

ANALIZA PRACY SYSTEMU INERCYJNEJ AKUMULACJI ENERGII W NAPĘDZIE DWUŹRÓDŁOWYM POJAZDU MIEJSKIEGO

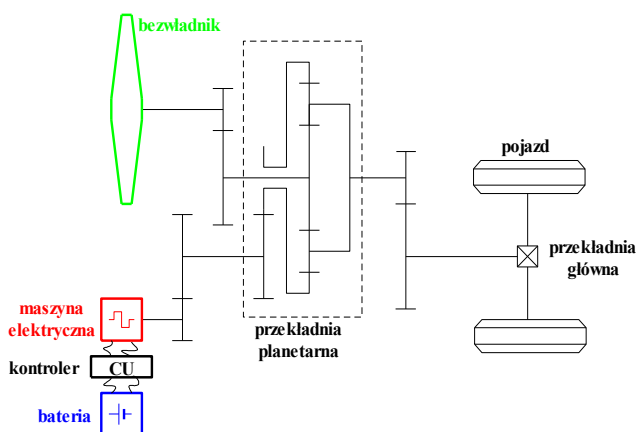
Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę pracy systemu inercyjnej akumulacji energii w napędzie dwuźródłowym pojazdu miejskiego. Dobrano przełożenia pośrednie pomiędzy współpracującymi elementami napędu i przełożenie główne przekładni planetarnej. Modele matematyczne opisujące dane komponentów umożliwiły opis pracy układu. Oszacowano zakresy zmian parametrów mechanicznych i elektrycznych poszczególnych komponentów napędu: momentów, mocy, napięć i prądów, przy spełnieniu założeń: identycznej prędkości bezwładnika i minimalnego wyladowania baterii elektrochemicznej po cyklu pracy. Wyznaczono sprawności energetyczne układu napędowego pracującego wg cyklu ECE w celu sprawdzenia opłacalności zastosowania takiego rozwiązania w lekkim pojeździe miejskim.

WSTĘP

Czysto elektryczny napęd pomimo wielu zalet, szczególnie predysponujących do zastosowania w pojazdach poruszających się w warunkach miejskich, ma podstawową wadę, którą jest stosunkowo niewielki zasięg jazdy. Jest to ściśle związane z typem oraz parametrami elektrycznymi zastosowanych akumulatorów elektrochemicznych. Zwiększanie zasięgu jazdy wiąże się bezpośrednio ze zwiększaniem pojemności elektrycznej takiego ogniwa. Niestety pociąga za sobą istotny wzrost ich masy i sprawia, że trudno jest spełnić postulat „lekkości” pojazdu. Rozwiązaniem może być zaproponowany system inercyjnej akumulacji energii w napędzie dwuźródłowym pojazdu miejskiego.

1. STRUKTURA NAPĘDU DWUŹRÓDŁOWEGO



Rys. 1. Napęd dwuźródłowy [4]

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy napędu dwuźródłowego. Do budowy modelu matematycznego napędu dwuźródłowego z bezwładnikiem i baterią elektrochemiczną jako wtórnymi źródłami energii wykorzystano modele matematyczne poszczególnych elementów układu [2, 4, 6, 10, 11, 12]. Model matematyczny napędu dwuźródłowego pojazdu zapisano za pomocą procedur przeznaczonych do rozwiązywania nieliniowych algebraiczno-różniczkowych układów równań pierwszego rzędu. W użytej procedurze wykorzystano algorytm Gear'a, w którym rząd metody

oraz krok całkowania określane były automatycznie podczas procesu rozwiązywania równań. Dane wejściowe do modelu matematycznego napędu pojazdu zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Dane charakterystyczne dla komponentów napędu dwuźródłowego [4]

Samochód osobowy			
Masa	1000		[kg]
Powierzchnia czołowa	1.6		[m ²]
Współczynnik oporów powietrza	0.33		[-]
Promień dynamiczny koła	0.257		[m]
Moment bezwładności pojazdu	4.11		[kgm ²]
Akumulator elektrochemiczny_GEL			
Nominalna pojemność	45	85	[Ah]
Nominalny prąd	45	85	[A]
Nominalne napięcie	72		[V]
Liczba cel	36		[-]
Masa	96	196	[kg]
Akumulator inercyjny w kształcie stożka			
Masa	14		[kg]
Moment bezwładności	0.263		[kgm ²]
Współczynnik aerodynamiczny	0.1E-07		[Nms ²]
Moment tarcia w łożyskach	0.1		[Nm]
Maszyna elektryczna PM_18.6			
Moc	18.6		[kW]
Prędkość	7500		[obr/min]
Moment	23.84		[Nm]
Nominalne napięcie	75		[V]
Nominalny prąd	256		[A]
Reduktor			
Przełożenie przekładni głównej	4.071		[-]

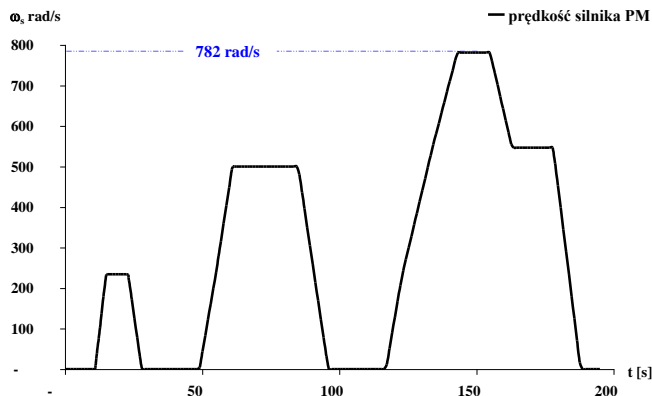
W celu analizy parametrycznej określono:

- ograniczenie maksymalnej i minimalnej prędkości bezwładnika,
- zmienne obciążenie zależne od zmiennej prędkości jazdy,
- ograniczenie maksymalnej prędkości silnika elektrycznego PM,
- ograniczenie napięcia i prądu silnika elektrycznego PM,
- ograniczenie napięcia i prądu baterii elektrochemicznej.

Dobór przełożeń: bazowego przekładni planetarnej i pośrednich pomiędzy akumulatorem inercyjnym a kołem słonecznym oraz

silnikiem elektrycznym PM a kołem koronowym określono na podstawie trzech postulatów:

- minimalne wyladowanie baterii elektrochemicznej po jednym cyklu,
- identyczna prędkość bezwładnika przed i po zakończonym cyklu,
- napęd pojazdu będzie pracował wg cyklu ECE przedstawionego na rysunku 2,



Rys. 2. Interpretacja graficzna zmian prędkości obrotowej silnika PM w czasie cyklu ECE [10]

2. ANALIZA PRACY UKŁADU NAPĘDOWEGO

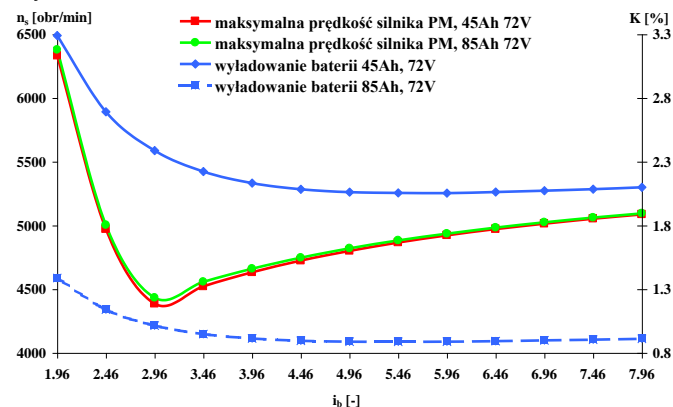
Punktem wyjścia do pełnej analizy pracy napędu dwuzródłowego, było oszacowanie wartości przełożeń pośrednich i ich wpływu na podstawowe parametry komponentów układu, m.in. wyladowanie baterii o różnych pojemnościach. Ważnym kryterium oceny „przydatności” napędu jest odpowiedni zapas mocy potrzebny do doładowania bezwładnika dla różnych przełożeń bazowych przekładni planetarnej. Wyniki badań dla zmiennego przełożenia bazowego przekładni planetarnej przedstawiono tabeli 2.

Tab. 2. Wpływ przełożenia bazowego przekładni planetarnej na parametry układu [4]

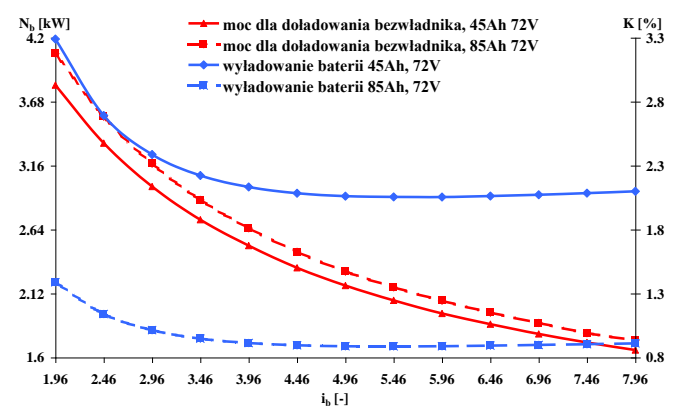
przełożenie: bezwładnik - koło słoneczne 3.7 przełożenie: silnik PM - koło koronowe 2.7 przełożenie przekładni głównej 4.071								
przełożenie bazowe	wyladowanie baterii elektrochemicznej		Maksymalna prędkość silnika PM		moc dla doładowania bezwładnika		zasięg jazdy dla zmiany K (SOC) o 80%	
	[%]		[obr/min]		[kW]		[km]	
[-]	45Ah	85Ah	45Ah	85Ah	45Ah	85Ah	45Ah	85Ah
1.96	3.2901	1.3882	6332.107	6379.054	3.815	4.0707	25	57
2.46	2.6921	1.1397	4972.362	5004.04	3.343	3.558	30	71
2.96	2.3874	1.0142	4386.312	4433.056	2.99	3.176	34	80
3.46	2.2231	0.9476	4521.904	4558.182	2.72	2.881	37	86
3.96	2.133	0.913	4632.582	4660.558	2.51	2.651	38	89
4.46	2.084	0.8954	4724.287	4747.146	2.329	2.459	39	91
4.96	2.0618	0.8882	4800.548	4820.526	2.185	2.299	40	92
5.46	2.0559	0.8871	4866.088	4882.679	2.065	2.171	40	92
5.96	2.0543	0.8884	4922.899	4936.07	1.958	2.061	40	92
6.46	2.0625	0.8927	4971.607	4983.15	1.871	1.965	39	91
6.96	2.0728	0.8982	5014.735	5024.593	1.792	1.881	39	91
7.46	2.0852	0.9039	5052.914	5062.297	1.722	1.799	39	90
7.96	2.0997	0.9109	5086.838	5094.585	1.661	1.739	39	89

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono interpretację graficzną otrzymanych wyników symulacji komputerowej. Początkowo wraz ze wzrostem przełożenia bazowego przekładni planetarnej maleje

procentowe wyladowanie baterii aż do wartości przełożenia bazowego ~5.96. Dalszy wzrost przełożenia bazowego powoduje wzrost procentowego wyladowania baterii i spadek wartości mocy potrzebnej do doładowania bezwładnika.



Rys. 3. Interpretacja graficzna zmian prędkości silnika PM i współczynnika wyladowania baterii w funkcji przełożenia bazowego przekładni planetarnej



Rys. 4. Interpretacja graficzna zmian mocy potrzebnej do doładowania bezwładnika i współczynnika wyladowania baterii w funkcji przełożenia bazowego przekładni planetarnej

Do dalszych badań przyjęto przełożenie bazowe przekładni planetarnej równe 5.96 i wyznaczono przełożenia pośrednie. W tabeli 3 przedstawiono wpływ przełożenia pośredniego silnik PM – koło koronowe, natomiast w tabeli 4 wpływ przełożenia pośredniego bezwładnik – koło słoneczne na parametry układu napędowego.

Tab. 3. Wpływ przełożenia pośredniego silnik PM – koło koronowe na parametry układu [4]

bateria elektrochemiczna 45Ah, 72V, pełne wyladowanie o 80% przełożenie bezwładnik - koło słoneczne 3.7 przełożenie bazowe 5.96 przełożenie przekładni głównej 4.071				
przełożenie silnik PM - koło koronowe	wyladowanie baterii elektrochemicznej	Maksymalna prędkość silnika PM	moc dla doładowania bezwładnika	zasięg jazdy
[-]	[%]	[obr/min]	[kW]	[km]
1.2	1.92	2187.9	1.959	42
1.7	1.9077	3099.514	1.959	43
2.2	1.9638	4011.109	1.959	41
2.7	2.0543	4922.899	1.959	40
3.2	2.1721	5834.438	1.959	37
3.5	2.2539	6381.403	1.959	36
3.7	2.3127	6746.078	1.959	35
3.99	2.4047	7274.876	1.959	34

Tab. 4. Wpływ przełożenia pośredniego bezwładnik – koło słoneczne na parametry układu [4]

bateria elektrochemiczna 45Ah, 72V, pełne wyladowanie o 80% przełożenie silnik PM - koło koronowe 1.7 przełożenie bazowe 5.96 przełożenie przekładni głównej 4.071				
przełożenie bezwładnik - koło słoneczne	wyladowanie baterii elektrochemicznej	maksymalna prędkość silnika PM	moc dla doładowania bezwładnika	zasięg jazdy
[-]	[%]	[obr/min]	[kW]	[km]
1.2	3.4774	4167.387	4.851	23
1.7	2.4007	2832.11	3.569	34
2.2	2.0471	2475.228	2.882	40
2.7	1.9312	2749.333	2.46	42
3.2	1.9023	2948.759	2.17	43
3.7	1.9077	3099.514	1.959	43
4.2	1.9282	3217.506	1.799	42

Analizując zależność procentowego wyladowania baterii w funkcji przełożenia bazowego przekładni planetarnej celowe jest przyjęcie mniejszej jego wartości niż 5.96. Wynika to z możliwości łatwiejszego wykonania przekładni (gabaryty, wytrzymałość), przy porównywalnym procentowym wyladowaniu baterii elektrochemicznej pokazanej na rysunku 3. Dlatego też, zaproponowano przełożenie bazowe przekładni planetarnej 4.46, jako wystarczające dla warunku minimalnego wyladowania baterii w analizowanym cyklu pracy napędu pojazdu. Dla tak dobranego przełożenia bazowego dobrano przełożenia pośrednie i wyznaczono zakres zmian prędkości roboczych bezwładnika, w którym bateria elektrochemiczna charakteryzuje się najmniejszym procentowym wyladowaniem. Przełożenia pośrednie:

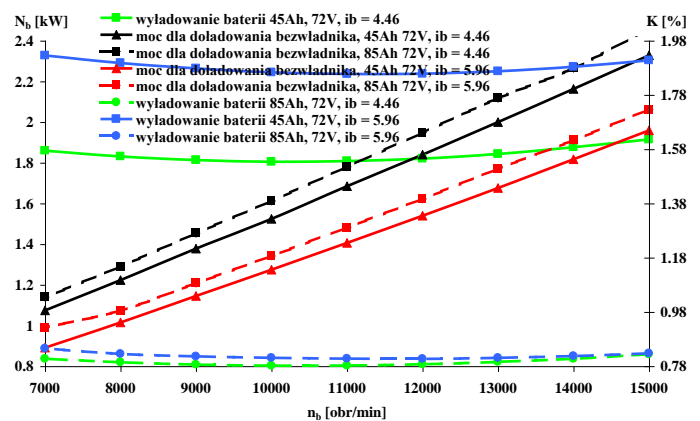
- bezwładnik – koło słoneczne przekładni planetarnej: 3.7,
- silnik elektryczny PM – koło koronowe przekładni planetarnej: 1.7.

Badania symulacyjne wykonano dla baterii o różnych pojemnościach, charakteryzujących się takim samym napięciem - 72V. Otrzymane wyniki symulacji komputerowej przedstawiono w tabeli 5.

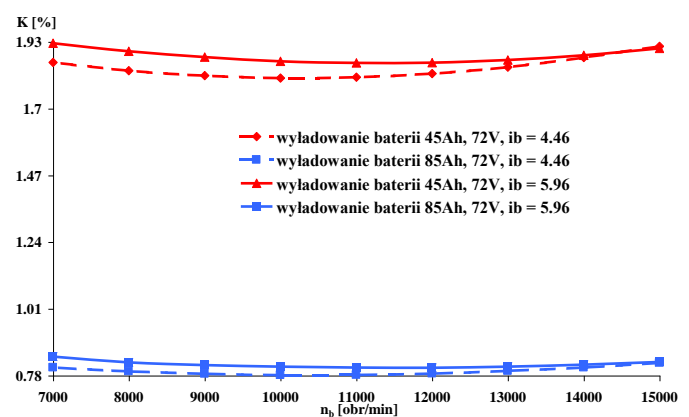
Tab. 5. Wpływ maksymalnej prędkości bezwładnika na parametry układu [4]

przełożenie silnik PM - koło koronowe 1.7 przełożenie bezwładnik - koło słoneczne 3.7 przełożenie bazowe 4.46 przełożenie przekładni głównej 4.071 bateria elektrochemiczna 72 V, pełne wyladowanie o 80%								
Prędkość bezwładnika	maksymalna prędkość silnika PM		wyladowanie baterii		moc dla doładowania bezwładnika		zasięg jazdy	
	[obr/min]		[%]		[kW]		[km]	
	85Ah	45Ah	85Ah	45Ah	85Ah	45Ah	85Ah	45Ah
15000	2988.904	2974.625	0.8242	1.9148	2.459	2.328	99	42
14000	3092.174	3077.927	0.8074	1.8763	2.265	2.163	100	43
13000	3195.249	3181.171	0.7959	1.8433	2.117	2	102	44
12000	3298.591	3284.57	0.7872	1.8204	1.948	1.84	103	47
11000	3402.005	3387.463	0.7825	1.8085	1.78	1.685	104	45
10000	3506.425	3491.737	0.7819	1.8051	1.612	1.524	104	45
9000	3609.559	3594.043	0.786	1.8135	1.453	1.378	104	45
8000	3713.202	3698.29	0.7944	1.8308	1.29	1.223	102	44
7000	3816.469	3801.916	0.8075	1.8591	1.139	1.074	101	44

Na rysunku 5 przedstawiono interpretację graficzną wpływu prędkości bezwładnika na moc potrzebną do doładowania bezwładnika i współczynnik wyladowania baterii elektrochemicznej.



Rys. 5. Interpretacja graficzna zmian mocy potrzebnej do doładowania bezwładnika i współczynnika wyladowania baterii w funkcji maksymalnych prędkości bezładnika



Rys. 6. Interpretacja graficzna zmian wyladowania baterii w funkcji maksymalnej prędkości bezładnika

Na rysunku 6 przedstawiono wpływ prędkości bezwładnika na współczynnik wyladowania baterii elektrochemicznej w analizowanym cyklu pracy układu napędowego.

W celu oszacowania najkorzystniejszego zakresu prędkości roboczych akumulatora inercyjnego, czyli spełnienia warunku jak najmniejszego wyladowania baterii elektrochemicznej, dokonano analizy napędu dwuzródłowego uwzględniając dobór przełożeń. Z analizy komputerowej wynika, że zbyt duże maksymalne obroty bezwładnika zwiększają wprost proporcjonalnie moment oporów własnych, czyli pośrednio zwiększają wyladowanie baterii elektrochemicznej. Natomiast zbyt mała prędkość maksymalna bezwładnika powoduje zbyt szybkie jego wyladowanie i niewystarczający zapas energii dyspozycyjnej, czyli pośrednio duże wyladowanie baterii elektrochemicznej. Na podstawie przeprowadzonych badań dobrano zakres prędkości pracy bezwładnika: 5500 ... 11000 obr/min. Zakres ten wydaje się najkorzystniejszy ze względu na minimalne wyladowanie baterii w cyklu ECE oraz zadawalający zasięg jazdy pojazdu z napędem dwuzródłowym.

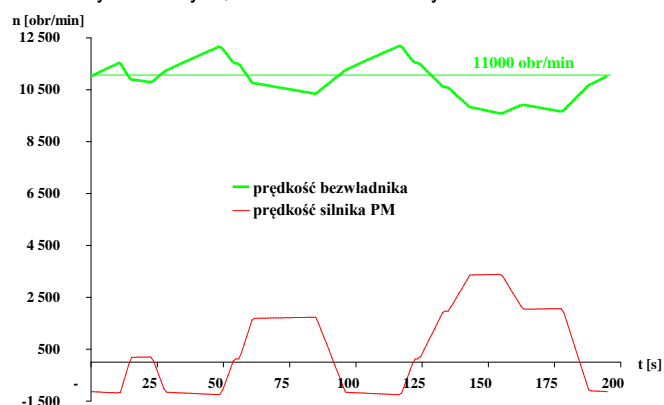
Przeprowadzono badania napędu dwuzródłowego dla baterii o różnych pojemnościach i identycznych przełożeniach: pośrednich, przekładni głównej oraz dwóch przełożeń bazowych przekładni planetarnej. Otrzymane wyniki symulacji komputerowej przedstawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Parametry energetyczne analizowanego napędu dwuzródłowego [4]

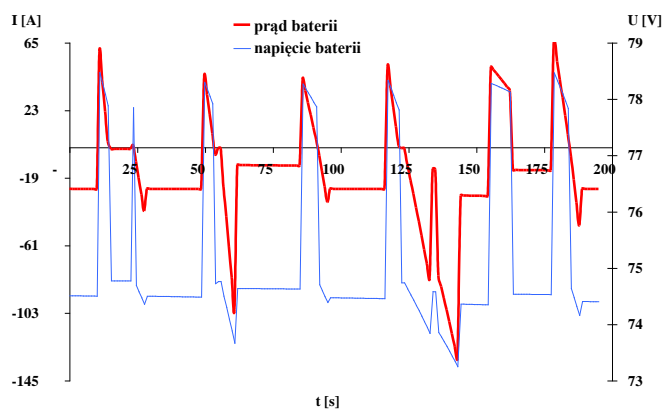
przełożenie bazowe przekładni planetarnej		4.46		5.96	
pojemność baterii - 72 V		45Ah	85Ah	45Ah	85Ah
Bezwałdnik					
energia pobrana podczas przyśpieszania	[kJ]	-138.720	-150.206	-109.832	-118.924
energia pobrana podczas jazdy ustalonej	[kJ]	-35.051	-36.580	-29.721	-30.992
energia oddana podczas fazy hamowania	[kJ]	81.060	88.279	63.440	69.277
energia oddana podczas postoju	[kJ]	92.788	98.621	76.136	80.675
całkowita energia z bezwałdnika	[kJ]	-173.771	-186.786	-139.553	-149.916
całkowita energia do bezwałdnika	[kJ]	173.848	186.900	139.576	149.953
zmiana energii w bezwałdniku	[kJ]	0.077	0.114	0.023	0.037
Bateria					
energia pobrana podczas przyśpieszania	[kJ]	-110.785	-120.602	-131.022	-142.468
energia pobrana podczas jazdy ustalonej	[kJ]	-65.740	-69.548	-72.483	-76.558
energia pobrana podczas hamowania	[kJ]	-20.962	-22.791	-13.271	-14.479
energia pobrana podczas postoju	[kJ]	-115.698	-122.257	-96.359	-101.508
energia oddana podczas przyśpieszania	[kJ]	26.214	28.559	15.566	16.853
energia oddana podczas fazy hamowania	[kJ]	57.890	63.852	67.938	74.648
całkowita energia pobrana z baterii	[kJ]	-313.185	-335.198	-313.134	-335.012
całkowita energia dostarczona z baterii	[kJ]	84.104	92.411	83.504	91.501
energia netto wyładowania baterii	[kJ]	-229.081	-242.788	-229.630	-243.511
maksymalna moc ładowania baterii	[kW]	5.642	6.200	6.181	6.762
maksymalna moc wyładowania baterii	[kW]	9.628	10.431	10.174	11.004
wyładowanie baterii	[-]	0.981915	0.992175	0.981426	0.991923
procentowe wyładowanie baterii	[%]	1.8085	0.7825	1.8574	0.8077
maksymalne obroty silnika PM	[obr/min]	3387.463	3402.269	3408.627	3417.038
prędkość bezwałdnika po cyklu ECE	[obr/min]	11002.420	11003.620	11000.730	11001.170
zasięg jazdy	[km]	45	104	44	101

Na rysunku 7 przedstawiono zakres zmian prędkości obrotowych bezwałdnika i silnika elektrycznego w analizowanym cyklu pracy układu. Identyfikacja stanu naładowania bezwałdnika przed i po reprezentacyjnym cyklu pracy jest istotą poprawnego doboru przełożeń dwuzródłowego układu napędowego, przy odpowiednim kompromisie minimalnego wyładowania baterii elektrochemicznej przedstawionej na rysunku 10.

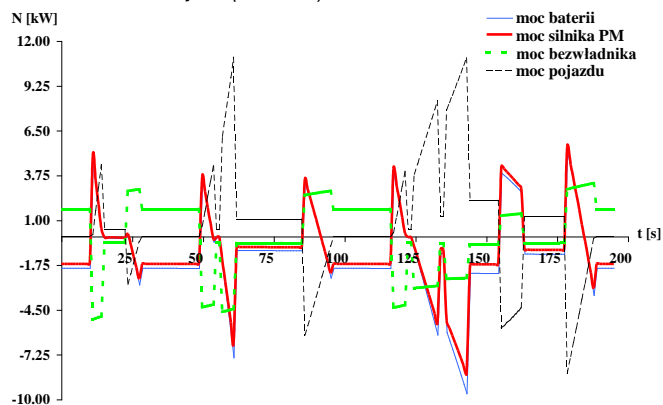
Wpływ na wyładowanie akumulatora elektrochemicznego mają pośrednio parametry mechaniczne i elektryczne komponentów układu napędowego. Na rysunku 8 przedstawiono zakresy zmian napięć i prądów analizowanych baterii w trakcie trwania cyklu pracy. Analizując pod względem energetycznym poszczególne komponenty układu napędowego konieczne jest wyznaczenie ich sprawności oraz mocy chwilowych, co zilustrowano na rysunku 9.



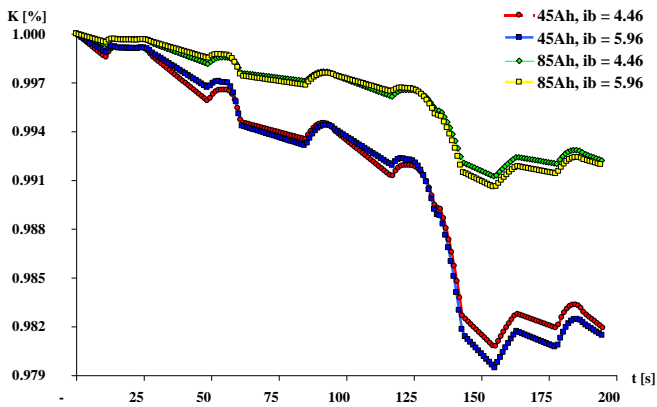
Rys. 7. Interpretacja graficzna zmian prędkości silnika PM i bezwałdnika w trakcie cyklu ($i_b = 4.46$, 45Ah)



Rys. 8. Interpretacja graficzna zmian prądu i napięcia baterii 45Ah w trakcie trwania cyklu ($i_b = 4.46$)



Rys. 9. Interpretacja graficzna zmian mocy w trakcie trwania cyklu ($i_b = 4.46$, 45Ah)



Rys. 10. Porównanie zmian współczynnika wyładowania baterii w trakcie trwania cyklu

WNIOSKI

- Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że:
- zastosowanie napędu dwuzródłowego z bezwładnikiem i baterią elektrochemiczną jako wtórnymi źródłami energii w samochodzie osobowym, który z założenia będzie stosowany w zamkniętych centrach handlowych, lotniskach itp. jest zasadne,
 - zmniejszenie maksymalnej prędkości bezwładnika poniżej 900 rad/s powoduje wysokie wyładowanie baterii elektrochemicznej po jednym cyklu jazdy, ze względu na zbyt szybkie wyładowanie bezwładnika i niską moc dyssypacji,
 - zwiększenie maksymalnej prędkości bezwładnika powyżej 1200 rad/s powoduje wysokie wyładowanie baterii elektrochemicznej po jednym cyklu jazdy, ze względu na dużą wartość momentu oporów własnych bezwładnika zależną od jego prędkości,
 - dla zakresu zmian prędkości obrotowej bezwładnika 11000 ... 5500 obr/min otrzymano największy zasięg jazdy pojazdu dwuzródłowego i najmniejsze wyładowanie baterii po jednym cyklu jazdy,
 - zwiększenie dwukrotne pojemności baterii (45Ah ... 85Ah) przy tym samym napięciu zasilania 72V i takim samym zakresie zmian prędkości bezwładnika powoduje 2-krotne zwiększenie zasięgu jazdy pojazdu, niestety jednocześnie zwiększa się masa baterii (6 mono – bloków) i objętość potrzebna do usytuowania ich w pojeździe,
 - zwiększenie przełożenia bazowego przekładni planetarnej z 4.46 do 5.96, przy tych samych przełożeniach pośrednich oraz przełożeniu przekładni głównej nie ma istotnego wpływu na procentowe wyładowanie baterii, a pośrednio na zakres zmian prądów i napięć baterii oraz silnika PM. W związku z tym wykonanie przekładni o mniejszym przełożeniu bazowym i spełniającym ww. wymagania jest zasadne.

BIBLIOGRAFIA

1. Balcerowski J.: Analiza wytrzymałościowa przekładni planetarnej o dwóch stopniach swobody, Warszawa, Politechnika Warszawska Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, IMRC 1990
2. Bramson E.: Sterowanie rozdziałem mocy w układzie dwuzródłowym zawierającym przekładnię obiegową i maszynę elektryczną, rozprawa doktorska pod kierunkiem prof. A. Szumanowskiego 1993
3. Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S., Kompozyty podstawy projektowania i wytwarzania, WPW, Warszawa 1993.

4. Krakowiak I., Dobór systemu inercyjnej akumulacji energii do warunków eksploatacji pojazdu miejskiego, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska 2001.
5. Krakowiak I., Kryteria doboru systemu inercyjnej akumulacji energii do napędu wielozródłowego, Zakopane 2007
6. Krasucki J.: Analiza energetyczna wielozródłowych zespołów napędowych metodą symulacji cyfrowej, rozprawa doktorska pod kierunkiem prof. A. Szumanowskiego 1993
7. Krzemiński – Freda H.: Łożyska toczne, PWN, Warszawa 1985
8. Remmel Jochen "Entwicklung von hybriden Fahrzeugeantrieben mit mechanischer Energiespeicherung". VDI, Reihe 12 Nr 41, 1981
9. Regar, Karl Nikolaus "Untersuchungen zur Optimierung der Betriebsparameter eines hybriden Busantriebes zwecks minimierung des Kraftstoffverbrauchs". VDI, Reihe 12 Nr 43, 1982
10. Szumanowski A.: Akumulacja energii w pojazdach, WKiŁ, Warszawa 1984
11. Szumanowski A.: Akumulacja energii w napędach wielozródłowych, WPW, Warszawa 1983
12. Szumanowski A., Bramson E.: Electric Vehicles Drive Control in Constant Power Mode, ISATA, Florence 1992
13. Szumanowski A., Brusaglino G., Analyses of the hybrid driver consisting of electrochemical battery and flywheel, EVS11, Florence 1992.
14. Szumanowski A. (pod redakcją), Układy napędowe z akumulacją energii, PWN, Warszawa 1990.
15. Tylikowski A., Kurnik W., Mechanika elementów laminowanych WPW, Warszawa 1997

**ANALYZE OF WORK
THE FLYWHEEL SYSTEM
ACCUMULATION ENERGY
IN THE TWO SOURCE DRIVE
IN THE CITY CAR**

Abstract

The paper describes the basic analyze of work the flywheel system accumulation energy in the city car of hybrid drive. There are selected ratios between components of hybrid drive and the planetary gear ratio. A full dynamic analysis was carried out by computer simulation methods, using original mathematical models of all the components of the drive system. There are determined parameters mechanical and electrical of components hybrid drive: speeds, torques, voltages, currents. The influence of the flywheel on the effectiveness of energy battery utilization in has been presented. The influence of the planetary gear ratio value, the energetic capacity of electric battery and the flywheel on the battery state of change has also been determined. The limitations that come from constructional and exploitation features of the vehicle and it is drive have been analysed in adjusting parameters of the model.

Autor:

dr inż. Ireneusz Krakowiak - Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich, Politechnika Warszawska, ikrak@simr.pw.edu.pl