

INFLUENCE OF STEERING COURSE OF CVT TO DIESEL FUEL CONSUMPTION AND EXHAUST EMISSION AT ECE CYCLE

Zbigniew Pawleski, Tomasz Pałczyński

Vehicle Institute
Construction and Operating of Machines
Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, Poland
tel.: +48 42 6312392, fax: +48 22 6312398
e-mail: pawelski@p.lodz.pl, tomaszpalczynski@wp.pl

Abstract

Present article shows the influence of steering course of CVT-Continuous Variable Transmission to engine load trajectory at established vehicle speed profile by engine throttle.

In this aim, at the first part is shown vehicle and their driveline model. There was described simulating model and the main subsystem having major influence to analyzed problem, made near help of MatLab Simulink R2007a software. There was shown one and multi objective optimal lines conception.

At the second part, there was presented proposition of CVT steering course at four Variants, and also shown results of simulating investigation for proposed Variants.

At final part, there was analyzed results of simulating investigations and future work according to presented problems. Results of work showed the influence control graph of drive on the trajectory of an engine load. The control graph of stepless drive is relative to the profile of the speed and the universal engine performance. It is possible to change work range by graph choice of system, wherethrough one can exclude programmatically unfavorable areas on work of the combustion engine.

Keywords: engine steering, continuous variable transmission, fuel consumption, exhaust emission, modelling and simulation of vehicle drivetrain.

WPLYW KRZYWEJ STEROWANIA PRZEKLADNIĄ CVT NA ZUŻYCIE PALIWA I EMISJĘ SPALIN UKŁADU NAPĘDOWEGO Z SILNIKIEM O ZS W CYKLU ECE

Streszczenie

Niniejsza praca przedstawia analizę wpływu krzywej sterowania przekładnią CVT-Continuous Variable Transmission na trajektorię obciążenia silnika przy realizacji założonego profilu prędkości przez kąt otwarcia przepustnicy.

W tym celu, w pierwszej części pracy przedstawiono pojazd i model jego układu napędowego. Opisano budowę modelu symulacyjnego wykonanego przy użyciu programu MatLab Simulink R2007a, a także jego głównych podsystemów mających decydujący wpływ na analizowane zjawisko. Przedstawiono koncepcję silnikiem jedno i wielokryterialnych linii optymalnych sterowania.

W drugiej części pracy zaprezentowano propozycję krzywej sterowania przekładnią CVT w czterech wariantach a także przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla proponowanych wariantów linii sterowania.

W końcowej części pracy zostały poddane analizie wyniki badań symulacyjnych oraz przewidywane dalsze prace w ramach prezentowanego zagadnienia. Wyniki pracy pokazały wpływ krzywej sterowania przekładnią na trajektorię obciążenia silnika. Krzywa sterowania przekładnią bezstopniową zależy od profilu prędkości i charakterystyki uniwersalnej silnika. Możliwa jest zmiana obszaru pracy przez dobór tej krzywej układu, przez co można wykluczyć programowo obszary niekorzystne w pracy silnika spalinowego.

Słowa kluczowe: sterowanie silnikiem, przekładnia bezstopniowa, zużycie paliwa, emisja toksycznych składników spalin, modelowanie i symulacja układów napędowych pojazdów

1. Opis modelu [5]

Do modelu silnika wykorzystano charakterystyki silnika VW1.9TDI typ AJM, określone na podstawie badań na hamowni silnikowej firmy Schenck w Instytucie Pojazdów, Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Łódzkiej. Punkty tych charakterystyk określono dla stanów ustalonych tj. bez uwzględnienia dynamiki przejścia od jednego punktu pomiarowego do kolejnego. Z faktu połączenia pedału przyspieszenia z przepustnicą znajdującą się w kolektorze dolotowym wynika związek, że stopień obciążenia silnika jest funkcją kąta otwarcia przepustnicy.

Przedstawienie charakterystyk w układzie trójwymiarowym jest naszą propozycją do realizacji badań symulacyjnych silnika w danym układzie napędowym.

Charakterystyka uniwersalna oraz skojarzone z nią charakterystyki toksyczności spalin to tzw. „mapy robocze” modelu symulacyjnego. Znajomość w danej chwili prędkości obrotowej silnika i kąta otwarcia przepustnicy umożliwia odczyt momentu obrotowego z charakterystyki uniwersalnej a także wartość emisji wybranego składnika toksycznego spalin.

Model układu napędowego zbudowano bez uwzględnienia zwłoki w działaniu przekładni bezstopniowej (CVT- Continuous Variable Transmission) podczas zmiany przełożenia. Uwzględniono jedynie zmianę momentów bezwładności w funkcji przełożenia, przez analogię do przekładni stopniowej.

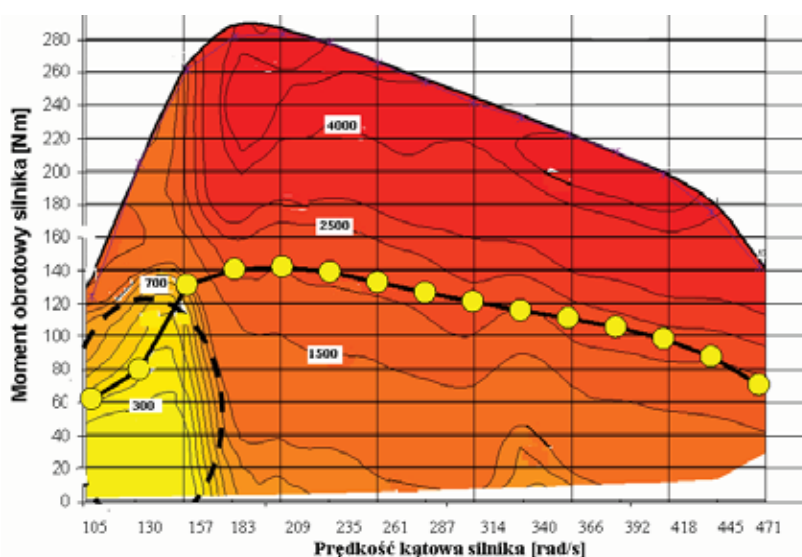
Podstawowe parametry trakcyjne modelowanego pojazdu:

- masa całkowita pojazdu $m=1925$ kg,
- współczynnik oporu powietrza $c_x=0,28$,
- pole powierzchni rzutu powierzchni czołowej pojazdu $A=1,98$ m²,
- przełożenia: $i_1=35/10$; $i_2=35/18$; $i_3=38/31$; $i_4=31/37$; $i_5=27/41$; $i_{pg}=35/9$,
- ogumienie 195/65 R15,
- prędkość maksymalna 192 km/h,
- czas rozpędzania 0-100km/h 12,5 s (silnik 1.9 TDI z manualna-stopniową zmianą biegów),
- zredukowane momenty bezwładności układu napędowego i silnika na wał silnika przyjęto na podstawie katalogowego-wymaganego czasu rozpędzania pojazdu.

Do modelu wczytano linie optymalne [4] jedno i wielokryterialne sterowania silnika, które wskazują na zalecany obszar pracy. W modelu przedstawionym na rysunku 2 (MatLab Simulink), kolorem czarnym oznaczono zmienne opisujące ruch pojazdu, natomiast szarym zmienne sterujące.

W modelu można wyróżnić następujące bloki:

- Test- zadaniem jest śledzenie założonego przebiegu prędkości pojazdu. Model został zbudowany tak by była możliwość symulacji pracy układu napędowego pojazdu poruszającego się wg wybranego cyklu jazdy. Jego zadanie realizowane jest przez określenie współczynnika korekcyjnego, tzw. wagi prędkości wyrażonej w procentach, która stanowi podstawę do wyznaczenia wymaganego kąta otwarcia przepustnicy w bloku „Układ śledzenia linii optymalnej”,
- Układ śledzenia linii optymalnej [3]- zadaniem jest zmiana kąta otwarcia przepustnicy tak, by przebieg momentu obrotowego silnika pokrywał się z wymaganym wynikającym z założonego przebiegu prędkości pojazdu (waga prędkości) lub z wybranej linii optymalnej [4]. Linie optymalne zostały określone jako krzywe na charakterystyce momentu obrotowego silnika w funkcji prędkości kątowej. W pierwszym etapie optymalizacji wyznaczono jednokryterialne linie optymalne a następnie określono wielokryterialne linie optymalne jako średnie ważone linii z pierwszego etapu. Współczynniki wag uwzględniały w sposób zmienny wzajemną zależność pomiędzy danym szkodliwym składnikiem spalin na środowisko, jednostkowym zużyciem paliwa rozumianym jako wskaźnik efektywności silnika, a także czasem rozpędzania pojazdu. Przykładowo na rysunku 1 przedstawiono przebieg jednokryterialnej linii optymalnej ze względu na emisję NO_x,



Rys. 1. Przebieg linii sterowania, optymalnej ze względu na emisję NO_x [ppm] [5]

Fig. 1. Steering line course, optimal emission of NO_x [ppm] [5]

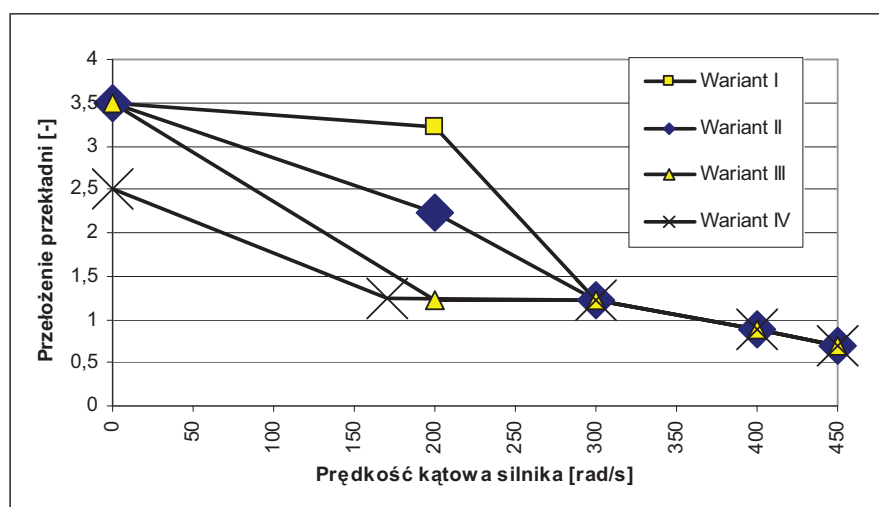
- Równanie ruchu- zadaniem jest rozwiązanie równań ruchu pojazdu na podstawie chwilowych wartości momentów obrotowych silnika i oporów ruchu a także przełożenia całkowitego,
- Toksyczność- zadaniem jest wyznaczenie, na podstawie chwilowej prędkości kątowej silnika i momentu oraz wczytanych map, emisji poszczególnych toksycznych składników spalin,
- Opory ruchu i bezwładności- zadaniem jest określenie oporów ruchu na podstawie prędkości pojazdu i aktualnego przełożenia,
- Bilans popytu i podaży sił - zadaniem jest zbilansowanie sił na kołach napędowych.

Sygnaly zmiennych sterujących zebrano w szynie danych co przez analogię do szyn CAN-BUS (rozwiązanie obecnie powszechnie stosowane w dziedzinie sterowania, m.in. pojazdów), znacznie upraszcza budowę modelu. Kilka sygnałów zgrupowano w „jednym przewodzie”, np. bieg jałowy, ruszanie, zatrzymanie, hamowanie czy waga opóźnienia hamowania jak na schemacie rysunek 4.

2. Krzywa sterowania przekładnią CVT

Obecnie sterowanie automatycznymi przekładniami w pojazdach samochodowych odbywa się najczęściej za pomocą trójwymiarowych map uzupełnianych o wielkości korekcyjne i adaptacyjne wynikające z eksploatacji pojazdu. Sterowanie przy użyciu trójwymiarowych map znacznie skraca czas przetwarzania danych a także umożliwia określanie praktycznie dowolnych przebiegów krzywych sterowania. Procedury korekcyjne mogą uwzględniać warunki techniczne towarzyszące pracy układu np. temperatura otoczenia [2], przebieg pojazdu, czas pozostały do najbliższego przeglądu okresowego. Procedury adaptacyjne mogą uwzględniać styl jazdy kierowcy a także warunki eksploatacji (góry, jazda poza miastem). Procedury adaptacyjne i korekcyjne mogą być określone jako zależności jednowymiarowe (tzw. krzywe korekcyjne) ale także dwu czy też trójwymiarowe. Obie wymienione procedury swym działaniem sprowadzają się do dodawania do wartości zadanej wynikającej z podstawowej mapy sterowania pewnej wielkości korekcyjnej. Przekładnia bezstopniowa umożliwiając ciągłą zmianę przełożenia, wprowadza dodatkowy stopień swobody do układu napędowego. Wydaje się, iż świadome jego wykorzystanie może zwiększyć sprawność całego układu czy też wykluczyć obszary niekorzystne ze względu na wybrane kryterium np. wysokiej toksyczności spalin. Na rysunku 3 przedstawiono propozycję krzywej sterowania przekładnią CVT, w czterech wariantach, jako funkcję prędkości kątowej silnika. Krzywa-Wariant II jako bazowa, zastała wyznaczona przez przyporządkowanie wartości kolejnych przełożeń stopniowej przekładni stosowanej w tego typu pojeździe kolejnym prędkościom kątowym silnika.

Warianty I,II,III, rysunek 3, uwzględniają zmianę wartości drugiego punktu linii sterownia, tj. Wariant I- przełożenie 3.244, Wariant II- przełożenie 2.244, Wariant III- przełożenie 1.244. Natomiast Wariant VI w porównaniu do Wariantu III zmienia wartość przełożenia dla pierwszego punktu sterowania z 3.5 do 2,5 a także prędkość kątową drugiego punktu z 200 do 170 rad/s.



Rys. 3. Krzywa sterowania przekładnią CVT jako funkcja prędkości obrotowej silnika
 Fig. 3. Steering course of CVT transmission as engine angular speed function

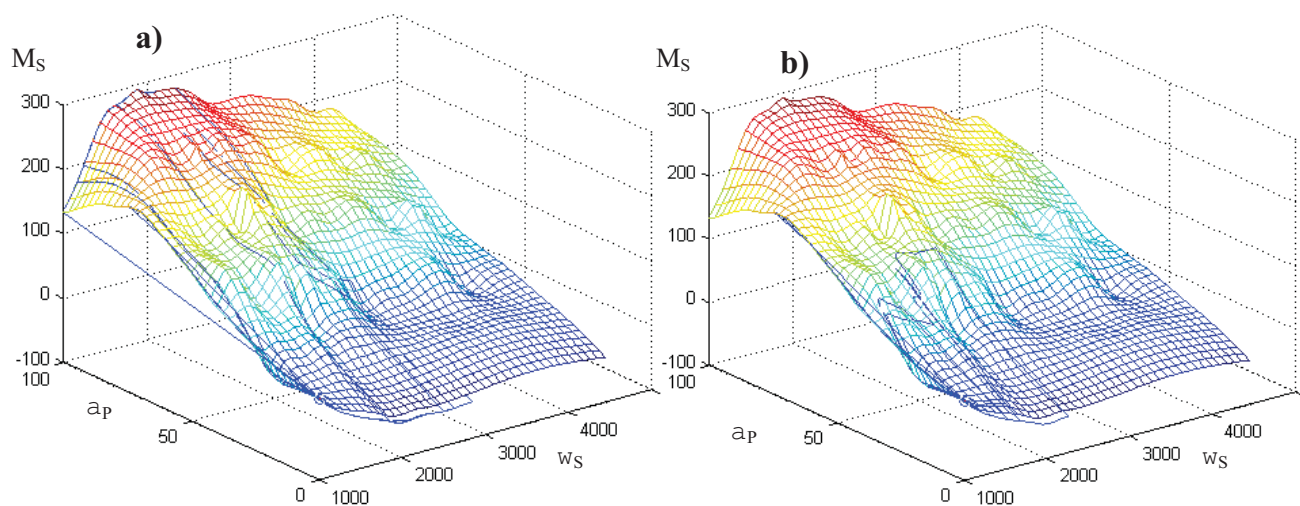
Zaproponowane krzywe wczytano do modelu a do bloku Test wczytano przebieg cyklu ECE. Blok Układ śledzenia linii optymalnej na podstawie sygnałów (wagi prędkości) z bloku Test wyznaczył wymagany przebieg kąta otwarcia przepustnicy w czasie symulacji (czas 195 s zgodnie z testem ECE). Cykl ECE zawiera trzy główne etapy, z czego pierwsze dwa zawierają po jednej fazie rozpędzania, natomiast trzeci etap cyklu zawiera fazę rozpędzania i jazdy ze stałą prędkością przedzielone fazą hamowania. Efektem tego jest trajektoria analizowanych wielkości z charakterystycznymi pętlami, ze względu na pracę silnika na biegu jałowym (kąt otwarcia przepustnicy o wartości zero procent) w fazie hamowania i postoju.

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg zmienności momentu obrotowego silnika w funkcji prędkości kątowej silnika i kąta otwarcia przepustnicy na tle charakterystyki uniwersalnej silnika. Widoczna jest znaczna zmiana obszaru pracy układu. Dla Wariantu IV występuje zmniejszenie obciążenia silnika w układzie napędowym pojazdu. Maksymalna różnica w obciążeniu silnika pomiędzy analizowanymi wariantami wynosi nawet 50%.

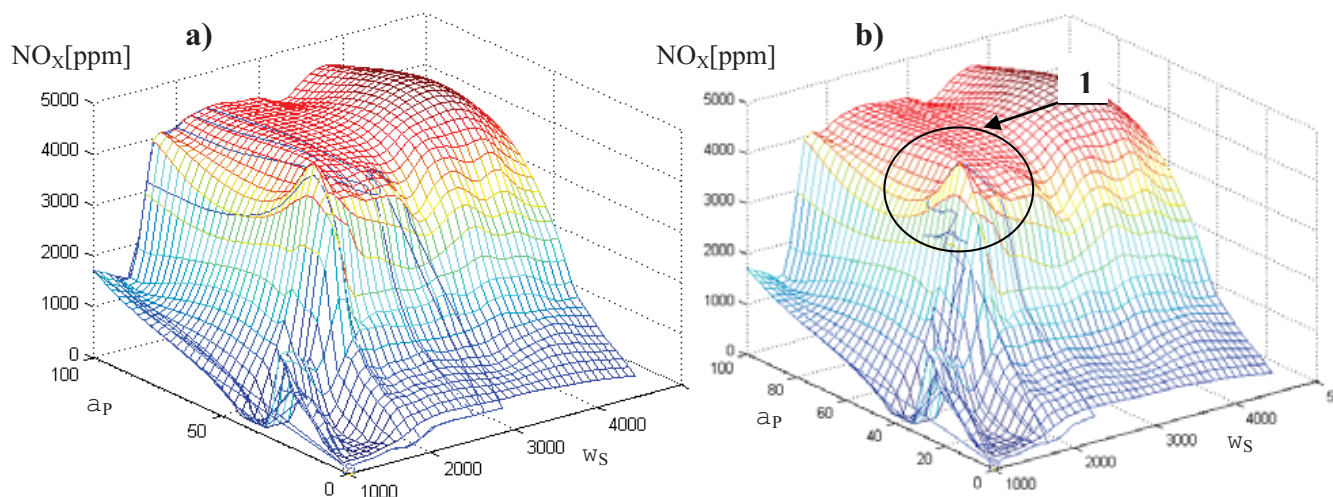
Na rysunku 5 przedstawiono przebieg zmienności chwilowej emisji NO_x w funkcji prędkości kątowej silnika i kąta otwarcia przepustnicy na tle charakterystyki uniwersalnej emisji w/w toksycznego składnika spalin. Dla Wariantu IV występuje zmiana obszaru pracy silnika, co w przypadku tej charakterystyki znacznie zmniejsza średnią emisję NO_x w spalinach. Wystąpiło przejście z obszaru płaskiego wysokich wartości emisji NO_x do obszaru niskich i przejściowych wartości. Ponadto warto zwrócić uwagę na obszar 1 na rysunku 5b, proponowana linia sterowania Wariant IV zapewniła dodatkowo wykluczenie maksimum lokalnego. Zmiana krzywej sterowania przekładnią CVT przesuwa obszar pracy układu napędowego w zakresy bardziej ekologiczne. Jak z przedstawionych przykładów wynika kształt linii sterowania przekładnią CVT ma znaczący wpływ na pracę silnika w takim układzie napędowym.

Kolejnym etapem badań symulacyjnych była analiza wielkości charakterystycznych pracy układu napędowego w cyklu ECE:

- średnie jednostkowe zużycie paliwa [g/hWh*km],
- przebiegowe zużycie paliwa [g] i [$\text{dcm}^3/100\text{km}$],
- średniej emisji toksycznych składników spalin NO_x , CO, CH [ppm], zebranych w tabeli 1.



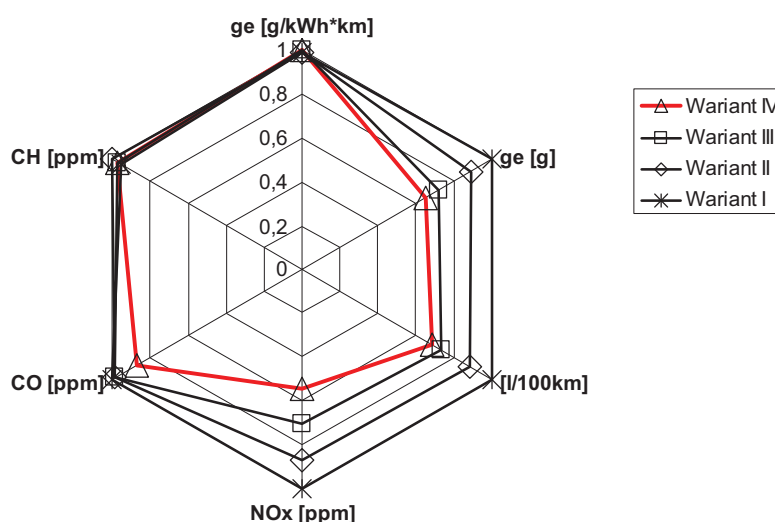
Rys. 4. Przebieg zmienności momentu obrotowego M_S [Nm] w funkcji kąta otwarcia przepustnicy a_p [%] i prędkości kątowej silnika w_s [rad/s] na tle charakterystyki uniwersalnej silnika (a- Wariant I, b- Wariant IV)
 Fig. 4. Engine moment course M_S [Nm] as engine throttle a_p [%] and angular engine speed w_s [rad/s] on engine universal characteristic background (a- Variant I, b- Variant IV)



Rys. 5. Przebieg zmienności chwilowej emisji NO_x [ppm] w funkcji kąta otwarcia przepustnicy a_p [%] i prędkości kątowej silnika w_s na tle charakterystyki uniwersalnej silnika (a- Wariant I, b- Wariant IV)
 Fig. 5. Temporary emission course of NO_x [ppm] as engine throttle a_p [%] and angular engine speed w_s [rad/s] on engine universal characteristic background (a- Variant I, b- Variant IV)

Tab. 1. Zestawienie wyników badań symulacyjnych pracy układu napędowego z przekładnią CVT
 Tab. 1. Composition of simulating investigations results of driveline with CVT work

	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IV	(W II–W I)/W I	(W III–W I)/W I	(W IV–W I)/W I
ge [g/kWh*km]	238,2	238,3	240,5	241	-0,04%	-0,97%	-1,18%
ge [g]	87	77	62,3	56,6	11,5%	28,3%	34,94%
[l/100km]	10,4	9,2	7,6	7,1	11,5%	27,1%	31,73%
NO _x [ppm]	712	621	500,9	388,3	12,8%	29,6%	45,46%
CO [ppm]	934	915	918,77	810,2	2,1%	1,6%	13,25%
CH [ppm]	62	65	63	63	-4,8%	-1,6%	-1,61%



Rys. 6. Porównanie wyników badań symulacyjnych układu napędowego z przekładnią CVT dla analizowanych wariantów

Fig. 6. Comparison of simulating investigations results of driveline with CVT for analyzed variants

Jak wynika z tabeli 1 i rysunku 6, Wariant IV w porównaniu do Wariantu I zapewnia:

- znaczne zmniejszenie wielkości charakterystycznych, nawet do 45% w przypadku średniej emisji NO_x ,
- poprawę analizowanych wielkości charakterystycznych przy nieznacznym (poniżej 2%) pogorszeniu dwóch z nich:
 - emisji CH [ppm],
 - średniego jednostkowego zużycia paliwa [g/hWh*km].

Pogorszenie w/w wielkości następuje ze względu na pracę układu poza obszarem ich minimalnych wartości.

Jednocześnie warto zauważyć, iż w/w wielkości mają płaską charakterystykę (zmniejszenie wartości ze względu na zmianę obszaru pracy o rząd mniejszą w porównaniu do charakterystyki NO_x).

- zmniejszenie przebiegowego zużycia paliwa [$dm^3/100km$] (przy płaskiej charakterystyce jednostkowego zużycia paliwa) ze względu na pracę silnika w obszarach o mniejszej średniej mocy. Dodatkowo, zakładając iż hałaśliwość pracy silnika jest także funkcją jego obciążenia, można spodziewać się obniżenia także tej wielkości.

3. Podsumowanie

Niniejsza praca pokazała wpływ krzywej sterowania przekładnią CVT na trajektorię obciążenia silnika przy realizacji założonego profilu prędkości przez kąt otwarcia przepustnicy. Krzywa sterowania przekładnią bezstopniową zależy od realizowanego profilu prędkości i charakterystyki uniwersalnej silnika. Przez dobór tej krzywej możliwa jest zmiana obszaru pracy układu, dzięki temu można wykluczyć programowo obszary niekorzystne w pracy silnika spalinowego.

W zależności od trybu jazdy priorytetowe są różne obszary pracy silnika:

- dla jazdy ekologicznej będą to obszary o niskiej emisji toksycznych składników spalin,
- dla jazdy ekonomicznej będą to obszary o niskim jednostkowym zużyciu paliwa i niskiej mocy silnika (jest to szczególnie ważne w przypadku silników o płaskiej charakterystyce jednostkowego zużycia paliwa),
- dla jazdy dynamicznej będą to obszary o wysokim momencie obrotowym silnika.

Z powyższej analizy wynika, iż konieczne jest opracowanie większej liczby krzywych sterowania przekładnią bezstopniową, które powinny zmieniać się w zależności od trybu jazdy np. przez zbudowanie tzw. mapy sterowania przekładnią CVT.

Przewidywane dalsze prace:

- przeprowadzenie programowej optymalizacji (Simulink Responce Optimization) poszczególnych linii sterowania przekładnią a następnie wypracowanie mapy sterowania,
- wypracowanie trójwymiarowych linii optymalnych, w pracy [4] wyznaczono linie optymalne sterowania silnikiem w układzie płaskim.

Literatura

- [1] Bernhardt, M., Michałowski, J., Radzimirski, St., *Motoryzacyjne skażenie powietrza*, WKiŁ, Warszawa, 1976.
- [2] Brace, C. J., Deacon, M., Vaughan, N. D., Burrows, C. R., *Operating point optimizer for integrated diesel CVT powertrain*, Application of Powertrain and Fuel Technologies to Meet Emissions Standards for the 21st Century, Seminar code C517, June, 1996.
- [3] Nikiel, G., *Optymalizacja wielokryterialna w projektowaniu procesów wytwarzania-wybrane zagadnienia* (Raport z badań własnych), ATH Bielsko-Biała 2004, www.ath.bielsko.pl/~gnikiel/publik/optym.pdf.
- [4] Pawleski, Z., Pałczyński, T., *Linie optymalne sterowania silnikiem*, Archiwum Motoryzacji 1/2007.
- [5] Pałczyński, T., *Badania symulacyjne układu napędowego z przekładnią CVT*, Praca Dyplomowa, Instytut Pojazdów PŁ, czerwiec, 2002.
- [6] Pawleski, Z., Pałczyński, T., *Procedura analizy stanów dynamicznych pracy silnika spalinowego w układzie napędowym z przekładnią CVT z wykorzystaniem programu Matlab-Simulink*, Dynamical Systems Theory and Applications DSTA, December 17-20, Łódź, Poland, 2007.