

**Marcin Fice, Rafał Setlak**  
**Politechnika Śląska, Gliwice**

## ANALIZA ENERGETYCZNA RZECZYWISTYCH CYKLI JAZDY

### ENERGY ANALYSIS OF THE REAL DRIVING CYCLES

**Abstract:** The paper presents an energy analysis of hybrid propulsion systems on the basis of an elementary cycle and energy consumption to overcome the basic movement resistance and the acceleration resistance and the possibility of the recovery of vehicle kinetic energy during braking. Elementary driving cycle is composed of acceleration for a given speed, fixed speeds, braking and stopping phases.

Authors presents also carried out road measurements of real city buses in the Silesian agglomeration. The framework carried out measurements of traffic speeds and recording gear change buses operating in an the Silesian agglomeration. Measurements were made for a random number of passengers changing at each stop. Measurements were made many times on individual driving distances, and the results averaged. A representative route for city buses operating in an urban area has been developed.

#### 1. Wstęp

Sprawność przetwarzania energii w wieloźródłowym napędzie spalinowo-elektrycznym zależy w głównej mierze od profilu realizowanego cyklu jazdy. Elementarny cykl jezdny składa się z faz przyspieszania do zadanej prędkości, jazdy z prędkością ustaloną, hamowania i postoju (rys. 1) [1][3]. Podczas przyspieszania energia zużywana jest na realizację pracy użytecznej (pokonanie oporów ruchu i zwiększenie energii kinetycznej pojazdu) oraz pokrycie strat w układzie przeniesienia napędu. Moc potrzebna na przyspieszenie pojazdu do zadanej prędkości jest znacznie większa niż moc potrzebna na poruszanie się ze stałą prędkością. Natomiast podczas hamowania energia kinetyczna zgromadzona w masie pojazdu i wirujących masach bezwładności jest tracona w postaci energii cieplnej w hamulcach ciernych pojazdu. Ścieranie powierzchni trących powoduje zużycie okładzin hamulców oraz tarcz i bębnow hamulcowych, a starty pył zanieczyszcza środowisko.

#### 2. Sprawność energetyczna hybrydowego układu napędowego

Sprawność energetyczna układu napędowego analizowano przy założeniu, że autobus ma tę samą masę i te same parametry trakcyjne, porusza się po tej samej drodze i w tym samym cyklu jazdy (postój, przyspieszanie, jazda z prędkością ustaloną, hamowanie). Analizę przeprowadzono dla dwóch rodzajów układu napędowego: napęd spalinowy (ICE) i hybrydowy (HEV) [4].

Sprawność wykorzystania energii w napędzie hybrydowym zależy od czasu trwania przejazdu ze stałą prędkością w cyklu (przedział czasowy  $t_1 - t_2$  na rysunku 4.1). Sprawność tą można wyrazić zależnością [2]:

$$\chi = \frac{\int_{t_2}^{t_3} P_k(t) dt}{\int_{t_2}^{t_3} P_k(t) dt} \quad (1)$$

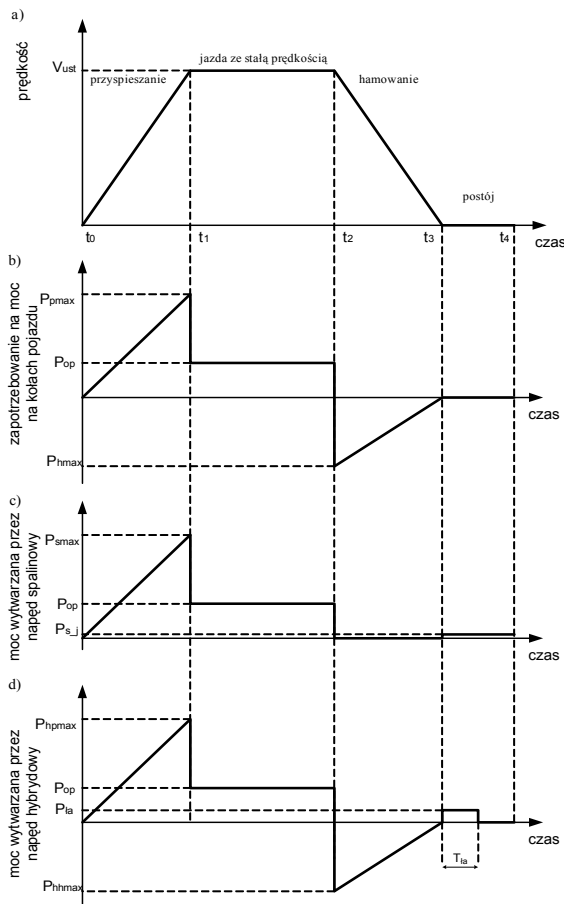
Przy założeniu bezstratnego przesyłu energii z rysunku 1 wynika, iż w czasie rozruchu, przyspieszania i w czasie jazdy ustalonej zużycie energii przez napęd spalinowy i hybrydowy jest takie samo. Oszczędność w zużyciu energii pomiędzy napędem spalinowym i napędem hybrydowym zależy od ilości odzyskanej energii w czasie ( $t_2 - t_3$ ) i różnicy energii zużywanej w czasie postoju pojazdu ( $t_3 - t_4$ ). Podczas postoju silnik spalinowy musi wytworzyć moc potrzebną na uzupełnienie energii elektrycznej w zasobniku.

$$E_{spa} - E_{hyb} = \int_{t_2}^{t_4} (P_s(t) - P_{hyb}(t)) dt \quad (2)$$

Względne zmniejszenie zużycia energii w porównaniu z napędem hybrydowym w stosunku do napędu spalinowego:

$$\chi\% = \frac{E_{spa} - E_{hyb}}{E_{spa}} 100 \quad (3)$$

Energochłonność fazy ruchu ze stałą prędkością oznacza bilansowanie mocy na kołach pojazdu i mocy zasadniczych oporów ruchu. Odzyskanie zużytej energii w fazie ruchu ze stałą prędkością jest niemożliwe. Uwzględniając ten fakt można stwierdzić, iż zwiększanie czasu jazdy ze stałą prędkością zmniejsza ogólną efektywność wykorzystania energii w napędzie hybrydowym.



Rys. 1. Elementarny cykl jezdny pojazdu samochodowego. a) zmiany prędkości; b) moc na kołach pojazdu podczas cyklu; c) moc wytwarzana przez silnik spalinowy podczas napędu czysto spalinowego; d) moc wytwarzana przez hybrydowy układ napędowy;  $v_{ust}$  – prędkość ustalona,  $P_{op}$  – moc potrzebna na utrzymanie stałej prędkości jazdy,  $P_{pmax}$  – maksymalna moc podczas przyspieszania,  $P_{hmax}$  – maksymalna moc podczas hamowania,  $P_{smax}$  – maksymalna moc silnika spalinowego,  $P_{s,j}$  – moc wytwarzana przez silnik na biegu jałowym,  $P_{hpmax}$  – maksymalna moc napędu hybrydowego,  $P_{hmax}$  – maksymalna moc generatora podczas hamowania odzyskowego,  $P_{la}$  – moc ładowania zasobnika energii elektrycznej,  $T_{la}$  – czas ładowania podczas postoju

Całkowitą efektywność napędu można zdefiniować także jako stosunek energii wyjściowej  $E_{wy}$  (energii cyklu jazdy) do wejściowej  $E_{we}$  (proporcjonalnej do ilości zużytego paliwa przez silnik spalinowy). Jeśli na końcu cyklu poziom energii w zasobniku energii elektrycznej nie jest taki sam jak na początku cyklu, to należy do energii wejściowej dodać energię potrzebną na doładowanie zasobnika.

$$\eta_{cykl} = \frac{E_{wy}}{E_{we}} = \frac{\int_0^{t_4} P_k(t) dt}{m_{pal} \cdot WO_{pal}} \quad (4)$$

gdzie:  $m_{pal}$  – masa paliwa w kg,  $WO_{pal}$  – wartość opałowa paliwa w MJ/kg.

### 3. Zużycie energii napędu hybrydowego

Profil prędkości trasy odpowiedniej długości obejmuje fazy ruchu takie jak[5]:

- Przyspieszanie i jazda ze stałą prędkością – wymuszone siłą napędową.
- Ruch opóźniony spowodowany zbyt małą siłą napędową względem siły oporów ruchu.
- Ruch swobodny przy całkowitym braku siły napędowej, tzw. wybieg. Podczas wybiegu siły oporów ruchu pokonywane są dzięki energii kinetycznej pojazdu zgromadzonej podczas przyspieszania.
- Ruch opóźniony spowodowany hamowaniem, czyli wymuszeniem siły hamującej przeciwnej do kierunku ruchu.

Energochłonność całkowita ruchu pojazdu spowodowana siłą napędową to suma energochłonności samego ruchu pojazdu, strat przetwarzania energii paliwa w silniku spalinowym i strat układu przeniesienia napędu.

Bilans energetyczny ruchu pojazdu można zapisać ogólnie:

$$V_{pal} \cdot \rho_{pal} \cdot WO_{pal} = E_t + E_p + E_w + E_k + \Delta E_s + \Delta E_{nap} \quad (5)$$

gdzie:  $\Delta E_s$  – straty przetwarzania energii paliwa w silniku,  $\Delta E_{nap}$  – straty energii w układzie napędowym,  $\bar{\eta}_n$  – średnia sprawność napędu,  $E_t$  – energia wydatkowana na pokonanie oporów toczenia,  $E_p$  – energia wydatkowana na pokonanie oporów powietrza,  $E_w$  – energia wydatkowana na pokonanie oporów wzniesienia,  $E_k$  – energia kinetyczna.

Energochłonność ruchu pojazdu:

$$E_n = mgf \int_0^T v(t) dt + c_x S \rho_p \int_0^T v(t)^2 dt + \quad (6)$$

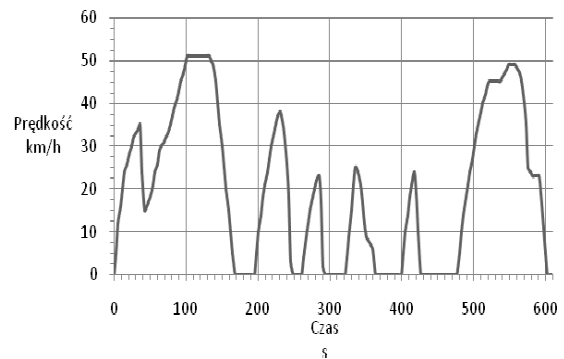
$$+m\delta \int_0^T a(t)v(t)dt$$

gdzie:  $m$  – masa pojazdu,  $f_t$  – współczynnik oporów toczenia,  $c_x$  – współczynnik oporów powietrza,  $S$  – powierzchnia czołowa pojazdu,  $\rho_p$  – gęstość powietrza,  $\delta$  – współczynnik bezwładności mas wirujących.

#### 4. Badania drogowe rzeczywistych cykli jazdy – trasa reprezentatywna

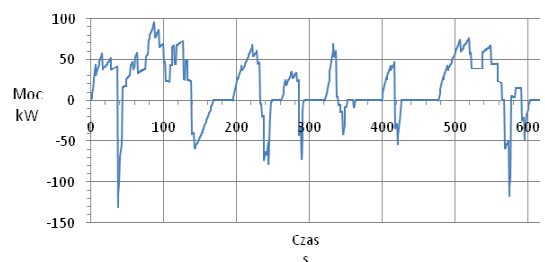
Istnieje wiele reprezentatywnych cykli jazdy opracowanych głównie przez organizacje i instytucje motoryzacyjne lub zajmujące się ochroną środowiska – europejskie: UDC (Urban Driving Cycle), EDC (European Drive Cycle), EUDC, (Extra Urban Driving Cycle) NEDC (New European Driving Cycle), ESC (European Stationary Cycle), ELR (European Load Response), amerykańskie: FTP 72 (Federal Test Procedure), FTP 75, US06, SC03, NYCC (New York City Cycle), HWFET (Highway Fuel Economy Test), UC (Unified California), Heavy-Duty transient cycle, Heavy-Duty SET, NYComp, NYB (New York Bus), HHDDT (Heavy Heavy-Duty Diesel Track), japońskie: 10-25, JC08, 13, JE05. Cykle te przeznaczone są w większości dla pojazdów lekkich, samochodów osobowych, a te przeznaczone dla pojazdów ciężarowych zawierają jedynie informację o czasach pracy silnika przy określonym obciążeniu. Wszystkie cykle przeznaczone są do testów emisji spalin przez samochody i nie odzwierciedlają rzeczywistych warunków poruszania się samochodu, a w szczególności cyklu poruszania się autobusu miejskiego bez wyznaczonego pasa ruchu. W ramach badań przeprowadzono pomiary drogowe rejestrując prędkość i zmianę biegów autobusów poruszających się w aglomeracji śląskiej. Pomiary wykonane zostały dla przypadkowej liczby pasażerów zmieniającej się na każdym przystanku. Pomiary wykonano wielokrotnie na poszczególnych trasach przejazdu, a wyniki uśredniono. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów drogowych rzeczywistych cykli jazdy autobusów miejskich na terenie miast aglomeracji śląskiej opracowano reprezentatywny cykl jazdy nazwany Silesia Bus. Opracowany reprezentatywny cykl jazdy odzwierciedla rzeczywiste warunki poruszania się autobusów z uwzględnieniem parametrów takich jak rozwijane prędkości i przyspieszenia oraz czasy postojów i jazdy ze stałą prędkością.

Profil prędkości cyklu reprezentatywnego Silesia Bus przedstawiono na rysunku 2.

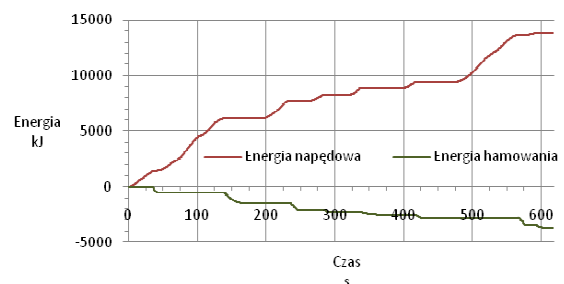


Rys. 2. Profil prędkości reprezentatywnego cyklu Silesia Bus

Bilans energetyczny reprezentatywnego cyklu jazdy przeprowadzono na podstawie danych autobusu Jelcz PR-110 z napędem ICE. Wybór modelu PR-110 podyktowany był dostępem do danych konstrukcyjnych nadwozia autobusu i silników w nim stosowanych [6]. Ponadto autorzy dysponowali dostępem do hamowni silnikowej z zainstalowanym silnikiem SW-400 [7]. Dane techniczne autobusu Jelcz PR-110 umieszczono w Załączniku nr 2. Symulację przejazdu zadanego cyklu jazdy przeprowadzono w programie Matlab/Simulink. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono odpowiednio przebiegi zmian mocy na kołach pojazdu i zmiany energii napędowej i hamowania.

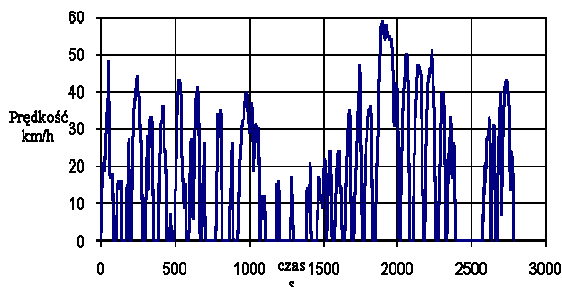


Rys. 3. Przebieg zmian mocy na kołach autobusu Jelcz PR-110 pokonującego cykl reprezentatywny Silesia Bus



Rys. 4. Przebieg zmian energii wydatkowanej przez układ napędowy i hamowania autobusu

Wartości mocy maksymalna i minimalna cyklu jazdy wynoszą odpowiednio  $P_{\max} = 95$  kW,  $P_{\min} = -128$  kW, średnia moc cyklu wynosi  $P_{\text{sr}} = 22$  kW. Energia wydatkowana na kołach pojazdu na pokonanie oporów ruchu i przyrostu prędkości wynosi  $E_{\text{nap}} = 13000$  kJ, a energia kinetyczna rozproszona w fazach ruchu opóźnionego wynosi  $E_h = 3800$  kJ. Uwzględniając energetycznie uśrednioną sprawność układu przeniesienia napędu można wyznaczyć energię wydatkowaną przez zespół napędowy na wale silnika spalinowego. Energia wydatkowana przez jednostkę napędową na pokonanie zasadniczych oporów ruchu wynosi  $E_{\text{op}} = 8260$  kJ, a na pokonanie oporów związanych ze zwiększaniem prędkości pojazdu  $E_a = 7000$  kJ. Przykładowy przebieg prędkości zarejestrowanej podczas pomiarów pokazano na rysunku 5, a na rysunku 6 pokazano trasę autobusu. Pomiarzy prowadzono na liniach autobusów miejskich jeżdżącym w centrach miast, szczególnie uwzględniając pory dnia szczytu porannego i popołudniowego.



Rys. 5. Przebieg zmian prędkości na trasie Gliwice Trynek – Gliwice Łabędy

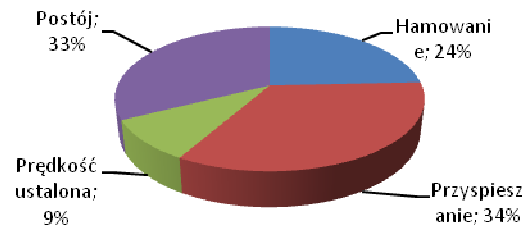


Rys. 6. Podgląd trasy autobusu miejskiego na trasie Gliwice Trynek – Gliwice Łabędy

Droga całkowita cyklu reprezentatywnego wynosi  $l = 3388$  m, a całkowity czas przejazdu wynosi 618 s, z czego 150 s to proces hamowania, 210 s zajmuje przyspieszanie, czas jazdy ze stałą prędkością wynosi 57 s, a postój na biegu

jałowym 201 s. Średnia prędkość trasy wynosi  $v_{\text{sr}} = 19,6$  km/h, a prędkość maksymalna  $v_{\max} = 52$  km/h. Procentowy udział poszczególnych faz ruchu pokazano na rysunku 7.

## 5. Podsumowanie



Rys. 7. Procentowy udział poszczególnych faz ruchu dla opracowanego reprezentatywnego cyklu jazdy Silesia Bus

Projektując pojazd z napędem spalinowo-elektrycznym należy wziąć pod uwagę profil trasy, po której dany pojazd będzie się poruszał. Szczególnie predysponowaną grupą pojazdów poruszających się wyłącznie w cyklach ruszanie- hamowanie- postój, w których celowe jest stosowanie napędu spalinowo-elektrycznego są autobusy komunikacji miejskiej i miejskie pojazdy dostawcze. Za zastosowaniem napędu hybrydowego w autobusie miejskim przemawiają także czynniki techniczne, takie jak mniejsze prędkości maksymalne (w stosunku do samochodów osobowych), ograniczenia przyspieszeń, małe wartości wzniesień oraz większa dostępna przestrzeń na zainstalowanie dodatkowego zasobnika energii elektrycznej i maszyny elektrycznej

Przeprowadzone w ramach badań pomiarów drogowe pokazały, że przez ok. 30% całkowitego czasu trwania przejazdu autobusu w aglomeracji śląskiej przypada na postój i pracę napędu na biegu jałowym, a czas jazdy z prędkością ustaloną waha się między 6% do 9% całkowitego czasu jazdy. Przeprowadzenie pomiarów drogowych i opracowanie reprezentatywnego cyklu jazdy pozwoliło na wyznaczenie bilansu energetycznego w punkcie styku koła z nawierzchnią autobusu poruszającego się w warunkach miejskich. Z przeprowadzonego bilansu wynika, że przy napędzie hybrydowym i reprezentatywnym cyklu jazdy Silesia Bus możliwe jest odzyskanie w czasie hamowania ok. 30% energii zużywanej przez autobus napędzany przez silnik spalinowy, jeśli układ napędowy będzie w stanie ją odebrać i zmagazynować.

## 6. Literatura

- [1]. Dębicki M.: *Teoria samochodu. Teoria napędu* Warszawa 1969.
- [2] Szumanowski A. *Teoria samochodu. Akumulacja energii w pojazdach WKŁ*, Warszawa 1984.
- [3]. Fice M., Glinka T., Setlak R.: *Hybrydowy napęd pojazdu miejskiego*. Zeszyty Problemowe Maszyn Elektrycznych Nr 75/2006.
- [4]. Fice M.: *Zarządzanie rozplywem energii w napędzie hybrydowym*. Praca doktorska, Gliwice 2010.
- [5]. Siłka W.: *Energochłonność ruchu samochodu* WNT, Warszawa 1997.
- [6]. Piegot J., Sikorska G. H., Sobotowski J. G.: *Katalog wyrobów przemysłu motoryzacyjnego POLMO – środki transportu samochodowego* Katalog SWW 1023, Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego „Wema”, Warszawa 1981.
- [7]. Dobrzyński J. Lisowski T. Stecki A.: *Szybkoobrotowe Silniki Wysokoprężne* Katalog SWW 0715-1, Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego „Wema”, Warszawa 1976.