

**Marcin Fice**  
**Politechnika Śląska, Gliwice**

## STRATEGIA ZARZĄDZANIA ROZPŁYWEM MOCY W NAPĘDZIE HYBRYDOWYM O STRUKTURZE RÓWNOLEGŁEJ

### STRATEGY MANAGEMENT OF POWER DISTRIBUTION IN PARALLEL HYBRID ELECTRIC DRIVE

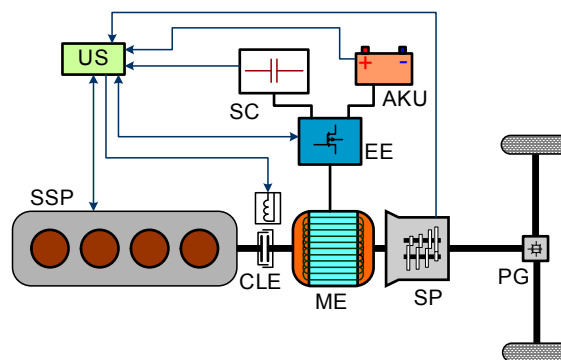
**Abstract:** The main objective of the strategy of energy management in hybrid vehicle is to reduce fuel consumption by controlling the flow of power. Review of literature shows that the optimal management techniques used in the design of hybrid electric systems are fuzzy logic, static optimization (where the electrical energy is measured in equivalent fuel consumption), adaptive algorithms and dynamic programming. The last one is most commonly used and allows to determine the global optimum for the system management strategy. Recorded in Gliwice and Zabrze real driving cycles of city buses have shown that it is not possible to prepare a unique urban driving cycle with non-separated bus lanes. For this reason, it seems appropriate to use rule-based optimization. This type of process based on algorithms and maps of particular parts of the drive enables searching and selection of optimal operating parameters dependent on instantaneous conditions.

#### 1. Wstęp

Głównym celem strategii zarządzania energią w pojeździe z napędem hybrydowym jest obniżenie zużycia paliwa poprzez kontrolę przepływu mocy na zadanej trasie przejazdu. Zarejestrowane w Gliwicach i Zabrze rzeczywiste cykle jazdy autobusów miejskich wykazały, iż nie jest możliwe opracowanie jednoznacznego cyklu jazdy autobusu miejskiego nie posiadającego wydzielonych pasów ruchu. Autobusy razem z innymi pojazdami wykonują manewry przyspieszania i hamowania zgodnie z warunkami panującymi na drodze i możliwością rozwinięcia odpowiedniej prędkości, a sytuacje drogowe są niepowtarzalne. Na takiej drodze nie jest możliwe poruszanie się autobusu zgodnie z zoptymalizowanym cyklem prędkości. Biorąc pod uwagę powyższe założenia konieczne jest wybranie odpowiedniej techniki sterowania przepływem mocy, która zapewni wybór optymalnych warunków pracy dla chwilowych parametrów jazdy hybrydowego układu napędowego autobusu [1][2].

Dla analizowanego hybrydowego układu napędowego autobusu miejskiego zastosowano optymalizację algorytmową (rule-based optimization) [3]. Tego typu proces oparty na algorytmach i mapach pracy poszczególnych elementów napędu umożliwia poszukiwanie i wybór optymalnych parametrów pracy zależnych od warunków chwilowych. Dla równoległego napędu hybrydowego istnieje pięć możliwych trybów pracy: napęd EV, napęd ICE, tryb HEV,

ładowanie zasobnika energii przez silnik spalinowy, hamowanie odzyskowe. W celu obniżenia zużycia paliwa system zarządzania rozplływem mocy musi decydować, który tryb powinien w danych warunkach drogowych zostać uaktywniony oraz dobrać odpowiednie parametry rozdziału mocy pomiędzy napęd spalinowy i elektryczny w zależności od żądań kierowcy oraz utrzymania odpowiedniego poziomu naładowania podwójnego zasobnika energii elektrycznej. Podstawowym problemem ustalenia optymalnego obciążenia silnika spalinowego pracującego jako źródło pierwotne hybrydowego układu napędowego o strukturze równoległej (rys. 1) jest brak swobody w ustaleniu punktu pracy źródła pierwotnego. Prędkość obrotowa silnika zależy od prędkości jazdy autobusu.



Rys. 1. Schemat blokowy hybrydowego układu napędowego o strukturze równoległej

## 2. Kryterium minimalizacji zużycia paliwa dla napędu hybrydowego autobusu miejskiego

W metodzie optymalizacji algorytmowej wykorzystano regułę minimum chwilowego jednostkowego zużycia paliwa, a postawione przez autora zadanie to odnalezienie takiego sterowania przepływem mocy źródła wtórnego  $P_{el}(t)$ , aby zmniejszyć chwilowe jednostkowe zużycie paliwa silnika spalinowego  $g_e(t)$ , przy tym zmniejszyć zużycie paliwa w cyklu jazdy  $G_f$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} G_f = \sum_{T_c=0}^{T_c} \left( P_s(t) \min_{P_{me}(t)/v} g_e(t) \right) P_s(t) T_c \\ k_{AKUmin} < k_{AKU}(t) < k_{AKUmax} \\ k_{SCmin} < k_{SC}(t) < k_{SCmax} \\ P_{AKUmin} < P_{AKU}(t) < P_{AKUmax} \\ P_{SCmin} < P_{SC}(t) < P_{SCmax} \end{array} \right. \quad (1)$$

gdzie:  $P_s(t)$  – moc silnika spalinowego,  $P_{me}(t)$  – moc silnika elektrycznego,  $k_{AKU}(t)$  – stan naładowania akumulatorów,  $k_{SC}(t)$  – stan naładowania superkondensatorów,  $P_{AKU}(t)$  – moc akumulatorów,  $P_{SC}(t)$  – moc superkondensatorów.

Powyższa reguła odnosi się do minimalizacji chwilowego jednostkowego zużycia paliwa przez napęd hybrydowy poprzez dobranie najlepszego chwilowego rozdziału obciążenia pomiędzy silnik spalinowy i elektryczny sterując mocą wtórnego źródła energii elektrycznej  $P_{el}(t)$ .

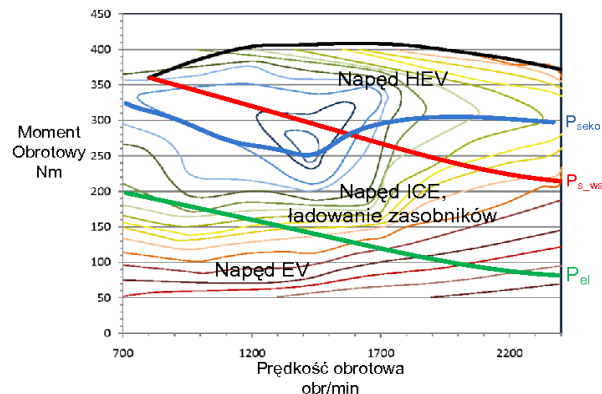
Podstawowe parametry optymalizacji algorytmowej są dobierane na podstawie pomiarów eksploatacyjnych oraz charakterystyk uniwersalnych silnika spalinowego i parametrów maszyny elektrycznej. Sygnałem wejściowym dla poszczególnych trybów pracy napędu oraz odpowiedniego rozdziału mocy jest położenie pedału przyspieszenia, czyli moc zadana  $P_{zad}(t)$ , poziom zapotrzebowania na moc, aktualna prędkość pojazdu  $v(t)$  i przyspieszenie  $a(t)$  oraz stan naładowania zasobników energii elektrycznej  $k_{AKU}(t)$ .

## 3. Algorytm rozdziału mocy

Optymalizacja algorytmowa bazuje na analizie map sprawności urządzeń napędowych i źródeł energii [5]. Proces ten polega na ustaleniu rozdziału rozprywu energii napędu hybrydowego na podstawie zdefiniowanych reguł zależnych od sprawności komponentów układu napędowego. Kierowca pojazdu poprzez regulację

ustawienia pedału przyspieszenia lub hamulca zadaje moc układu napędowego  $P_{zad}$ , a układ sterujący na podstawie zdefiniowanych reguł i map sprawności napędu decyduje o proporcji obciążenia mocą pomiędzy napędem spalinowym i elektrycznym.

Działanie algorytmu układu sterującego pracą silnika spalinowego można podzielić na obszary zaznaczone na mapie sprawności silnika spalinowego (rys. 2).



Rys. 2. Opracowana mapa sprawności silnika spalinowego na podstawie pomiarów rzeczywistego silnika wysokoprężnego SW-400 z obszarami sterowania algorytmowego

Poszczególne obszary oddzielone są od siebie liniami poziomów stałej mocy przeniesionej na wał silnika spalinowego, w trybie EV  $P_{el}$  (zielona) oraz pracy HEV  $P_{s,ws}$  (czerwona). Krzywa mocy  $P_{seko}$  odpowiada punktom pracy silnika spalinowego przy najmniejszym jednostkowym zużyciu paliwa  $q_e$ . Dodatkowym czynnikiem warunkującym obszar działania jest stan energetyczny zasobnika energii elektrycznej  $k$ .

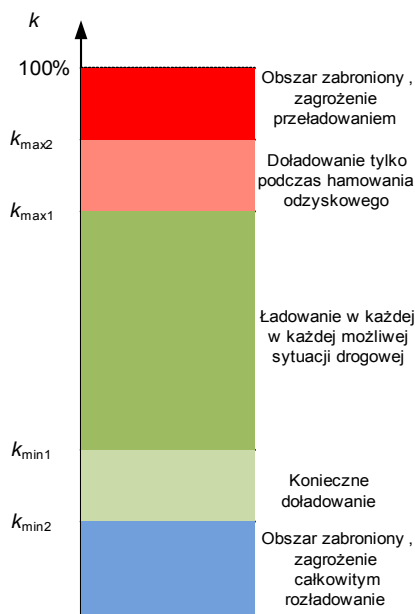
### 3.1. Tryb napędzania

Silnik spalinowy pracuje zawsze w obszarze pomiędzy pracą w trybie EV -  $P_{el}$  i HEV -  $P_{s,ws}$ . Obszar ten został wyznaczony na podstawie sprawności silnika spalinowego i odpowiada największym sprawnościom osiąganym przez silnik. Silnik elektryczny włączany jest w obszarze poniżej linii mocy  $P_{el}$  i pracuje jako jedyny napęd autobusu, oraz powyżej linii mocy  $P_{s,ws}$  jako wspomaganie silnika spalinowego. Wynika z tego, że silnik spalinowy pracuje tylko w obszarze największej sprawności.

### 3.2. Tryb ładowania

Utrzymanie odpowiedniego poziomu naładowania zasobników energii elektrycznej wyma-

gane jest ze względu na utrzymanie płynności jazdy oraz zabezpieczenie zasobników przed szybką utratą pojemności. Stopień naładowania akumulatorów powinien oscylować w granicach 20% do 80% (rys. 3).



Rys. 3. Wykaz dopuszczalnych i granicznych obszarów stanu naładowania akumulatora

Jeżeli stopień naładowania zasobników  $k$  obniży się poniżej ustalonej wartości  $k_{min}$  wówczas układ sterujący przełącza napęd w tryb ładowania zasobnika energii elektrycznej. Ładowanie zasobników może wystąpić tylko w obszarze pracy silnika spalinowego bez wspomagania, do mocy zadanego cyklu jazdy  $P_{tr}$  dodawana jest dodatkowa moc potrzebna na naładowanie zasobników  $P_{la}$ , suma mocy  $P_{tr}$  i  $P_{la}$  nie może być wyższa od mocy  $P_{s\_ws}$ .

W przypadku superkondensatorów nie istnieje zagrożenie szybkiej utraty trwałości, spowodowanej zbyt głębokim wyładowaniem. Jedyne ograniczeniem są maksymalne wartości napięcia i prądu. Superkondensatory w napędzie hybrydowym współpracują z przekształtnikiem Buck/Boost, aby zapewnić stałą moc ładowania lub rozładowania przy zmniejszającym się napięciu na zaciskach superkondensatorów musi wzrastać wartość prądu. Według powyższego przyjęto zakres napięciowy pracy superkondensatorów  $k_{SC\_U} = (0,33U_n \dots U_n)$ .

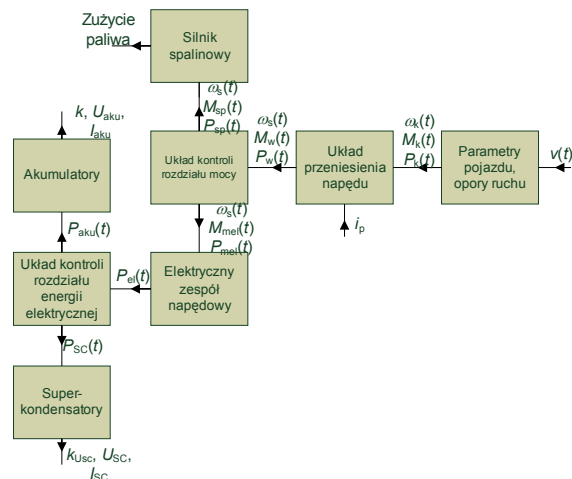
### 3.3. Tryb hamowania odzyskowego

Naciśnięcie pedału hamulca jest informacją dla sterownika napędu autobusu o wymuszeniu ujemnej wartości mocy na kołach pojazdu

( $P_{tr} < 0$ ). Podczas hamowania energia kinetyczna pojazdu może zostać częściowo odzyskana i zgromadzona w zasobnikach energii elektrycznej. Zastosowanie superkondensatorów zwiększa sprawność odzysku energii. Z tego powodu w pierwszej kolejności podczas hamowania rekuperacyjnego energia jest przesyłana do superkondensatorów, a po osiągnięciu maksymalnej wartości poziomu energii następuje ładowanie akumulatorów. Jeżeli zasobniki nie mogą przyjąć energii pojazdu to hamowanie wymuszane jest hamulcami mechanicznymi/hydraulicznymi pojazdu. Ilość możliwej do odzyskania energii podczas hamowania zależy od sprawności układu przeniesienia napędu oraz stopnia rozdziału mocy hamowania na koła napędzane i nienapędzane, a także od poziomu naładowania zasobników. Moc hamowania odzyskowego ograniczona jest także maksymalną mocą maszyny elektrycznej pracującej jako prądnica  $P_{hemax}(t)$  połączonej mechanicznie z osią napędową pojazdu. Jeśli moc hamowania będzie większa niż maksymalna moc maszyny elektrycznej wówczas dodatkowo hamowanie realizowane jest hamulcem mechanicznym/hydraulicznym, który musi odebrać nadwyżkę mocy  $P_{hm}(t) = P_{tr}(t) - P_{hemax}(t)$ .

### 4. Badania symulacyjne

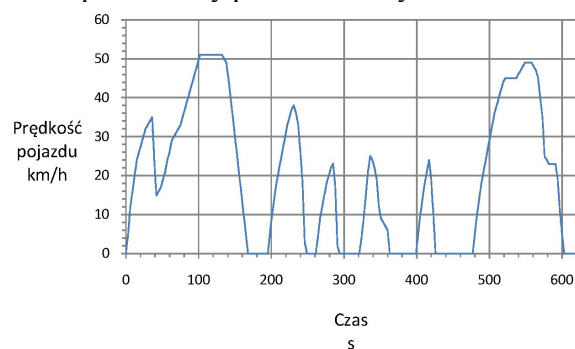
W rozdziale przedstawiono wyniki symulacji pracy hybrydowego układu napędowego autobusu. Symulacje zostały przeprowadzone metodą quasi-statyczną, dla której danymi wejściowymi są prędkość i przyspieszenie pojazdu. Danymi wyjściowymi jest zużycie paliwa oraz wartość stopnia naładowania zasobnika energii elektrycznej. W symulacji quasi-statycznej zużycie paliwa przez silnik spalinowy jest opisane mapą pracy silnika spalinowego (charakterystyka uniwersalna) uzyskaną przez autora doświadczalnie [4]. Metoda ta pozwala na szybką symulację i łatwe porównanie kilku wariantów układu napędowego. Przebieg prędkości obrotowej i momentu obrotowego silnika spalinowego uzyskuje się z zadanego profilu prędkości pojazdu zgodnie z opracowanym cyklem Silesia Bus wykorzystując estymację parametrów takich jak opory toczenia, opory powietrza, opory bezwładności, przełożenia skrzyni biegów i przekładni głównej, rozkład zmiany biegów, straty mocy w układzie napędowym. Na rysunku 4 pokazano schemat blokowy modelu symulacyjnego.



Rys. 4. Schemat blokowy układu symulacyjnego hybrydowego zespołu napędowego autobusu miejskiego

Symulacje zostały przeprowadzone dla dwóch konfiguracji sprzętowych układu napędowego: - autobus z napędem ICE, - autobus z napędem HEV.

Symulacja przejazdu była przeprowadzona dla opracowanej trasy Silesia Bus, przebieg prędkości profilu trasy pokazano na rysunku 5.

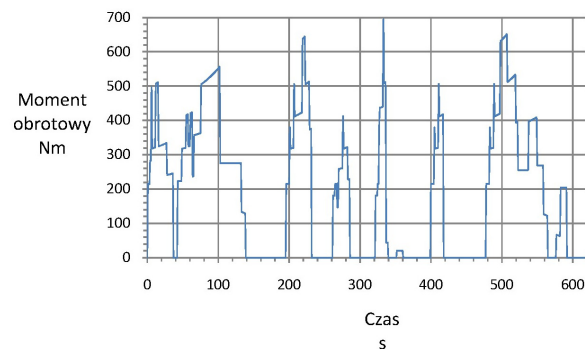


Rys. 5. Przebieg prędkości cyklu Silesia Bus

Parametry modelu pojazdu oparto o dane rzeczywistego autobusu Jelcz PR-110.

#### 4.1. Symulacje napędu ICE

Autobus Jelcz PR-110 w wersji pierwotnej napędzany jest silnikiem SW-680 [6] o mocy maksymalnej  $P_n = 147,2$  kW rozwijanej przy prędkości obrotowej  $n = 2200$  obr/min. Symulację przeprowadzono dla maksymalnej masy dopuszczalnej  $m = 17\,000$  kg. Na rysunku 6 pokazano przebieg zmian momentu obrotowego silnika spalinowego na trasie Silesia Bus, a na rysunku 7 pokazano rozmieszczenie punktów pracy silnika spalinowego. Sumaryczne zużycie paliwa na zadanej trasie wyniosło  $V_{pal} = 1,17$  dm<sup>3</sup>.



Rys. 6. Przebieg momentu obrotowego na wale silnika spalinowego na trasie Silesia Bus

#### 4.2. Symulacje napędu HEV

Analizowany napęd hybrydowy wyposażony jest w silnik wysokoprężny SW-400 [6] oraz elektryczny zespół napędowy UQM Power-Phase®100. Model baterii akumulatorów składającej się z ogniw HHR-650D/FT o łącznej pojemności znamionowej  $Q_n = 45,5$  Ah i napięciu znamionowemu  $U_n = 300$  V. Model baterii superkondensatorów zbudowanej z modułów Maxwell BPAK0058 E015 B01 posiada pojemność znamionową  $C_n = 121,8$  F i napięcie znamionowe  $U_n = 300$  V.

Symulacje napędu pracującego w trybie hybrydowym wykonano dla trzech wariantów będących rozwinięciem metody sterowania algorytmowego. Czasowy rozkład zmiany przełożeń pozostał taki jak dla symulacji autobusu z napędem ICE. Hamowanie rekuperacyjne odbywało się do prędkości 5 km/h.

Wariant nr 1: Zgodnie z przedstawionym algorytmem obszar pracy układu napędowego podzielono na trzy części oddzielone od siebie liniami stałej mocy. Jeśli moc cyklu jazdy przeniesiona na wał silnika spalinowego  $P_{tr}$  leży pomiędzy liniami mocy  $P_{el}$  i  $P_{s\_ws}$  to silnik spalinowy pracuje w obszarze ograniczonym tymi liniami, jeśli natomiast moc  $P_{tr} > P_{s\_ws}$  to wówczas silnik spalinowy realizuje funkcję

$$P_{s\_ws} \cdot \min\left(\frac{P_{tr}}{P_{s\_ws}}, \frac{P_{tr}}{P_{seko}}\right) \cdot g_e(\omega)$$

Wariant nr 2: Silnik spalinowy pracuje tylko w obszarze mocy ograniczonym od dołu krzywą mocy  $P_{el}$ , a od góry dwoma krzywymi mocy  $P_{s\_ws}$  i  $P_{seko}$ .

Wariant nr 3: Punkty pracy silnika spalinowego rozmieszczone są wyłącznie na krzywej mocy utworzonej z  $P_{s\_ws}$  i  $P_{seko}$ .



Zaimplementowany algorytm rozdziału mocy pozwala na zmianę wartości mocy granicznych  $P_{el}$  i  $P_{s\_ws}$ . Umożliwiło to dobranie wartości tych mocy pod względem równowagi między początkowym i końcowym stanem naładowania zasobników energii elektrycznej na trasie Silesia Bus. Wartości tych mocy dla warunku równowagi energetycznej wyniosły odpowiednio dla wariantu nr 1:  $P_{el}=25$  kW,  $P_{s\_ws}=28$  kW, dla wariantu nr 2:  $P_{el}=20$  kW,  $P_{s\_ws}=41$  kW, dla wariantu nr 3:  $P_{el}=18$  kW,  $P_{s\_ws}=36$  kW. Początkowy stan naładowania zasobników wynosił  $k = 0,7$ .

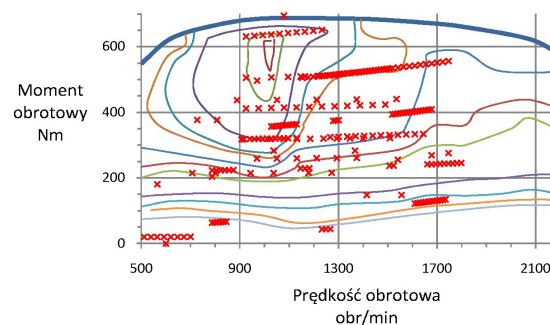
W tabeli 1 pokazano wyniki zużycia paliwa. Na rysunku 8 pokazano rozmieszczenie punktów pracy silnika spalinowego podczas realizacji przejazdu trasy Silesia Bus pojazdem z napędem hybrydowym. Na rysunkach 9, 10 i 11 pokazano zmiany zużycia paliwa i końcowego stanu naładowania zasobnika energii elektrycznej w funkcji mocy  $P_{el}$  i  $P_{s\_ws}$  dla trzech wariantów sterowania.

Tabela 1. Porównanie sumarycznego zużycia paliwa i sprawności cyklu jazdy podczas realizacji zadanego cyklu Silesia Bus

Wielkość jednostka		Tryb pracy			
		ICE	HEV wariant nr 1	HE V wariant nr 2	HE V wariant nr 3
Całkowite zużycie paliwa w cyklu Silesia Bus $V_{pal}$	dm <sup>3</sup>	1,17	0,85	0,84 2	0,81 5
Sprawność cyklu $\eta_{cykl}$	%	23,7	31,9	32,3	33,3

## 5. Wnioski

Przeprowadzone symulacje realizacji cyklu jazdy Silesia Bus z napędem ICE pokazały, że punkty pracy silnika spalinowego leżą praktycznie w całym obszarze charakterystyki uniwersalnej (rys. 7).



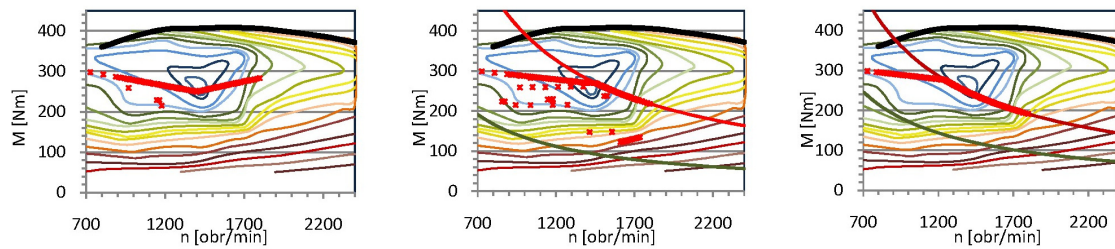
Rys. 7. Rozmieszczenie punktów pracy silnika spalinowego w cyklu Silesia Bus

Dla napędu hybrydowego realizującego regulę minimum chwilowego jednostkowego zużycia paliwa maszyna elektryczna reguluje moment obrotowy na wale silnika spalinowego tak, aby ten pracował w punktach zależnych od przyjętego wariantu sterowania algorytmowego. Paliwo do silnika spalinowego jest odcinane, a silnik jest odłączany mechanicznie od układu napędowego w sytuacjach określonych przez algorytm, czyli przy pracy układu napędowego poniżej mocy  $P_{el}$  i w czasie hamowania oraz postoju.

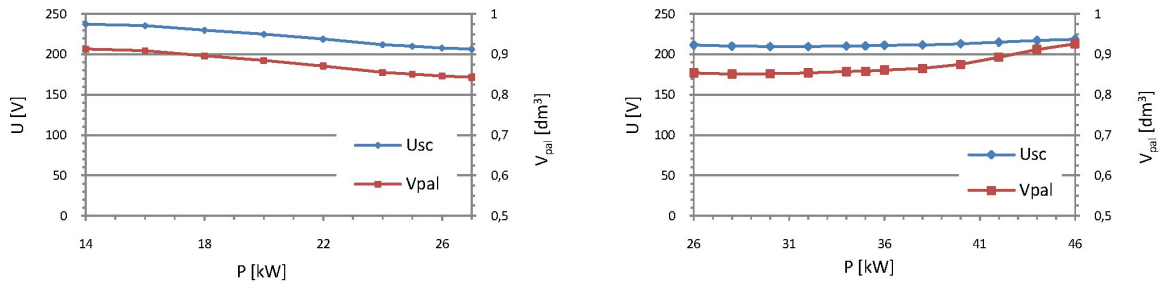
Najmniejsze zużycie paliwa podczas symulacji przejazdu autobusem HEV osiągnięto dla wariantu nr 3 sterowania algorytmowego, dla którego punkty pracy silnika spalinowego rozłożone są na krzywej  $P_{eko}$  (rys. 8).

## 6. Literatura

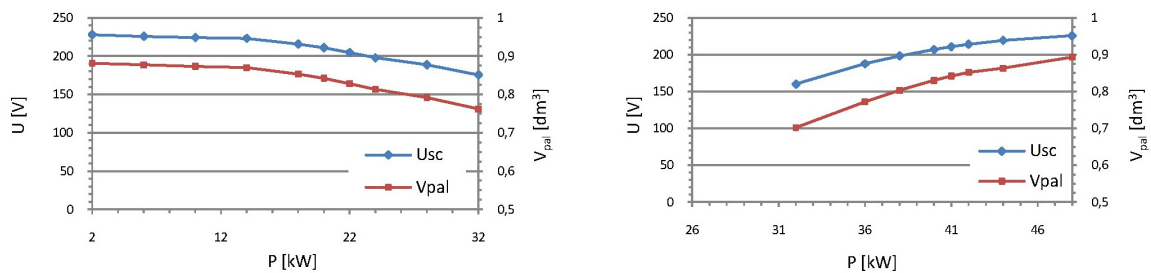
- [1]. Baumann B. M.: *Mechatronic Design and Control of Hybrid Electric Vehicles* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 5 no. 1, 2000
- [2]. Brahma A., Guezennec Y., Rizzoni G. *Dynamic Optimization of Mechanical Power Flow in Parallel Hybrid Electric Vehicles* Proceedings of 5th Int Symposium on Advanced Vehicle Control, Ann Arbor 2000.
- [3]. Lin C., Kang J., Grizzle J. W., Peng H. *Energy management strategy for a parallel hybrid electric truck* Proceedings of the 2001 American Control Conference, Arlington 2001.
- [4]. Fice M.: *Zarządzanie rozplywem energii w napędzie hybrydowym*. Praca doktorska, Gliwice 2010.
- [5]. Hofman T., Steinbuch M. *Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles* Int. Journal Electric and Hybrid Vehicles, Vol. 1 No. 1, 2007.
- [6]. Dobrzyński J. *Szybkoobrotowe Silniki Wysokoprężne* Katalog SWW 0715-1, Wyd. Przemysłu Maszynowego „Wema”, W-wa 1976.



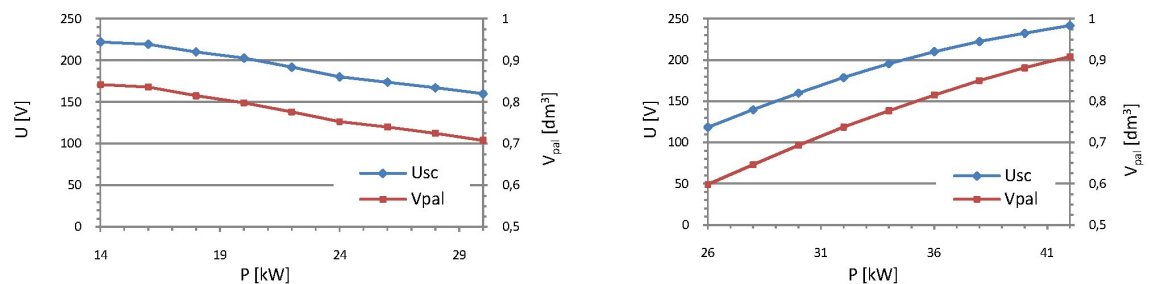
Rys. 8. Rozmieszenie punktów pracy silnika wysokoprężnego dla trzech wariantów sterowania algorytmowego



Rys. 9. Wykresy zmian zużycia paliwa  $V_{pal}$  i końcowego napięcia baterii superkondensatorów  $U_{sc}$  dla wariantu nr 1 sterowania algorytmowego dla: a)  $P_{el}=var$  i  $P_{s\_ws}=28$  kW oraz b)  $P_{el}=25$  kW i  $P_{s\_ws}=var$



Rys. 10. Wykresy zmian zużycia paliwa  $V_{pal}$  i końcowego napięcia baterii superkondensatorów  $U_{sc}$  dla wariantu nr 2 sterowania algorytmowego dla: a)  $P_{el}=var$  i  $P_{s\_ws}=41$  kW oraz b)  $P_{el}=20$  kW i  $P_{s\_ws}=var$



Rys. 11. Wykresy zmian zużycia paliwa  $V_{pal}$  i końcowego napięcia baterii superkondensatorów  $U_{sc}$  dla wariantu nr 3 sterowania algorytmowego dla: a)  $P_{el}=var$  i  $P_{s\_ws}=36$  kW oraz b)  $P_{el}=18$  kW i  $P_{s\_ws}=var$