

WYZNACZANIE OPTYMALNYCH ALGORYTMÓW STEROWANIA AUTOMATYCZNEJ PRZEKŁADNI HYDROMECHANICZNEJ AUTOBUSU MIEJSKIEGO

DETERMINING OPTIMUM CONTROL ALGORITHMS OF CITY BUS AUTOMATIC HYDROMECHANICAL GEAR

W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania optymalnych algorytmów przełączania biegów stopniowych układów napędowych pojazdów. Analizie poddano fazę rozpędzania pojazdu jako najbardziej energochłonną fazę ruchu. Zastosowano dwa kryteria optymalizacji: minimalizację czasu rozpędzania i minimalizację zużycia paliwa w fazie rozpędzania. Metodykę zilustrowano przykładem syntezy optymalnych algorytmów sterowania automatycznej przekładni hydromechanicznej autobusu miejskiego.

Słowa kluczowe: autobus miejski, przekładnia automatyczna, algorytmy sterowania, kryteria optymalizacji, czas rozpędzania, zużycie paliwa

The methodology of determining optimum algorithms of gear switching in graded power transmission systems of vehicles has been presented in the paper. The phase of vehicle acceleration, which is considered the most energy-consuming motion phase., is the subject of analysis. Two optimization criteria were applied: acceleration time minimization and fuel consumption minimization in the acceleration phase. The methodology has been illustrated with an example of the synthesis of optimum control algorithms of the city bus automatic hydromechanical gear.

Keywords: city bus, automatic gear, control algorithms, optimization criteria, acceleration time, fuel consumption

1. Wstęp

W warunkach miejskich eksploatacji autobusu występuje cykliczność jego ruchu. Dominującą fazą ruchu autobusu w cyklu, która określa i kształtuje jego wskaźniki paliwowo-trakcyjne jest rozpędzanie [1]. Algorytmy zmiany przełożeń układu napędowego samochodu w pozostałych fazach ruchu (toczenie, zwalnianie, hamowanie) nie wykazują istotnego wpływu na te wskaźniki. Dlatego uzasadnione jest opracowanie metodyki optymalnego sterowania zmianą przełożeń układu napędowego przede wszystkim dla fazy rozpędzania autobusu.

Znane metody wyznaczania algorytmów przełączania automatycznej skrzynki biegów, która najczęściej jest przekładnią hydromechaniczną, z reguły dotyczą ruchu samochodu maksymalnie przybliżonego do ruchu ustalonego. Trudności w bezpośrednim wykorzystaniu przyjętych w teorii samochodu kryteriów oszczędności zużywanego paliwa i dynamiki rozpędzania, a także niedoskonałość stosowanych metod matematycznych, uwarunkowały dużą róż-

norodność stosowanych wskaźników dodatkowych, które w sposób graficzny lub graficzno-analityczny pozwalają określić najdogodniejsze, z ich punktu widzenia, momenty zmiany przełożeń [2].

2. Analityczne metody oceny procesu rozpędzania i kryteria jakości

Budowa nowoczesnych układów napędowych pojazdów z wielostopniowymi przekładniami mechanicznymi i automatycznymi skrzynkami biegów poprzedzana jest analitycznymi badaniami procesu rozpędzania pojazdów. W tym aspekcie również zagadnienia sterowania przełączaniem biegów, jako środka dla optymalizacji procesu ruchu pojazdu nabrają zasadniczego znaczenia.

Wyznaczanie optymalnych momentów przełączania biegów przekładni hydromechanicznej, przy stałym położeniu pedału sterowania dawką paliwa, można sprowadzić do znalezienia takich wartości prędkości ruchu samochodu V_p , przy których należy dokonywać zmiany przełożeń - przełączania biegów

z niższych na wyższe - zapewniających uzyskanie ekstremum funkcjonału jakości procesu rozpędzania. Z uwagi na znaną rozbieżność pomiędzy oceną dynamiki i paliwowej ekonomiczności rozpędzania, wydaje się uzasadnione wykorzystanie w tym celu kilku kryteriów równocześnie. Pozwala to na wzajemne uzupełnianie się przez nie i kontrolę uzyskiwanych rezultatów. W wyniku analizy prac prowadzonych w tym kierunku, zasadnym wydaje się przyjęcie jako wyjściowe kryteria optymalności procesu rozpędzania samochodu:

- czasu rozpędzania samochodu T dla osiągnięcia zadanej końcowej prędkości rozpędzania V_k
- drogi przejechanej S podczas rozpędzania do zadanej prędkości V_k ,
- zużycia paliwa Q koniecznego dla osiągnięcia zadanej prędkości końcowej rozpędzania V_k ,
- wariacyjnego kryterium zużycia paliwa podczas rozpędzania samochodu uwzględniającego również dynamikę rozpędzania.

Odpowiednie funkcjonały jakości procesu rozpędzania samochodu dla argumentu v można przedstawić w następującej postaci:

- dla dynamiki rozpędzania:

$$J_S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{v}{a_i(v)} dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{v}{a_{i+1}(v)} dv - V_k \left(\int_{V_0}^{V_p} \frac{1}{a_i(v)} dv \right) \right] \quad (1)$$

$$J_S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{v}{a_i(v)} dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{v}{a_{i+1}(v)} dv - V_k \left(\int_{V_0}^{V_p} \frac{1}{a_i(v)} dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{1}{a_{i+1}(v)} dv \right) \right] \rightarrow \min \quad (2)$$

- dla zużycia paliwa:

$$J_Q = \sum_{i=1}^n \int_{V_0}^{V_k} \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(v)} dv = \sum_{i=1}^n \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(v)} dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{(g_e N_e)_{i+1}}{a_{i+1}(v)} dv \right] \rightarrow \min \quad (3)$$

$$J_\varepsilon = \sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{i=1}^n \frac{(g_e N_e)_k}{V_k} S_i = \sum_{i=1}^n \left\{ \int_{V_0}^{V_p} \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(v)} dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{(g_e N_e)_{i+1}}{a_{i+1}(v)} dv - \frac{(g_e N_e)_k}{V_k} \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{v}{a_i(v)} dv + \int_{V_p}^{V_k} \frac{v}{a_{i+1}(v)} dv \right] \right\} \rightarrow \min \quad (4)$$

gdzie: a - przyspieszenie samochodu, v - chwilowa wartość prędkości ruchu, V_0, V_k - początkowa i końcowa prędkości rozpędzania, i, n - odpowiednio, indeks i liczba biegów przekładni hydromechanicznej, S, t_i - odpowiednio, droga i czas rozpędzania na i -tym biegu przekładni, g_e - jednostkowe zużycie paliwa przez silnik, N_e - efektywna moc silnika.

Wyodrębnia się dokładną i uproszczoną analizę procesu rozpędzania pojazdu [2, 3] w celu określenia optymalnych chwil przełączenia biegów przekładni hydromechanicznej przy stałym położeniu pedału sterowania dawką paliwa. Istnieje możliwość określenia na drodze analitycznej takich prędkości samochodu, przy których należy dokonać zmiany przełożeń z niższych na wyższe, przy jednoczesnym uzyskaniu największej wartości jakości rozpędzania. Z uwagi na znaną rozbieżność pomiędzy oceną dynamiki a ekonomicznym zużyciem paliwa zasadnym jest określenie właściwej chwili zmiany przełożeń z uwzględnieniem kilku kryteriów równocześnie.

3. Metodyka uproszczonej analizy procesu rozpędzania

Dla celów inżynierskich wystarczającą dokładność zapewnia uproszczona analiza procesu rozpędzania pojazdu wyposażonego w przekładnię hydromechaniczną. Optymalne przełączenie biegów przekładni hydromechanicznej winny być realizowane w chwili osiągnięcia przez rozpędzany pojazd takiej prędkości V_p , przy której spełnione będą następujące warunki:

- dla kryterium czasu rozpędzania do zadanej prędkości:

$$\frac{d}{dv} \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{1}{a_i(v)} dv - \int_{V_p}^{V_k} \frac{1}{a_{i+1}(v)} dv \right] = \frac{1}{a_i(V_p)} - \frac{1}{a_{i+1}(V_p)} = 0 \quad (5)$$

- dla kryterium drogi rozpędzania do zadanej prędkości:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dv} \left\{ \int_{V_0}^{V_p} \frac{v}{a_i(v)} dv - \int_{V_p}^{V_k} \frac{v}{a_{i+1}(v)} dv - V_k \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{1}{a_i(v)} dv - \int_{V_p}^{V_k} \frac{1}{a_{i+1}(v)} dv \right] \right\} = \\ = \frac{V_p}{a_i(V_p)} - \frac{V_p}{a_{i+1}(V_p)} - V_k \left[\frac{1}{a_i(V_p)} - \frac{1}{a_{i+1}(V_p)} \right] = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

- dla kryterium zużycia paliwa:

$$\frac{d}{dv} \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(v)} dv - \int_{V_p}^{V_k} \frac{(g_e N_e)_{i+1}}{a_{i+1}(v)} dv \right] = \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(V_p)} - \frac{(g_e N_e)_{i+1}}{a_{i+1}(V_p)} = 0 \quad (7)$$

- dla wariacyjnego kryterium zużycia paliwa:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dv} \left\{ \int_{V_0}^{V_p} \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(v)} dv - \int_{V_p}^{V_k} \frac{(g_e N_e)_{i+1}}{a_{i+1}(v)} dv - \frac{(g_e N_e)_k}{V_k} \left[\int_{V_0}^{V_p} \frac{v}{a_i(v)} dv - \int_{V_p}^{V_k} \frac{v}{a_{i+1}(v)} dv \right] \right\} = \\ = \frac{(g_e N_e)_i}{a_i(V_p)} - \frac{(g_e N_e)_{i+1}}{a_{i+1}(V_p)} - \left[\frac{V_p (g_e N_e)_i}{V_k a_i(V_p)} - \frac{V_p (g_e N_e)_{i+1}}{V_k a_{i+1}(V_p)} \right] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Warunki (6) i (7) dotyczące dynamiki rozpędzania można sprowadzić do postaci:

$$[a_i(V_p) - a_{i+1}(V_p)](V_p - V_k) = 0 \quad (9)$$

Podobnie też warunek optymalności przełączeń biegów ze względu na zużycie paliwa zapisać możemy w postaci:

$$\left[\frac{(g_e N_e)_i}{a_i(V_p)} - \frac{(g_e N_e)_{i+1}}{a_{i+1}(V_p)} \right] \left(1 - \frac{V_p}{V_k} \right) = 0 \quad (10)$$

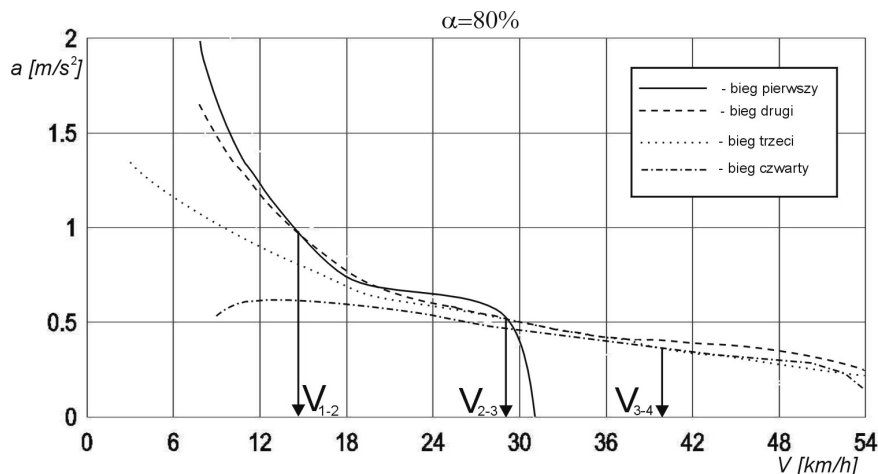
Wyznaczając ekstremum przedstawionych wyżej funkcjonalów otrzymamy optymalne chwile przełączania biegów przekładni hydromechanicznej w procesie rozpędzania samochodu, które według kryterium dynamicznego będą określone jako punkty przecięcia krzywych przyspieszenia pojazdu w funkcji prędkości ruchu na biegach sąsiednich. W przypadku braku takiego przecięcia, chwile przełączeń biegów określone będą jako punkty graniczne przedziału możliwych zmian prędkości V_p na biegu poprzednim.

Strategię takiego postępowania ilustruje rys. 1, gdzie przedstawiono przebieg krzywych przyspieszeń na poszczególnych biegach autobusu JELCZ M121M wyposażonego w automatyczną przekładnię hydromechaniczną ZF 5HP500. Punkty przecięcia się tych przyspieszeń określają chwile zmiany biegów

reduktora mechanicznego tej przekładni zapewniające maksymalną dynamikę rozpędzania autobusu.

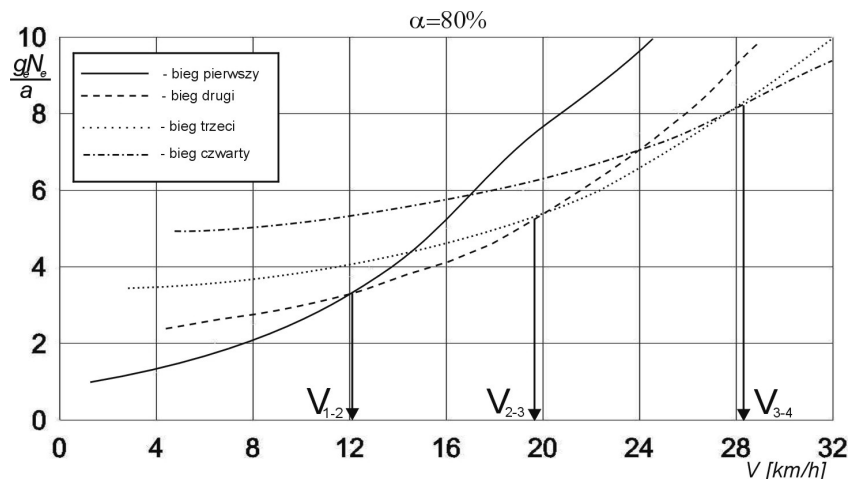
Odpowiednio, wg optymalnego kryterium ekonomicznego, chwile przełączeń biegów określone są punktami przecięcia krzywych wskaźników wyrażonych w postaci: $g_e N_e / a$ w funkcji prędkości ruchu pojazdu na sąsiednich biegach przekładni hydromechanicznej albo też jako obszary graniczne możliwego przedziału zmienności prędkości V_p [2]. Na rys. 2 jest przedstawiony graficznie sposób wyznaczania tych optymalnych chwil zmiany biegów zapewniających minimalizację zużycia paliwa podczas rozpędzania autobusu JELCZ M121M z przekładnią automatyczną ZF 5HP500, jednak z zachowaniem pożądanej dynamiki rozpędzania.

Określone według takich strategii optymalne algorytmy sterowania przełączaniem biegów automatycznej przekładni hydromechanicznej ZF 5HP500 [5] zastosowanej w autobusie miejskim JELCZ M121M zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 3 w postaci linii przełączania biegów dla fazy rozpędzania autobusu. Zostały wyodrębnione zarówno algorytmy realizujące maksymalną dynamikę rozpędzania autobusu, jak też i zapewniające minimalizację zużycia paliwa podczas tego procesu rozpędzania. Oddzielnie zostały zilustrowane również algorytmy przełączania biegów tej przekładni, jakie



Rys. 1. Graficzna interpretacja poszukiwania optymalnych, ze względu na dynamikę rozpędzania, chwil zmiany biegów automatycznej przekładni hydromechanicznej autobusu miejskiego

Fig. 1. Graphical interpretation of searching for optimum, as regards acceleration dynamics, moments of gear shifts in city bus automatic hydromechanical gear



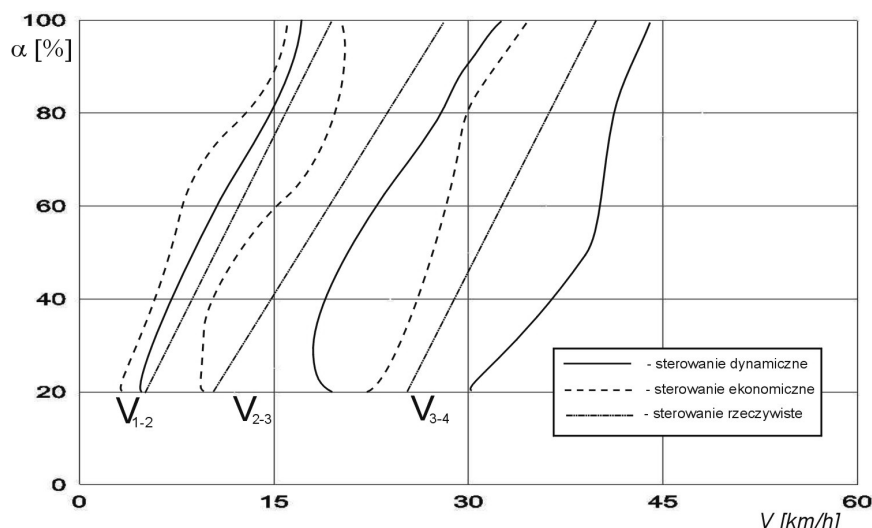
Rys. 2. Graficzna interpretacja poszukiwania optymalnych, we względu na minimalizację zużycia paliwa, chwil zmiany biegów automatycznej przekładni hydromechanicznej autobusu miejskiego

Fig. 2. Graphical interpretation of searching for optimum, as regards fuel consumption minimization, moments of gear shifts in city bus automatic hydromechanical gear

są realizowane w autobusach będących na wyposażeniu Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Lublinie.

Dla oceny efektywności opracowanych algorytmów sterowania przekładni automatycznej autobusu miejskiego, zostały przeprowadzone symulacyjne badania porównawcze. W komputerowym programie opracowanym zgodnie z modelem rozpędzania autobusu zamieszczonym w pracy [4], zostały zrealizowane przedstawione na rys. 3 algorytmy sterowania przekładnią i wyznaczone wskaźniki jakości procesu rozpędzania autobusu. Analiza porównawcza tych wskaźników pozwala na następujące konstatacje:

- zastosowanie algorytmów optymalnego sterowania dynamicznego prowadzi do zmniejszenia czasu rozpędzania autobusu do prędkości końcowej $V_k = 60 \text{ km/h}$ nawet o około 13% w stosunku do algorytmów sterowania, jakie są realizowane w rzeczywistości,
- realizacja optymalnych algorytmów sterowania ekonomicznego dla tych samych porównywanych warunków daje możliwość zmniejszenia zużycia paliwa o około 5,5%, dla oddzielnych porównywanych wariantów procesów rozpędzania przy tylko nieznacznym pogorszeniu jego dynamiki.



Rys. 3. Zestawienie algorytmów sterowania automatycznej przekładni hydromechanicznej ZF 5HP500 autobusu miejskiego JELCZ M121M

Fig. 3. Statement of control algorithms of ZF 5HP500 hydromechanical gear in JELCZ M121M city bus

4. Podsumowanie

Wykorzystanie różnych kryteriów w celu optymalnego wyznaczenia chwil przełączania biegów w procesie rozpędzania pojazdu prowadzi do różnicowania ilościowych ocen dynamiki ruchu lub zużycia paliwa.

Wykorzystanie metod analitycznych umożliwia wyznaczenie chwil przełączenia zmiany biegów dla całego obszaru sterowania pracą silnika i jego współpracy w odbiornikiem, co prowadzi do właściwego z punktu widzenia ekonomii sterowania układem napędowym.

5. Literatura

- [1] Gronowicz J.: *Gospodarka energetyczna w transporcie lądowym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2004.
- [2] Koralewski G.: *Metodyka wyznaczania optymalnych momentów przełączania biegów przekładni hydromechanicznej w czasie rozpędzania samochodu*. Folia Societatis Sientiarum Lublinensis vol.5 nr 1, Lublin, 1996.
- [3] Koralewski G.: *Metodologiczkie aspekty optymalizacji zakonowuprawlenia i paramietrov gidromiechanicznych pieriedacz avtomobiliej*. NVF Ukrainski technologii, Lwów, 2000.
- [4] Koralewski G., Wrona R.: *Modelling of acceleration of the city bus with hydromechanical automatic transmission*. Problemy techniki Nr 2, Odessa, 2004.
- [5] Siedlecki A.: *Skrzynie biegów*. ZF Ecomat Transport – Technika Motoryzacyjna Nr 5, 2000.

Mgr inż. Rafał WRONA

Stowarzyszenie Rzeczoznawców Techniki Samochodowej
i Ruchu Drogowego Oddział w Lublinie
ul. Północna 22a
20-064 Lublin
tel. 600 359 666
rwrona@pinco.pl