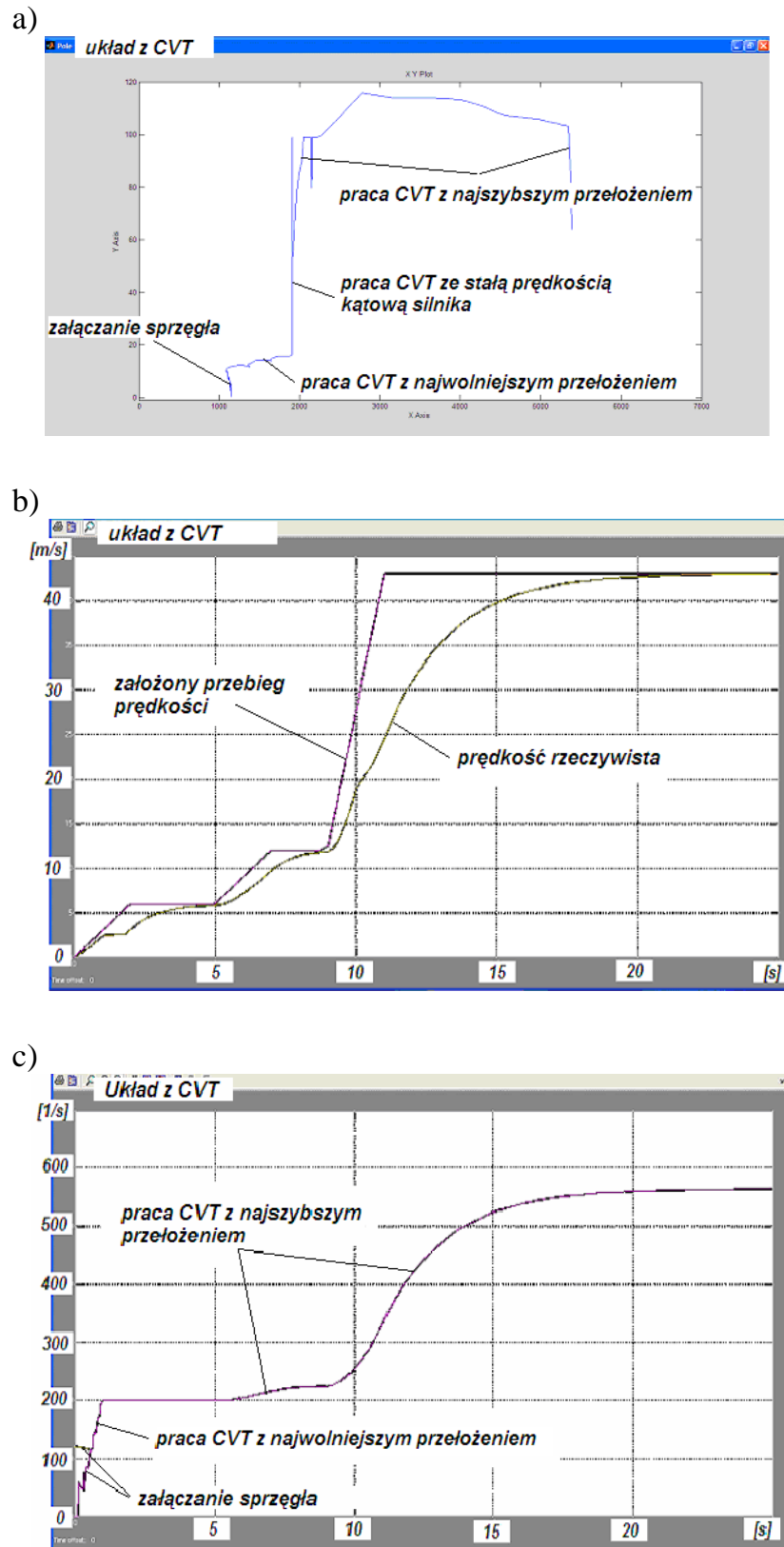
Jak już wspomniano, można zmierzać do budowy jednego algorytmu i odpowiednio go modyfikować, w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego danej skrzyni biegów oraz wymieniając podzespoły w układzie napędowym (inne własności stanów ustalonych i dynamiczne, inne sygnały sterujące podzespołu). Kontynuując tę myśl powstaje pytanie - jaki jest wpływ odmiany zastosowanej skrzyni na trajektorie pracy silnika spalinowego i tym samym na osiągane parametry np. przebiegowe zużycie paliwa, ilość składników szkodliwych spalin, itp.

W tym celu analizie symulacyjnej poddano następujące rozwiązania: układ klasyczny ze skrzynią 5-cio biegową (jak na rys. 1) oraz trzy skrzynie automatyczne: z przekładnią hydrokinetyczną, CVT oraz rozwiązanie z równoległym przepływem mocy i CVT. W badanych przypadkach oddziaływanie kierowcy zastąpiono regulatorem PI. W artykule przedstawiono wyniki z realizacji cyklu rozpędzania pojazdu do prędkości $V=42\text{m/s}$ w czasie 25s (rys. 2÷5).



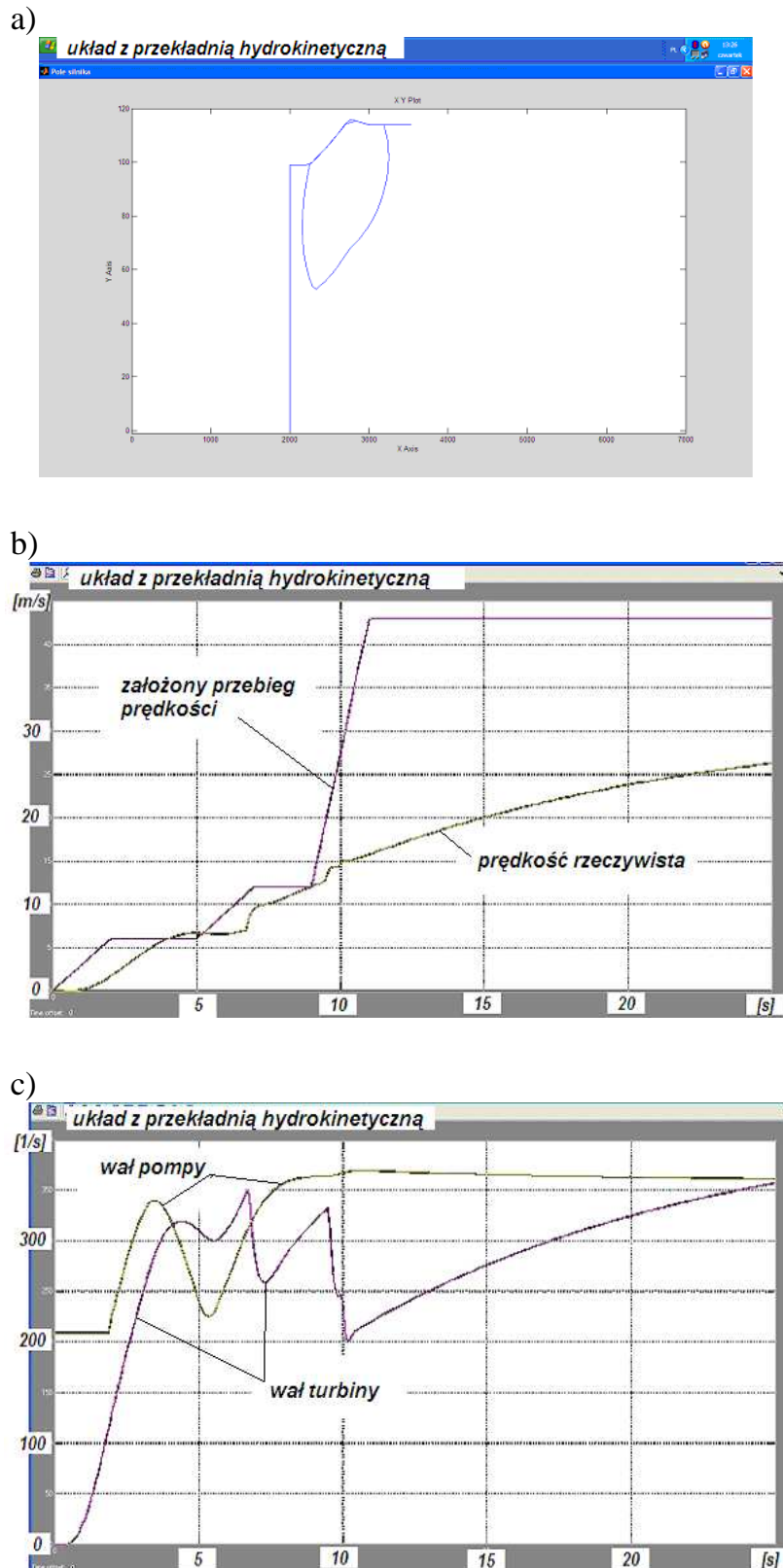
Rys. 2. Rozpędzanie w układzie konwencjonalnym: a) linia pracy silnika, b) prędkości pojazdu, c) prędkości kątowe wałów sprzęgła ciernego

Fig. 2. Acceleration in a conventional transmission system: a) the line of engine work, b) vehicle speed c) angular velocity of the friction clutch



Rys. 3. Rozpędzanie w układzie z CVT: a) linia pracy silnika, b) prędkości pojazdu, c) prędkości kątowe wałów sprzęgła ciernego

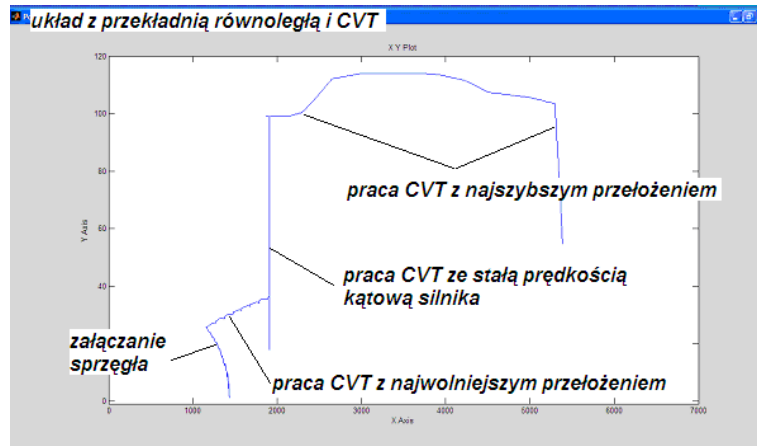
Fig. 3. Acceleration in a CVT transmission system: a) the line of engine work, b) vehicle speed c) angular velocity of the friction clutch



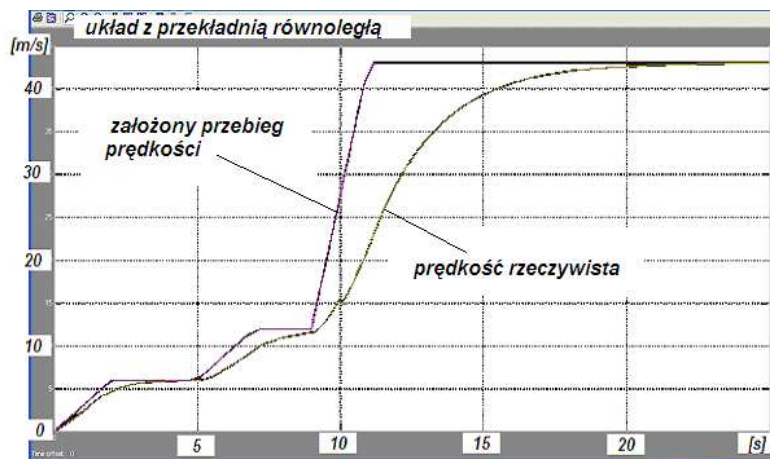
Rys. 4. Rozpędzanie w układzie z przekładnią hydrokinetyczną: a) linia pracy silnika, b) prędkości pojazdu, c) prędkości katowe pompy i turbiny

Fig. 4. Acceleration in a hydrokinetic torque converter: a) the line of engine work, b) vehicle speed, c) angular velocity of the pump and turbine

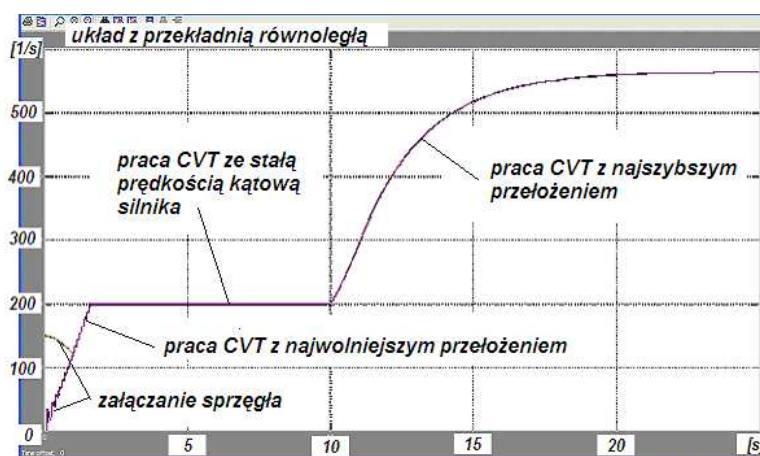
a)



b)



c)



Rys. 5. Rozpędzanie w układzie z przekładnią równoległą i CVT: a) linia pracy silnika, b) prędkości pojazdu, c) prędkości kątowe sprzęgła ciernego

Fig. 5. Acceleration in a parallel and CVT transmission system: a) the line of engine work, b) vehicle speed, c) angular velocity of the friction clutch

Tabela 1. Porównanie wybranych parametrów jakości układu napędowego
 Table 1. Comparison of selected quality parameters of the " drive system

Skrzynia	Zużycie paliwa $\text{dcm}^3/100\text{km}$	Kwadrat uchybu prędkości pojazdu	Przełożenia w skrzyni biegów i[-]	Droga rzeczywista [m]	Droga teoretyczna cyklu [m]
konwencjonalna	14.0	7598	3.5 1.9 1.3 1 0.85	370.4	723
automatyczna	13.1	6416	3.5 1.9 1.3 1 0.85	402.8	723
CVT	11.2	804.9	0.4÷2.4	647.3	723
równoległa	10.3	906.8	0.4÷2.4	641.2	723

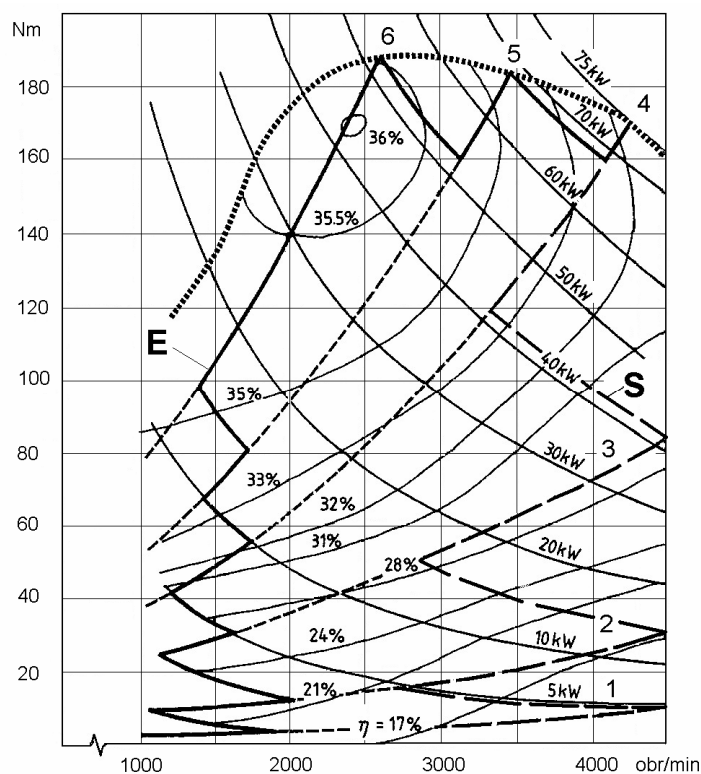
Na podstawie otrzymanych wyników z symulacji można stwierdzić, że:

- Zastosowanie przekładni z ciągłą zmianą przełożenia pozwala realizować pracę silnika spalinowego ze stałą prędkością kątową a funkcję elastyczności silnika przenieść wtedy na skrzynię. Po wykorzystaniu zakresu przełożeń w skrzyni bezstopniowej, dalszy wzrost prędkości pojazdu odbywa się przez wzrost prędkości kątowej silnika jak w układzie konwencjonalnym (rys. 2a÷5a). Sumarycznie układ napędowy z taką skrzynią cechuje się obniżonym przebiegowym zużyciem paliwa.
- Skrzynie konwencjonalna i automatyczna z przekładnią hydrokinetyczną nie są w stanie sprostać wymaganiom przyjętego do obliczeń cyklu. Jak widać na rys. 2b÷5b, charakteryzują się znacznie mniejszą dynamiką tj. mniejszymi wartościami przyspieszeń pozwalającymi na przejazd w czasie cyklu tylko ok. 50% założonej drogi. Pozostałe skrzynie spełniają wymagania odnośnie dynamiki znacznie lepiej, przy czym w skrzyni równoległej odbywa się to przy ciśnieniach w siłownikach CVT dwukrotnie mniejszych, tj. odpowiadających podziałowi strumienia energii przenoszonej przez część mechaniczną i bezstopniową.
- Z porównania rys. 3c i rys. 5c wynika prawie dwukrotnie dłuższy czas pracy przekładni CVT w rozwiązaniu równoległym, co również wpływa na korzystniejszy, dłuższy okres pracy silnika spalinowego ze stałą prędkością kątową, a tym samym na zmniejszone o kilkanaście procent zużycie paliwa względem samej CVT.

3. PROPOZYCJA STEROWANIA WIELOPARAMETROWEGO SILNIKIEM

Wymuszenie pracy silnika w obszarze z niskimi prędkościami kątowymi i jak najszybszy wzrost momentu obrotowego odpowiednio do przenoszonej mocy, to koncepcja sterowania ekonomicznego spotykana we wszystkich rozwiązaniach napędów automatycznych. Przykładowo w systemie „Tiptronic” przy delikatnym naciskaniu pedału gazu, linia E na rys. 6 [1], samochód przyspiesza łagodnie, a kolejne wyższe biegi przełączane są przy łagodnym rozpędzaniu; efekt - najmniejsze zużycie paliwa. Szybkie przesunięcie pedału gazu (linia S na rys.6) powoduje, że przez dłuższy czas utrzymywane są

niższe biegi aż do maksymalnej prędkości kątowej silnika i samochód rozpędza się dynamicznie. Także gwałtowne przesunięcie pedału gazu podczas jazdy na najwyższym biegu, np. przy wyprzedzaniu, wywołuje redukcję na bieg niższy, np. z 6-tego na 4-ty, co w efekcie zwiększa dynamikę pojazdu. Na rys. 6 występują inne obszary pracy silnika (inna sprawność, jednostkowe zużycie paliwa i poziomy hałas) podczas realizacji trybu pracy między E i S oraz związaną z nimi kolejność przełączeń biegów.

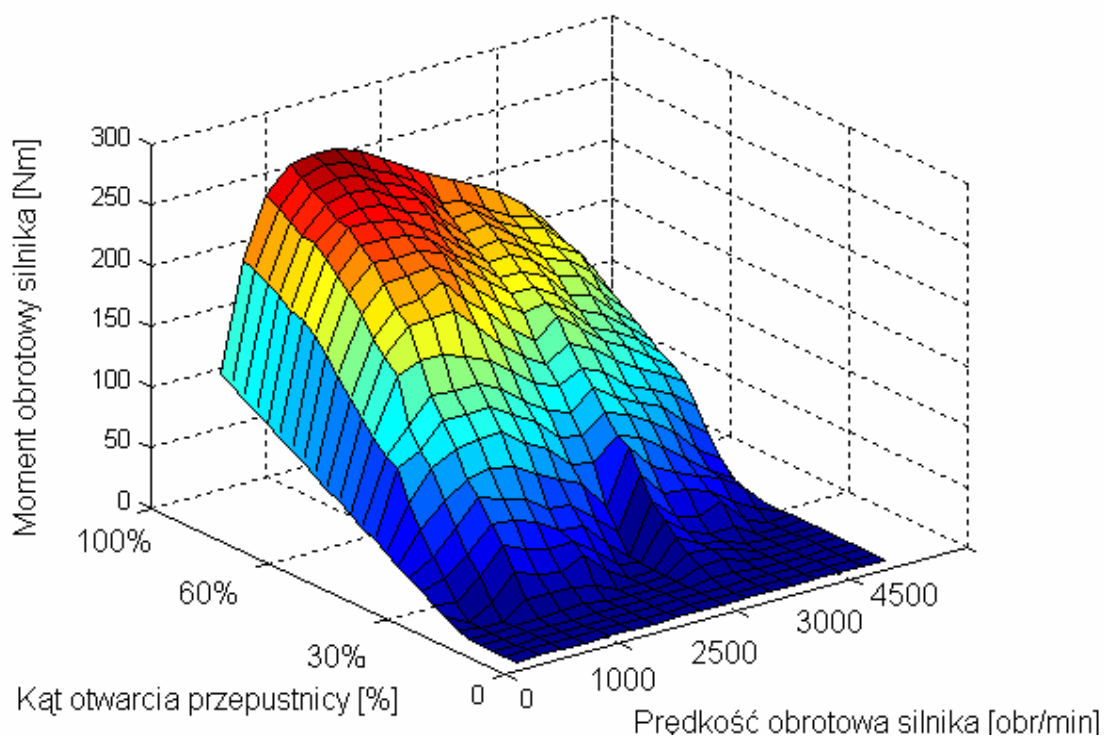


Rys. 6. Wpływ sposobu sterowania skrzynią 6-cio biegową na obciążenie silnika, E – jazda ekonomiczna, S – jazda sportowa, 1,2,3,4,5 i 6 – bieg (opory jazdy) [1]

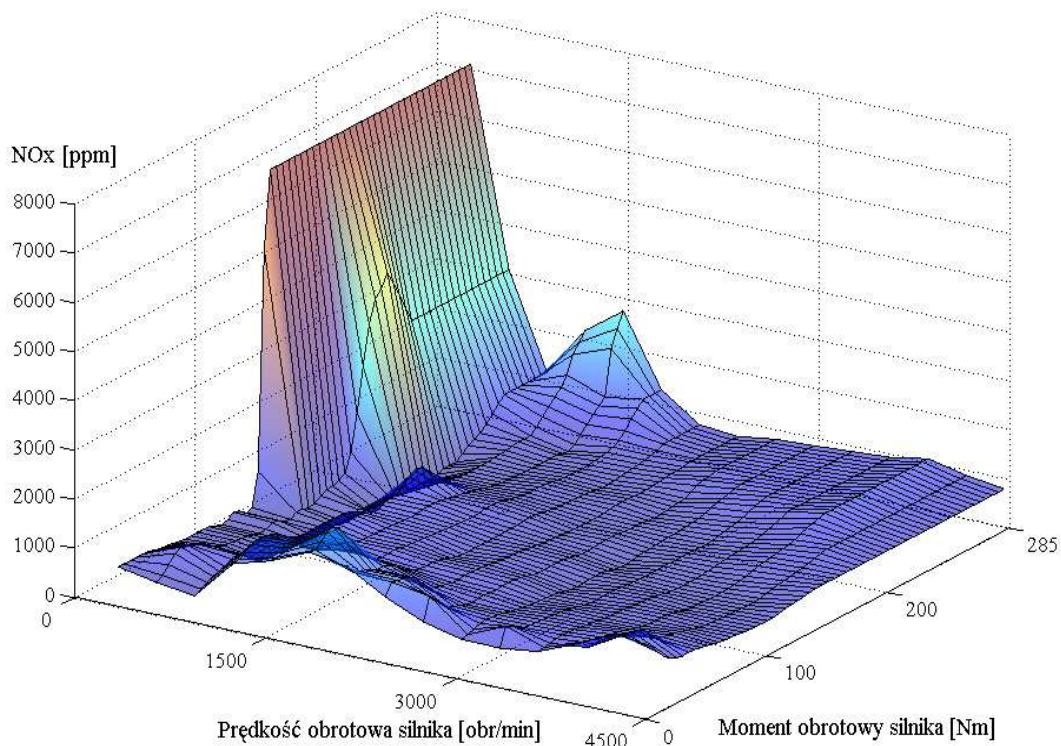
Fig. 6. The effect of the 6-speed gearbox controlling method on the engine load, E- Economic driving, S – Sports driving, 1,2,3,4,5 and 6 – speed (driving resistance) [1]

Łatwo dostrzec zbieżność wyników z symulacji i systemu „Tiptronic”. W badaniach symulacyjnych analizowanych układów napędowych, przesuwając linię pracy silnika $\omega_s = \text{const}$ w kierunku wartości wyższych, otrzymywano większe przebiegowe zużycie paliwa aż do linii S, podobnie jak w pracach [1],[2]. Dla każdego silnika spalinowego (charakterystyka ogólna) i koncepcji skrzyni biegów istnieje linia pracy $\omega_s = \text{const}$, która pozwala osiągnąć najniższe wartości przebiegowego zużycia paliwa, czyli sposób jazdy E.

Posiadając, uzyskane z badań tzw. „mapy silnika”, np. rys. 7 i 8, możliwe staje się opracowanie algorytmów sterowania układem napędowym, tj. silnikiem i skrzynią biegów, odpowiednio do życzeń kierowcy i warunków chwilowych ruchu, wynikających z oddziaływania otoczenia na pojazd. Dla celów symulacji propozycje tych algorytmów zostały również opracowane.



Rys. 7. Charakterystyka momentu obrotowego silnika spalinowego
 Fig. 7. The characteristic of the combustion engine torque



Rys. 8. Emisja tlenków azotu NO_x
 Fig. 8. The emission of the nitric oxide NO_x

Dla każdej z wymienionych charakterystyk silnika (rys. 7 i 8), wyznacza się tzw. linie optymalne, z których następnie przelicza się linie sterowania. Mogą one być średnią ważoną kilku linii optymalnych, przy czym wagi dla poszczególnych linii mogą być również zmienne. Na rozdział wag w poszczególnych kryteriach mają wpływ m.in. liczba składników szkodliwych w spalinach, zużycie paliwa itp. Istnieją różne propozycje sposobu wyznaczania linii sterowania silnika o najniższej przewidywanej średniej ważonej. Jedną z nich może być sposób zaproponowany w [3]. W przypadku sterownika silnika punkty linii sterowania można wyznaczyć jako minimum np. następującej funkcji:

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

gdzie:

w_{xy} - waga parametru „xy”; uzależniając wartość wagi od aktualnie „obsługiwanej” mocy można uwzględnić różne warunki „brzegowe”,

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

K_{xy} – względna wartość parametru „xy” odniesiona do wartości minimalnej np. z norm toksyczności spalin, 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 K_{ijpcel} tworzą 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 propozycja jest „dydaktyczna” i na tyle uniwersalna, że pozwala zwiększać ilość rozważanych parametrów i traktować je w sposób równoważny względem siebie.

Oczywistym jest także możliwość tworzenia innych funkcji optymalizacyjnych, uzmiennianych np. w funkcji położenia w polu charakterystyki uniwersalnej silnika, temperatury oleju, itp. W tym zakresie można skorzystać także z istniejących procedur optymalizacyjnych stosowanych w innych zagadnieniach, np. w sztucznej inteligencji.

Należy podkreślić, że przebieg funkcji sterowania silnikiem powinien uwzględniać spełnienie aktualnie obowiązujących norm toksyczności oraz generować dla tych warunków „linię optymalną” pracy silnika.

Ta część układu sterowania może pozostać wspólna, związana z danym silnikiem.

4. PODSUMOWANIE

Taka filozofia sterowania zintegrowanych układów napędowych pozwala na spełnienie ostrzejszych norm toksyczności spalin na drodze programowej, bez konieczności dokonywania zmian konstrukcyjnych. Konieczne jest wprowadzenie dwóch sterowników: silnika i skrzyni biegów. Z przeznaczenia pojazdu wynika jego charakterystyka idealna napędu, z zastosowanego silnika – jego algorytm sterowania, a ze zmiany skrzyni – modyfikacja jej układu sterującego.

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. Przy tym samym silniku i jego sterowniku, różne skrzynie biegów wpływają na pole pracy silnika i jego charakter, od nieustalonego dla skrzyni konwencjonalnej do ustalonego dla skrzyń z CVT. Ustalona praca silnika, mimo zmiennej prędkości pojazdu, upraszcza algorytm sterowania optymalnego samym silnikiem.

Zaproponowana metoda postępowania przy opracowaniu sterownika skrzyni biegów jest na tyle uniwersalna, że może być wspólna dla napędów niekonwencjonalnych i w niewielkim stopniu zależna od rodzaju zastosowanej przekładni bezstopniowej: automatycznej, CVT, elektrycznej, z równoległym przepływem mocy bądź stopniowej, dwusprzęgłowej DSG. Ilość parametrów sterujących daną skrzynią zależy od jej odmiany, tj. konstrukcji oraz ilości uwzględnianych parametrów i sposobu ich opracowania, np. ZF, Porsche, Mercedes itp. [3]. W tym zakresie istnieje ciągły postęp na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat, wynikający z rozwoju chociażby sterowników mikroprocesorowych i informatyki.

Przedstawiona filozofia sterowania zintegrowanymi zespołami napędowymi cechuje się uniwersalnością i może być zastosowana nie tylko w konstrukcjach samochodów, ale również w pojazdach specjalnych, np. wozach bojowych.

LITERATURA

- [1] MAIER U., PETERSMANN J., SEIDEL W., STOHWASSER A., WEHR T., 1990, *Porsche Tiptronic*, ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift, 92/6, 308-319.
- [2] STALL E., 1985, *Entwicklung einer Elektronischen Regelung für Kraftstoffsparendes Motor-Getriebe-Management im Forschungs-Pkw Uni-Car*, Schriftenreihe Automobiltechnik, Institut für Kraftfahrwesen RWTH, Aachen, Juli.
- [3] PAWELSKI Z., 2010, *Skrzynie automatyczne. Podstawy działania*, Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź.
- [4] <http://auto-motor-i-sport.pl/magazyn/DSG-skrzynia-biegow-technika-4263.html>.

INFLUENCE OF THE TYPE OF GEARBOX ON THE COMBUSTION ENGINE OPERATING PARAMETERS

The paper presents the results of simulation studies of drive systems with different gearboxes that can be used in the same car and the effect of their construction on the functioning of a combustion engine. A method was suggested how to proceed with the construction of the gearbox. The method is so versatile that it can be used for all unconventional drives and it is almost completely independent of the type of the continuously variable transmission used: automatic, CVT, electrical, with a parallel power flow or double-clutch gradual DSG.