

PORÓWNANIE PRZEBIEGU PROCESU ROZPĘDZANIA PRZY CIĄGŁEJ I STOPNIOWEJ ZMIANIE PRZEŁOŻENIA W SAMOCHODZIE OSOBOWYM

COMPARISON OF PASSENGER CAR ACCELERATION PROCESS BY STEPPED AND CONTINUOUSLY DRIVE TRAIN RATIO CHANGES

W opracowaniu porównano przebieg procesu rozpędzania samochodu przy ciągłej i stopniowej zmianie przełożenia. Szczególną uwagę skupiono na dynamicznych aspektach procesu. Wykazano, że algorytm sterowania przełożeniem przekładni znacząco wpływa na czas rozpędzania i straty mocy.

Słowa kluczowe: profil prędkości, wskaźnik mocy, przekładnia bezstopniowa

In this paper the acceleration process of passenger car with continuously an stepped transmission has been compared. The main attention focus on dynamic aspects. It has been proved that the transmission ratio control algorithm has a great influence on acceleration time and power loses.

Keywords: velocity profile, power index, continuously variable transmission

1. Wprowadzenie

Obserwowany wzrost liczby samochodów wyposażonych w przekładnie o przełożeniu zmiennym w sposób ciągły [2], [3], skłania do szczegółowej analizy własności ruchowych jakie wykazuje samochód przy takiej koncepcji układu przeniesienia napędu. W opracowaniu uwagę skupiono na procesie rozpędzania samochodu, porównując jego przebieg przy ciągłej i stopniowej zmianie przełożenia w układzie przeniesienia napędu.

2. Analiza teoretyczna

Przebieg procesu rozpędzania samochodu istotnie zależy od zapasu siły napędowej na kołach jezdnych

$$F_z = F_n - F_{tp} \quad (1)$$

gdzie: F_n – siła napędowa, F_z – zapas siły napędowej, F_{tp} – siła oporu powietrza i toczenia.

Tak zdefiniowany zapas siły napędowej jest wykorzystywany do przyspieszania mas w ruchu postępowym jak i obrotowym. Można zatem zapisać

$$F_z = m \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{1}{r_d} \sum_n I_k \cdot \varepsilon_k + \frac{i_c}{r_d} \cdot I_s \cdot \varepsilon_s \quad (2)$$

gdzie: m – masa samochodu, I_k – moment bezwładności koła jezdnych, n – liczba kół jezdnych, r_d – promień dynamiczny koła, ε_k – przyspieszenie kątowe koła jezdnych, I_s – moment bezwładności silnika, ε_s – przyspieszenie kątowe silnika, i_c – przełożenie całkowite układu przeniesienia napędu.

W przypadku przekładni stopniowej ($i_c = \text{const}$ dla danego biegu), można zapisać

$$\varepsilon_k = \frac{d\omega_k}{dt} = \frac{d\left(\frac{v}{r_d}\right)}{dt} = \frac{1}{r_d} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3)$$
$$\varepsilon_s = \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{d(i_c \cdot \omega_k)}{dt} = \frac{i_c}{r_d} \cdot \frac{dv}{dt}$$

Stąd

$$F_z = \frac{dv}{dt} \left(m + \frac{1}{r_d^2} \sum I_k + \frac{i_c^2}{r_d^2} \cdot I_s \right) = \frac{dv}{dt} (w_1 + w_2 \cdot i_c^2) \quad (4)$$

gdzie:

$$w_1 = m + \frac{1}{r_d^2} \sum I_k, w_2 = \frac{1}{r_d^2} \cdot I_s \quad (5)$$

W przypadku samochodu wyposażonego w przekładnię bezstopniową $i_c \neq \text{const}$, zatem

$$\varepsilon_s = \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{d(i_p \cdot i_g \cdot \omega_k)}{dt} = i_g \frac{di_p}{dt} \cdot \omega_k + \frac{d}{dt} \quad (6)$$

$$\varepsilon_s = i_g \tau \cdot \omega_k + i_c \cdot \varepsilon_k \quad (7)$$

gdzie: τ - prędkość zmiany przełożenia przekładni (di/dt).

Przez analogię do układu przeniesienia napędu o skokowo zmiennym przełożeniu zapas siły napędowej w przypadku ciągłej zmiany przełożenia jest równoważny

$$F_z = m \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{1}{r_d^2} \cdot \frac{dv}{dt} \sum_n I_k + \frac{i_c}{r_d} \cdot I_s \cdot (i_g \cdot \omega_k \cdot \tau + \frac{i_c}{r_d} \cdot \frac{dv}{dt}) \quad (8)$$

Po uporządkowaniu otrzymuje się

$$F_z = \frac{dv}{dt} \left[m + \frac{1}{r_d^2} \cdot \sum_n I_k + \left(\frac{\omega_s}{v} \right)^2 \cdot I_s \right] \quad (9)$$

Wykorzystując zależność (1) po podstawieniu

$$F_n = \frac{N_n^k}{v} \quad (10)$$

oraz

$$N_n^k = N_e \cdot \eta_m \quad (11)$$

gdzie: N_e – moc efektywna

otrzymuje się

$$N_e \cdot \eta_m - \frac{\omega_s^2}{i_p} \cdot I_s \cdot \tau = v \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \left[m + \frac{1}{r_d^2} \cdot \sum_n I_k + \left(\frac{\omega_s}{v} \right)^2 \cdot I_s \right] - v \cdot F_{tp} \quad (12)$$

Wyrażenie po lewej stronie zawierające takie wielkości jak: sprawność mechaniczna układu przeniesienia napędu, przełożenie przekładni oraz prędkość zmiany tego przełożenia są trudne do określenia. Zaproponowano zatem wprowadzenie nowej wielkości

$$N^* = N_e \cdot \eta_m - \frac{\omega_s^2}{i_p} \cdot I_s \cdot \tau \quad (13)$$

dla której przyjęto termin „moc porównawcza”. W opracowaniu zbadano przebieg zmian tego wskaźnika podczas przyspieszania samochodu przy różnych algorytmach sterowania przełożeniem przekładni.

3. Obiekt i sposób prowadzenia badań

Do badań wykorzystano samochód osobowy Fiat Punto, którego podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 1.

Układ sterowania samochodu doświadczalnego umożliwił ciągłą oraz skokową zmianę przełożenia przekładni. Takie rozwiązanie pozwala na rozpędzanie samochodu w zróżnicowany sposób. Rozpędzanie przy ciągłej zmianie przełożenia badano dla trzech różnych strategii sterowania oznaczonych symbolami D, DE oraz L. Rozpędzanie realizowane przy skokowej zmianie przełożenia oznaczono symbolem S. Próby rozpędzania wykonano przy różnej początkowej wartości prędkości ruchu dla zadanego zakresu zmiany wychylenia pedału przyspieszenia.

Tab. 1. Podstawowe dane samochodu doświadczalnego

Tab. 1. Technical data of experimental vehicle

Lp.	Cecha	Wartość, opi
1.	Całkowita masa samochodu	1200 kg
2.	Powierzchnia czołowa	2,12 m ²
3.	Typ i rodzaj silnika	ZI MPI
4.	Moc maksymalna / przy prędkości silnika	59 kW / 5000 obrmin ⁻¹
5.	Moment maksymalny / przy prędkości silnika	114 Nm / 4000 obrmin ⁻¹
6.	Współczynnik kształtu nadwozia	0,32
7.	Typ i rodzaj przekładni	Fuji HyperM6
8.	Promień dynamiczny koła	0,29
9.	Rozpiętość przełożenia przekładni CV	0442-2,432
10.	Sposób sterowania przekładni	Elektroniczno-hydrauliczny
11.	Przełożenie przekładni głównej	4,647
12.	Pojemność skokowa silnik	1,242 dm ³

4. Wyniki badań

Przykładowe profile prędkości uzyskane podczas prób rozpędzania samochodu przedstawiono na rysunku 1. Jak widać czas rozpędzania do kontrolnej prędkości 35 m/s zawiera się w przedziale od 29 do 34 s. Warto jednak zwrócić uwagę na niewielką różnicę czasu rozpędzania przy strategii D i L wynoszącą zaledwie 1,3 s. Z załączonych wykresów wynika także, że zmiana przełożenia w sposób ciągły (rys. 1c) skraca czas rozpędzania samochodu o ok. 4% w porównaniu z uzyskiwanym przy skokowej zmianie przełożenia w przekładni (rys. 1d). W próbie przyspieszania (rys. 2) charakteryzującej się znacznym przyrostem prędkości ruchu (ok. 20 m/s), uzyskano podobne zależności. Jednak przy małym zakresie zmiany prędkości ruchu (ok. 10 m/s) czas przyspieszania przy zmianie przełożenia w sposób skokowy (rys. 2c) i ciągły (rys. 2d) jest zbliżony.

W celu określenia wartości wskaźnika N^* przyspieszenie wzdłużne samochodu obliczono korzystając z zarejestrowanego ciągu chwilowych wartości prędkości liniowej [5]

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2 \cdot v_{i+2} + v_{i+1} - v_{i-1} - 2 \cdot v_{i-2}}{10 \cdot \Delta t} \quad (14)$$

Wartość wskaźnika N^* obliczono z zależności (13) przy uwzględnieniu granicznej wartości siły napędowej na kołach. Siłę podstawowego oporu ruchu obliczono według wzoru

$$F_{fp} = m \cdot g \cdot (f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^4) + c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 \quad (15)$$

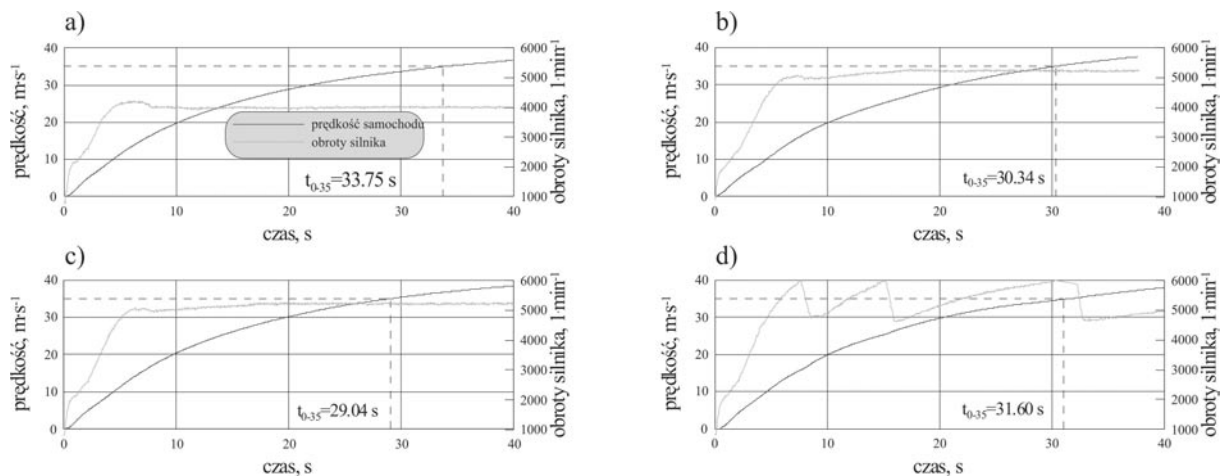
gdzie: g – przyspieszenie ziemskie, f_0, f_1, f_2, f_4 – współczynniki oporu toczenia [4], c_x – współczynnik kształtu nadwozia, ρ – gęstość powietrza, A – powierzchnia czołowa samochodu.

Przebiegi wskaźnika N^* przy różnych programach i strategiach sterowania przełożeniem dla wybranych wartości początkowej prędkości ruchu, przedstawiono na rysunku 3. W przypadku, gdy przełożenie przekładni zmienia się w sposób ciągły, wartość wskaźnika N^* początkowo rośnie niemal liniowo a po osiągnięciu pewnego pułapu, utrzymuje się na niemal stałym poziomie. Szybkość narastania wartości wskaźnika N^* zależy przy tym od programu sterowania przełożeniem. W przypadku stopniowej zmiany przełożenia (rys. 3d) zmiany wartości wskaźnika N^* cechuje charakterystyczny piłokształtny przebieg.

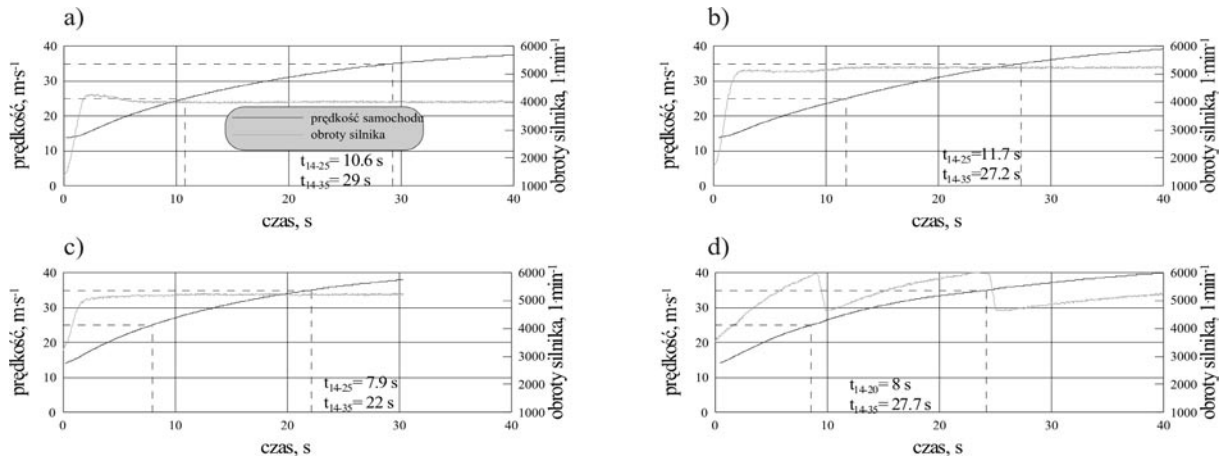
Zmiany wskaźnika N^* w funkcji prędkości obrotowej silnika dla rozważanych wariantów sterowania przełożeniem przekładni przedstawiono na rysunku 4.

W celu ilościowej oceny na wykresach zaznaczono również przebieg charakterystyki zewnętrznej silnika.

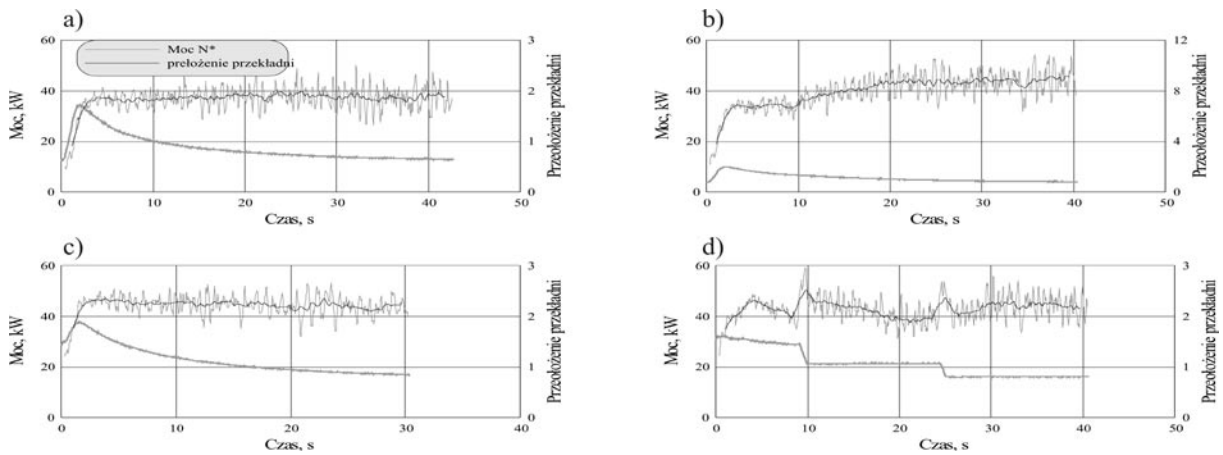
W przypadku ciągłej zmiany przełożenia przebieg wskaźnika N^* znacznie odbiega od charakterystyki zewnętrznej silnika (linia przerywana). Różnica pomiędzy rozpatrywanymi strategiami sterowania polega głównie na wykorzystaniu innego fragmentu charakterystyki silnika. Również przy skokowej zmianie przełożenia wskaźnik N^* istotnie odbiega od charakterystyki statycznej silnika. Charakter tych zmian jest jednak całkowicie odmienny od obserwowanego przy ciągłej zmianie przełożenia, a krótszy czas upływający do chwili osiągnięcia przez silnik obrotów mocy maksymalnej przy ciągłej zmianie przełożenia sprawia, że przyspieszanie samochodu jest bardziej intensywne. Stratę mocy, rozumianą jako różnicę wartości mocy silnika na charakterystyce zewnętrznej i wskaźnika N^* przedstawiono na rysunku 5. Z wykresów wynika, że algorytm sterowania przełożeniem przekładni istotnie wpływa na straty mocy napędowej.



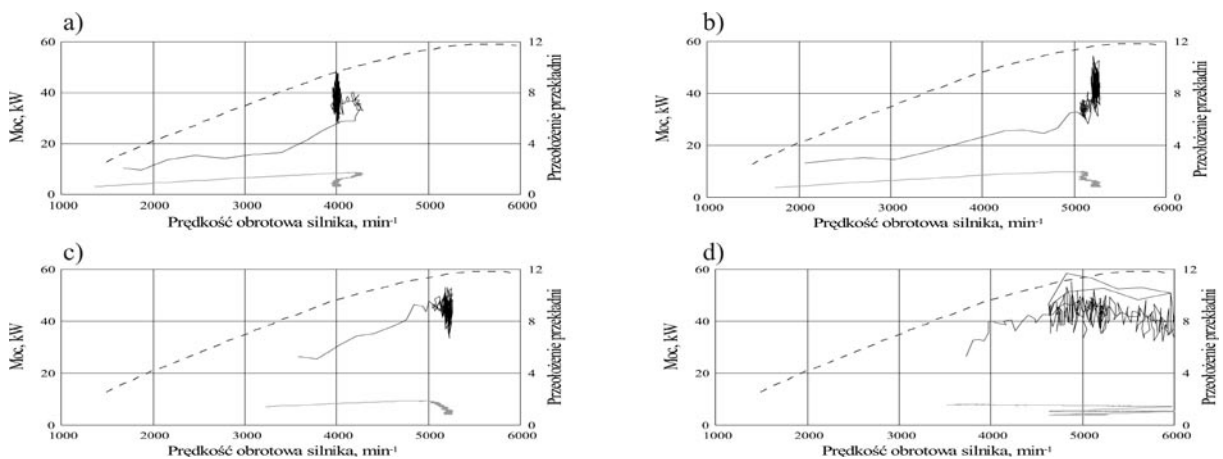
Rys. 1. Próba rozpędzania samochodu: a) strategia DE, b) strategia D, c) strategia L, d) strategia S
 Fig. 1. Acceleration test of vehicle: a) strategy DE, b) strategy D, c) strategy L, d) strategy S



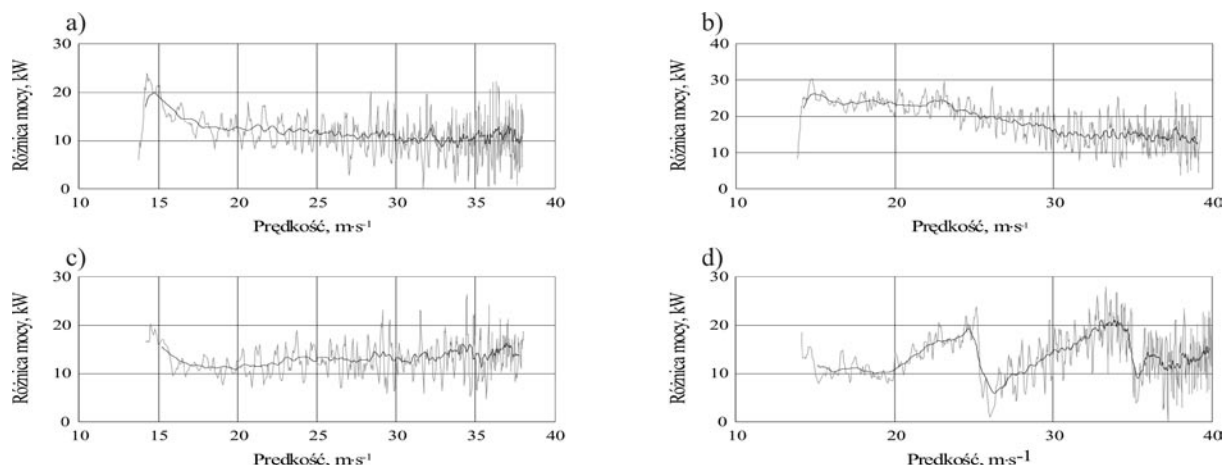
Rys. 2. Próba przyspieszania samochodu: a) strategia DE, b) strategia D, c) strategia L, d) strategia S
 Fig. 2. Acceleration test of vehicle: a) strategy DE, b) strategy D, c) strategy L, d) strategy S



Rys.3 Przebiegi wskaźnika N^* i przełożenia przekładni przy prędkości początkowej $13,8 \text{ m s}^{-1}$: a) strategia DE, b) strategia D c) strategia L, d) strategia S
 Fig. 3. N^* index and gear ratio for initial velocity $13,8 \text{ m s}^{-1}$ a) strategy DE, b) strategy D c) strategy L, d) strategy S



Rys. 4. Porównanie przebiegu wskaźnika N^* z charakterystyką zewnętrzną silnika przy prędkości początkowej $13,8 \text{ m s}^{-1}$: a) strategia DE, b) strategia D, c) strategia L, d) strategia S
 Fig. 4. Comparison N^* index and engine characteristic for initial velocity $13,8 \text{ m s}^{-1}$: a) strategy DE, b) strategy D, c) strategy L, d) strategy S



Rys. 5. Strata mocy napędowej w procesie przyspieszania samochodu: a) strategia DE, b) strategia D, c) strategia L, d) strategia S

Fig. 5. Power loss in acceleration process: a) strategy DE, b) strategy D, c) strategy L, d) strategy S

5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza porównawcza procesu rozpędzania samochodu, przy różnych algorytmach sterowania przełożeniem przekładni, wskazuje na znaczący wpływ algorytmu sterowania na przebieg rozpatrywanego procesu. Dynamika jego przebiegu

oraz straty mocy napędowej to podstawowe kryteria oceny. W dalszych opracowaniach przedmiotem analizy będą wskaźniki charakteryzujące komfort jazdy oraz energetyczny i ekologiczny aspekt pracy układu napędowego.

6. Literatura:

- [1] Jantos J.: *Zintegrowane sterowanie samochodowym, spalinowym układem napędowym o przełożeniu w sposób ciągły*, Studia i Monografie, z. 141, Politechnika Opolska, 2003.
- [2] Nishigaya M., Tamura T., Yasue H., Kasuga S., Sugaya M.: *Development of Toyota's new "Super CVT"*, SAE Paper 2001-01-0872, pp. 69..76, 2001.
- [3] Nowatschin K., Fleischmann H.: *Multitronic- das neue Automatikgetriebe von AUDI*, Automobiltechnische Zeitschrift 102, Teil 1, Nr. 7/8, pp. 548..553, Teil 2, Nr. 9, pp. 746..753, 2000.
- [4] Siłka W., Hetmańczyk I.: *Estymacja parametrów modelu energetycznego samochodu na podstawie próby wybiegu*, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych, PAN, Kraków 2000, Zeszyt 21, s. 173..183.
- [5] Strzałkowski A., Śliżyński A.: *Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów*, PWN, Warszawa, 1983.

Mgr inż. Adam DANIELCZOK
Mgr inż. Andrzej BIENIEK
Dr inż. Ireneusz HETMAŃCZYK

Politechnika Opolska
Zakład Samochodów
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole
tel. (077) 400-62-72
e-mail: adanielczok@interia.pl,
e-mail: abieniek@polo.po.opole.pl