

Witold Grzegózek¹⁾, Iwona Adamiec-Wójcik²⁾, Stanisław Wojciech²⁾

OPTIMALIZACJA DOBORU PRZEŁOŻENIA W PASOWEJ PRZEKŁADNI CVT MIEJSKIEGO POJAZDU JEDNOŚLADOWEGO

Streszczenie. Jedną z interesujących i ważnych cech skuterów jest możliwość stosowania przekładni CVT umożliwiających realizację zmiennych przełożeń w sposób ciągły. W pracy przedstawiono uproszczony model dynamiki skutera oraz jego zastosowanie do rozwiązania zadania optymalizacji przełożeń i stopnia otwarcia przepustnicy. Celem optymalizacji dynamicznej jest taki dobór przełożeń i otwarcia przepustnicy aby zminimalizować zużycie paliwa. Przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń. Dane do obliczeń otrzymano w wyniku pomiarów.

Słowa kluczowe: przekładnia pasowa CVT, optymalizacja doboru przełożeń, zużycie paliwa.

WPROWADZENIE

Problem minimalizacji zużycia paliwa jest zagadnieniem bardzo ważnym zarówno z punktu widzenia dbałości o ekologię jak i ekonomię. W celu przeprowadzenia optymalizacji zużycia paliwa można zbudować odpowiedni model dynamiki pojazdu efektywny numerycznie. Oznacza to, że model musi być z jednej strony jak najprostszy, z drugiej zaś odzwierciedlający układ rzeczywisty w sposób wystarczająco dokładny. Autorzy zajmują się zagadnieniami modelowania i analizy dynamicznej ruchu pojazdów od wielu lat. Obszerny opis metod i algorytmów formułowania modeli samochodów osobowych oraz wielocłonowych z wykorzystaniem przekształceń jednorodnych i współrzędnych złączowych przedstawiono w monografii [9]. Wiele prac poświęcono zagadnieniom optymalizacji. W artykułach [10, 15] przedstawiono zadanie sterowania silnikiem samochodowym tak aby zminimalizować zużycie paliwa oraz emisję toksycznych związków spalin. Metody optymalizacji nieliniowej stosowane były do rozwiązania problemu optymalnego doboru momentów hamujących dla potrzeb systemu ESP samochodu osobowego [5, 6, 8] oraz zapewnienia stabilności pojazdów wielocłonowych w sytuacjach krytycznych [11, 12]. Oprócz metod optymalizacji nieliniowej do rozwiązywania wspomnianych zadań stosowano również algorytmy gene-

¹⁾ Politechnika Krakowska, email: witek@mech.pk.edu.pl

²⁾ Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała.

tyczne [4, 5] oraz różne odmiany sieci neuronowych [3, 7, 12, 14, 15]. Zagadnienia sterowania nie dotyczą jedynie pojazdów. W artykule [1] przedstawiono zastosowanie metody Nelder-Mead'a do rozwiązania zadania planowania trajektorii manipulatora z podatnymi członami, natomiast wykorzystanie sieci neuronowych w tym zadaniu przedstawiono w pracy [2].

W niniejszej pracy autorzy stosują metody optymalizacji nieliniowej do rozwiązania zadania doboru przełożenia w pasowej przekładni CVT oraz stopnia otwarcia przepustnicy w skuterze w celu zminimalizowania zużycia paliwa.

MODEL MATEMATYCZNY SKUTERA

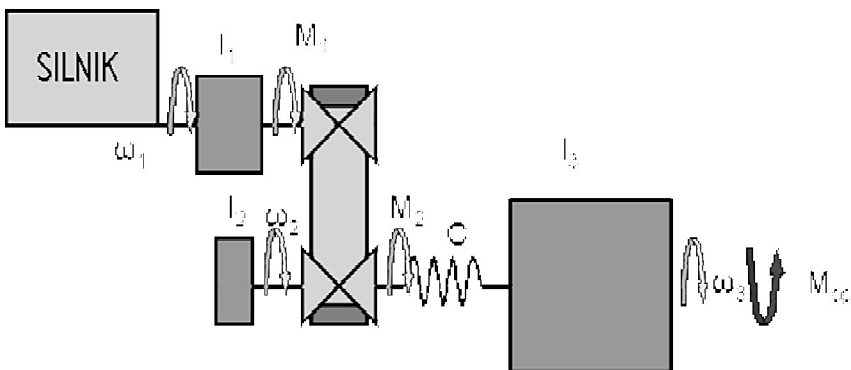
Ponieważ model matematyczny ma być stosowany w rozwiązywaniu zadania optymalizacji powinien być efektywny numerycznie. Powoduje to, że można w nim jedynie w sposób przybliżony oddać główne cechy modelowanego układu. Przyjęto zatem trójmasowy model przedstawiony na rys. 1. Równania dynamiki tego układu można przedstawić w postaci:

$$I_1 \dot{\omega}_1 = M_e - M_1 \quad (1.1)$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 = M_2 - c(\varphi_2 - \varphi_3) \quad (1.2)$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 = c(\varphi_2 - \varphi_3) - M_{op} \quad (1.3)$$

gdzie: I_1, I_2, I_3 – masowe momenty bezwładności,
 M_e – moment napędowy silnika,
 M_1, M_2 – momenty na wejściu i wyjściu z przekładni CVT,
 M_{op} – moment oporów ruchu,
 c – stała sprężyny rotacyjnej łączącej ciała I_2 i I_3 .



Rys. 1. Model fizyczny skutera z przekładnią CVT [11]

Równania (1) należy uzupełnić o zależności:

$$M_2 = iM_1 \quad (2.1)$$

$$\omega_1 = i\omega_2 \quad (2.2)$$

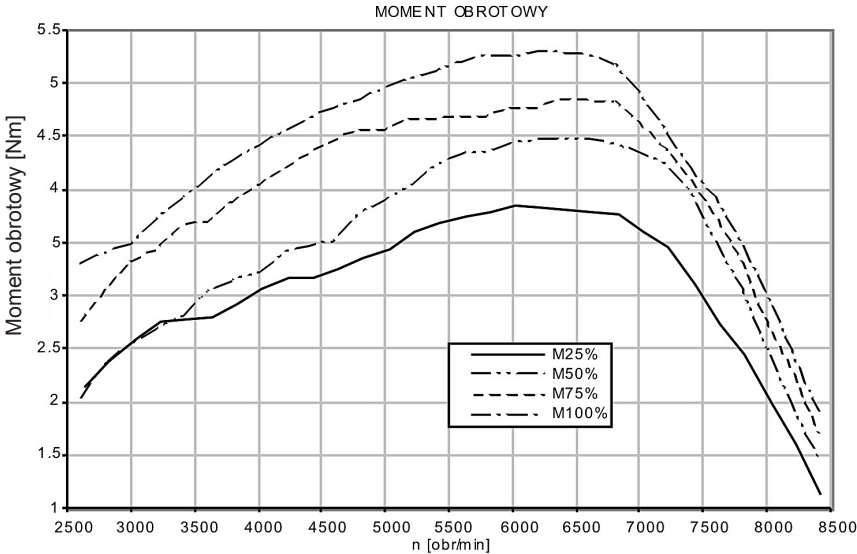
Wstawiając (2) do (1.2), po prostych przekształceniach można równania ruchu układu zapisać następująco:

$$(I_1 i^2 + I_2) \ddot{\varphi}_2 = i(M_e - I_1 \frac{di}{dt} \omega_2) - c(\varphi_2 - \varphi_3) \quad (3.1)$$

$$I_3 \ddot{\varphi}_3 = c(\varphi_2 - \varphi_3) - M_{op} \quad (3.2)$$

Równania (3) stanowią układ dwóch równań różniczkowych zwyczajnych, nieliniowych o zmiennych współczynnikach z uwagi na zależność momentu M_e od $\dot{\varphi}_1$ oraz pojawienie się członu zawierającego di/dt . Do jego rozwiązania zastosowano metodę Rungego-Kutty IV rzędu z ustalonym krokiem całkowania. W wyniku pomiarów na stanowisku badawczym uzyskano następujące wartości parametrów modelu: $I_1 = I_2 = 0,01 \text{ kgm}^2$, $I_3 = 0,04 \text{ kgm}^2$, $c = 216 \text{ Nm/rad}$

Zależność momentu M_e od prędkości kątowej ω_1 oraz stopnia otwarcia przepustnicy a przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zależność momentu M_e od ω_1 oraz a [10]

Przyjęto również, że moment oporów ruchu M_{op} może być obliczony według zależności:

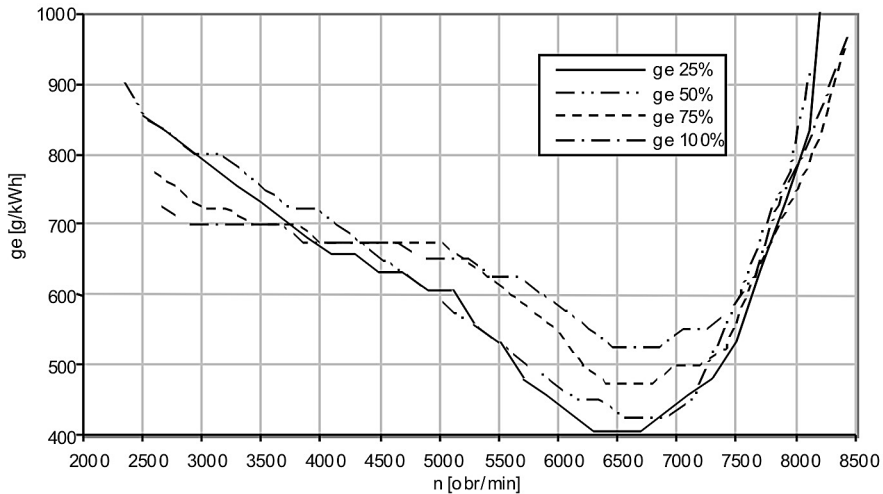
$$M_{op} = A_0 + A_2 v^2 \quad (4)$$

gdzie: A_0 , A_2 – współczynniki,

$$v = \omega_3 \frac{r_k}{i_{pg}}$$

$i_{pg} = 12,5$ – przełożenie przekładni głównej.

W trakcie pomiarów uzyskano również charakterystykę jednostkowego zużycia paliwa g_e w zależności od prędkości kątowej silnika ω_1 oraz stopnia otwarcia przepustnicy a , przedstawioną na rysunku 3.



Rys. 3. Jednostkowe zużycie paliwa g_e w zależności od ω_1 oraz a [10]

SFORMUŁOWANIE ZADANIA OPTYMALIZACJI

Przy ustalonych przebiegach parametrów $i(t)$ oraz $a(t)$ oraz warunkach początkowych, czas całkowania równań (3) przy 10^5 kroków całkowania nie przekracza 1s na średniej klasy PC. Dlatego możliwe jest sformułowanie zadania optymalizacyjnego w następujący sposób:

Znaleźć $i(t)$ oraz $a(t)$ takie aby funkcjonał:

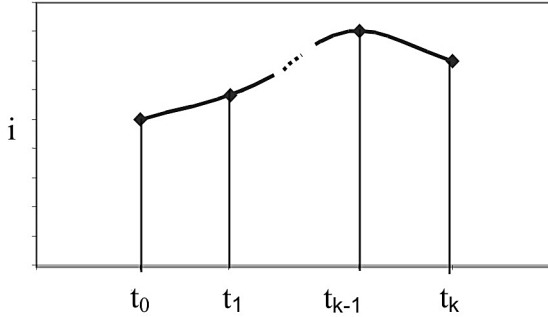
$$f(i, a) = c_1 \int_0^T g_e(\phi_1, a) dt + c_2 \left[\int_0^T (v - v_{nom})^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

osiągał minimum,

gdzie: c_1, c_2 – współczynniki wagowe,
 v – prędkość pojazdu określona w (4),
 v_{nom} – prędkość nominalna pojazdu.

Oznacza to, że należy tak dobrać przełożenie i oraz stopień otwarcia przepustnicy a , aby zminimalizować zużycie paliwa i utrzymać prędkość bliską nominalnej.

Aby sprowadzić zadanie do klasycznego zagadnienia optymalizacji funkcji wielu zmiennych, do przybliżenia funkcji $i(t)$ oraz $a(t)$ zastosowano funkcje sklejane trzeciego stopnia. Przedział $\langle 0, T \rangle$ podzielono na podprzedziały jak na rys. 4 poszukując dyskretnej wartości i oraz a w punktach t_k .



Rys. 4. Przykładowe dyskretne wartości i

Dyskretyzacja funkcji $i(t)$ oraz $a(t)$ umożliwia następujące klasyczne sformułowanie zadania optymalizacji.

Znaleźć minimum funkcjonału:

$$F(i_1, \dots, i_{n_i}, a_1, \dots, a_{n_a}) = c_1 \int_0^T ge(\phi_1, a) dt + c_2 \left[\int_0^T (v - v_{nom})^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

zapewniając spełnienie warunków:

$$i_{\min} \leq i_k \leq i_{\max} \quad \text{dla } k = 1, \dots, n_i \quad (6.1)$$

$$a_{\min} \leq a_k \leq a_{\max} \quad \text{dla } k = 1, \dots, n_a \quad (6.2)$$

gdzie: $i_{\min} = 0,885$, $i_{\max} = 3,0$ są odpowiednio minimalną i maksymalną wartością przełożenia,

$a_{\min} = 0,10$, $a_{\max} = 1,0$ są odpowiednio minimalną i maksymalną wartością stopnia otwarcia przepustnicy.

Aby wyznaczyć wartość funkcjonału (6) dla ustalonej kombinacji parametrów $i_1 \div i_{n_i}, a_1 \div a_{n_a}$ należy scałkować równania ruchu (3) przy przyjęciu odpowiednich warunków początkowych. Zatem w każdym kroku optymalizacji należy całkować równania różniczkowe (3) w przedziale $\langle 0, T \rangle$. Warunki początkowe przy całkowaniu równań (3) ustalano według następującego algorytmu:

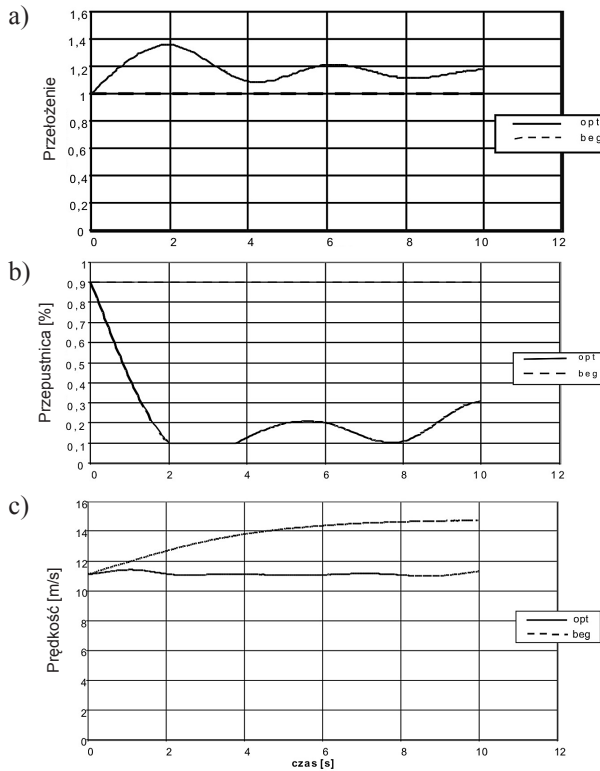
1. $\varphi_0 = 0$,
2. $\varphi_3 = -\frac{M_{op}}{c}$,
3. przyjmij $i = 1.0$,

4. poszukuj takich wartości ω_1 aby $iM_e = M_p$ poprzez rozwiązanie odpowiedniego równania algebraicznego. Wykorzystaj charakterystykę z rysunku 2,
5. przyjmij $a_k = 0.9$ dla $k = 1, \dots, n_a$.

Zadanie optymalizacji (6), (7) rozwiązywano metodą pełzającego simpleksu. Jako punkt startowy przyjmowano $i_k = i_0$, $k = 1, \dots, n_i$ oraz $a_k = a_0$, $k = 1, \dots, n_a$. Opisany powyżej algorytm doboru wielkości początkowych powodował, że dla punktu startowego zużycie paliwa (pierwszy składnik w (6)) jest znacznie wyższe niż w rozwiązaniu optymalnym, a ruch pojazdu był przyspieszony (drugi składnik w (6)).

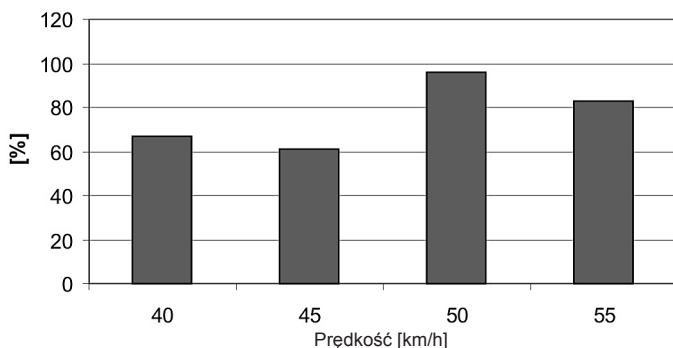
OBLICZENIA NUMERYCZNE

Symulacje przeprowadzono przyjmując $T = 10$ s, oraz $v_{nom} = 40, 45, 50, 55$ km/h. Ustalono liczby $n_i = n_a = 5$, a więc poszukiwano dyskretnych wartości i oraz a w pięciu równoodległych punktach (co 2 s). Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi i , a , oraz v dla prędkości nominalnej $v_{nom} = 40$ km/h.



Rys. 5. Przebiegi: a) i przełożenia, b) a procentowego kąta otwarcia przepustnicy, c) v prędkości dla $v_{nom} = 40$ km/h. Przebiegi dla wartości początkowych beg , po optymalizacji opt

Na rysunku 6 przedstawiono obliczone procentowe zużycie paliwa dla wymienionych powyżej prędkości nominalnych odnosząc je do wartości otrzymywanych przy stałych wartościach $i_k = i_0$, $k = 1, \dots, n_i$ oraz $a_k = 0.9$, $k = 1, \dots, n_a$.



Rys. 6. Porównanie ilości zużytego paliwa

Uzyskane rezultaty przeprowadzonej optymalizacji wskazują na możliwości uzyskania znacznego zmniejszenia zużycia paliwa przy wykorzystaniu proponowanej metody.

UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione wyniki obliczeń wymagają weryfikacji pomiarowej. Aktualnie prowadzone są prace w tym kierunku. Opracowane modele, algorytmy i program komputerowy okazały się efektywne numerycznie, a wyniki na tyle zachęcające, że autorzy mają zamiar prowadzić dalej prace w dwóch kierunkach.

Przeprowadzenie obliczeń dla gęstej siatki v_{nom} i poprzez zastosowanie sztucznych sieci neuronowych opracować algorytm sterujący przełożeniem i oraz stopniem otwarcia przepustnicy a w sposób zapewniający minimalizację zużycia paliwa. Algorytm ten mógłby następnie być wprowadzony do sterownika a wyniki obliczeń zastosowane w czasie rzeczywistym.

Uogólnienie modelu na inne pojazdy. Wymagałoby to rozbudowania modelu układu z rozdziału 2. Jednak sygnalizowana już efektywność numeryczna modeli uproszczonych pozwala mieć nadzieję, że jest to możliwe.

Warto podkreślić, że wartość wyników optymalizacji dynamicznej zależy bezpośrednio od poprawności parametrów modelu, a więc od staranności i zakresu pomiarów.

LITERATURA

1. Adamiec-Wójcik I. Optimisation problem for planning a trajectory of a manipulator with a flexible link, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 34 (4), 87-98, 2010.
2. Adamiec-Wójcik I. Application of neural networks to control of drive functions of a manipulator with a flexible link, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 35 (1), 85-98, 2011.
3. Adamiec-Wójcik I., Brzozowski K., Warwas K. Artificial Neural Networks to control braking moments on wheels of an articulated vehicle, *Proceedings of Fifth IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, pp.303-307, Rende 2009.
4. Adamiec-Wójcik I., Grzegożek W., Warwas K. Optymalizacja momentów hamujących pojazdu przy zastosowaniu algorytmów genetycznych, *Czasopismo Techniczne Mechanika*, z.7, 23-30, 2004.
5. Adamiec-Wójcik I., Warwas K., Grzegożek W. Optymalizacja momentów hamujących w celu oceny systemu ESP, *Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej*, Nr. 85, 21-26, 2002.
6. Adamiec-Wójcik I., Warwas K., Wojciech S. Braking torque optimisation in time domain, *Proceedings of ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 1981-1995, Leuven 2004.
7. Adamiec-Wójcik I., Obrocki K., Warwas K. Distributed Neural Network used in control of brake torque distribution, *Proceedings of Third IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, pp.116-119, Sofia 2005.
8. Grzegożek W., Wojciech S. Time-domain optimisation of braking torque for the ESP system, *The Archive of Mechanical Engineering*, Vol. XLIX, no.1, pp.65-79, 2002.
9. Grzegożek W., Adamiec-Wójcik I., Wojciech S. Komputerowe modelowanie pojazdów, *Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej*, Kraków 2003.
10. Grzegożek W., Szczepka M., Analiza możliwości zmniejszenia zużycia paliwa przez pojazd jednośladowy z zastosowaniem elektromechanicznie sterowanej przekładni CVT *Czasopismo Techniczne z.6-M/2008*, Politechnika Krakowska zeszyt 10 str.155-167, 2008.
11. Grzegożek W., Szczepka M., An attempt of fuel-optimal control of a scooter CVT powertrains. *Konmot 2012* (w druku).
12. Pfiffner R., Guzezella L., Onder C.H., Fuel-optimal control of CVT powertrains *Control Engineering Practice* 11 (2003) pp.329-336.
13. Romaniszyn K., Wojciech S. Optimisation of vehicle's acceleration process, *The Archive of Mechanical Engineering*, Vol.XLII, no.1, pp.19-28, 1996.
14. Warwas K., Adamiec-Wójcik I. Zapewnienie stabilności ruchu pojazdu wielocłonowego w sytuacjach krytycznych, *Archiwum Motoryzacji*, Nr.2, 237-246, 2006.
15. Warwas K., Adamiec-Wójcik I., Grzegożek W. Dobór momentów hamujących w pojazdach wielocłonowych, *Teka Komisji Motoryzacji PAN o/Kraków*, Nr. 33-34, 441-448, 2008.

OPTIMISATION OF THE CHOICE OF THE TRANSMISSION RATIO IN THE CVT BELT TRANSMISSION OF A SCOOTER

Abstract

One of important and interesting features of scooters is the use of CVT gear enabling continuous change of the transmission ratio. The paper presents a simplified model of scooter dynamics and its application to the solution of an optimisation problem of the transmission ratio and opening of the throttle. The aim of the optimisation is such a choice of the transmission ratio and the opening of the throttle which minimise fuel consumption. Some results of calculations are presented for the data obtained from experimental measurements.

Key words: belt CVT powertrains, fuel optimal control.