

Rafał Setlak, Marcin Fice
Politechnika Śląska, Gliwice

MODELOWANIE ZASOBNIKÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ DLA POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH I HYBRYDOWYCH

MODELING OF ELECTRIC ENERGY STORAGES FOR ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES

Abstract: This paper presents the prepared mathematical models of electrochemical battery Ni-MH and supercapacitors used to simulate components of hybrid bus propulsion system. The model does not provide a self-discharge process of electric energy storage due to the nature of electricity receiver. Frequent changes of direction and power value make the process of self-discharge must not be taken into account.

Prepared models of electric energy storage devices are adapted to simulate specified speed profile by the static method, which has the advantage is speed simulation and ease of comparison between several variants of the propulsion system.

1. Wstęp

W artykule przedstawiono opracowane modele matematyczne akumulatora niklowo-wodorkowego (Ni-MH) oraz superkondensatora wykorzystane do symulacji elementów składowych hybrydowego układu napędowego autobusu. W modelach nie przewidziano występowania procesu samo rozładowania zasobnika (pominięto rezystancję równoległą) ze względu na specyfikę odbioru energii elektrycznej. Częste zmiany kierunku przepływu energii elektrycznej jak i częste zmiany wartości mocy pozwalają na pominięcie zjawiska samo rozładowania zasobników. Opracowane modele omawianych zasobników energii elektrycznej dostosowano do przeprowadzenia symulacji przejazdu zadanego profilu prędkości metodą quasi-statyczną, której zaletą jest szybkość symulacji i łatwość porównania kilku wariantów układu napędowego [2].

2. Model akumulatora Niklowo-Wodorkowego (Ni-MH)

Siła elektromotoryczna pojedynczego ogniwa jest różnicą potencjałów elektrod i zmienia się nieliniowo w funkcji stanu naładowania k . Rezystancja wewnętrzna jest nieliniowa i zależy od stanu naładowania, rezystancji elektrolitu oraz rezystancji elektrod. Pojemność akumulatora także zmienia się nieliniowo w zależności od prądu pobieranego z akumulatora. Zależność pomiędzy pojemnością akumulatora i obciążeniem opisuje równanie Peukerta [1]:

$$K_w = I_a(t)^{\sigma} t \quad (1)$$

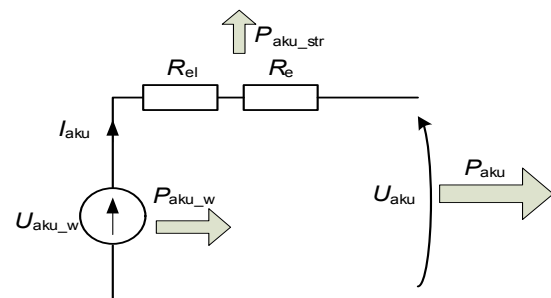
gdzie:

K_w – pojemność wyładowania akumulatora,

t – czas wyładowywania,

σ – stała Peukerta zależna od typu akumulatora.

Na rysunku 1 pokazano elektryczny schemat zastępczy akumulatora wykorzystany w modelu.



Rys. 1. Schemat zastępczy akumulatora do obliczeń energetycznych. R_{el} – rezystancja elektrolitu, R_e – rezystancja elektrod, U_{aku_w} – siła elektromotoryczna akumulatora, U_{aku} – napięcie na zaciskach akumulatora, I_{aku} – prąd akumulatora, P_{aku_w} – moc siły elektromotorycznej akumulatora, P_{aku_str} – moc strat na rezystancjach wewnętrznych, P_{aku} – moc wyjściowa akumulatora

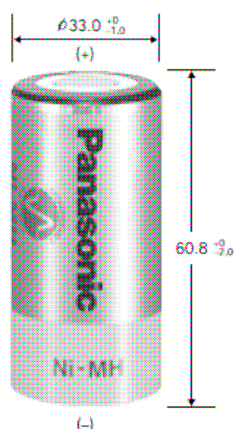
Zgodnie z rysunkiem 1 moc wyjściowa akumulatora podczas wyładowania:

$$P_{aku} = U_{aku_w}(k, t) \cdot I_{aku}(t) - I_{aku}(t)^2 \cdot (R_{el}(k, t) + R_e(k, t)), \quad (2)$$

i podczas ładowania:

$$P_{aku} = U_{aku_w}(k, t) \cdot I_{aku}(t) + I_{aku}(t)^2 \cdot (R_{el}(k, t) + R_e(k, t)) \quad (3)$$

Do wyznaczenia parametrów elektrycznych i energetycznych akumulatora wykorzystano metodę opartą jest na badaniach eksperymentalnych modelowanego akumulatora i wyznaczeniu charakterystyk ładowania i rozładowania [3][4]. Metoda ta pozwala na obliczenie chwilowego stanu naładowania akumulatora k oraz wartości napięcia źródła ogniwa $U_{\text{aku}_w}(k)$ i rezystancji wewnętrznej $R_{\text{aku}}(k)$.



Rys. 2. Ogniwo niklowo-wodorkowe HHR-650D/FT



Rys. 3. Bateria akumulatorów samochodu hybrydowego Honda Insight

Do celów symulacyjnych przyjęto typ ogniwa akumulatora Ni-MH Panasonic HHR-650D/FT (rys. 2) stosowanego m. in. w samochodach hybrydowych Honda [5]. Moduł baterii akumulatorów (rys. 3) z samochodu Honda Insight (rys. 4) znajduje się w laboratorium elektrotechniki samochodowej Zakładu Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie.

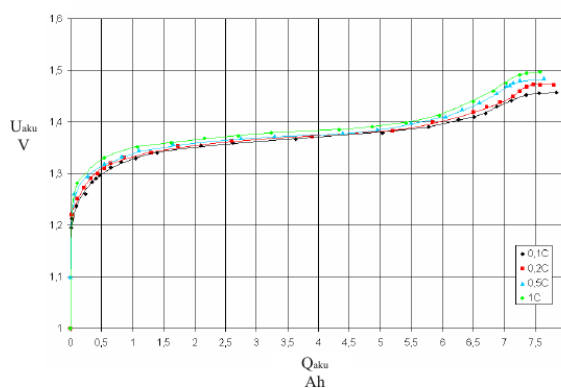
Tabela 1. Parametry ogniwa HHR-650D/FT

Napięcie znamionowe U_n	V	1,2
Pojemność znamionowa Q_n	mAh	6500

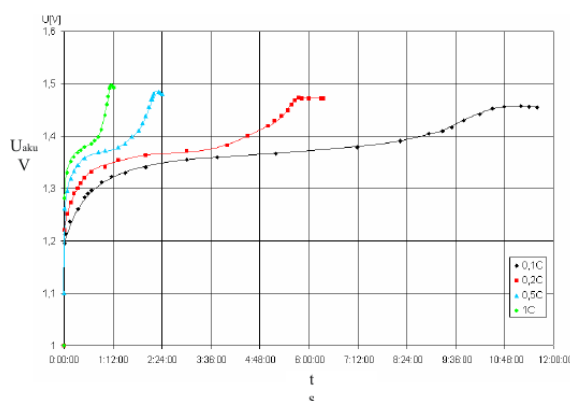


Rys. 4. Honda Insight

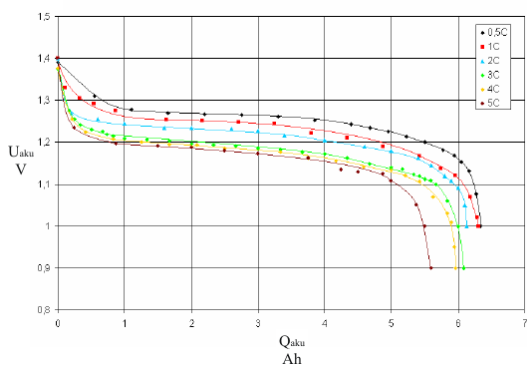
W ramach badań przeprowadzono pomiary laboratoryjne cykli ładowania i wyładowania ogniwa HHR-650D/FT. Na rysunkach 5 i 6 pokazano wykresy zmian napięcia ogniwa podczas ładowania, a na rysunkach 7 i 8 wykresy zmian napięcia podczas wyładowania prądem o stałej wartości.



Rys. 5. Wykresy zmian napięcia ogniwa HHR-650D/FT podczas ładowania dla prądów 0,1C, 0,2C, 0,5C, 1C w funkcji pojemności akumulatora



Rys. 6. Wykresy zmian napięcia ogniwa HHR-650D/FT podczas ładowania dla prądów 0,1C, 0,2C, 0,5C, 1C w funkcji czasu

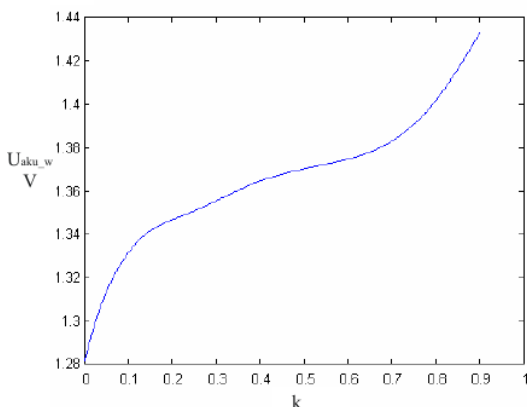


Rys. 7. Wykresy zmian napięcia akumulatora HHR-650D/FT dla prądów wyladowania 0,5C, 1C, 2C, 3C, 4C i 5C w funkcji pojemności akumulatora

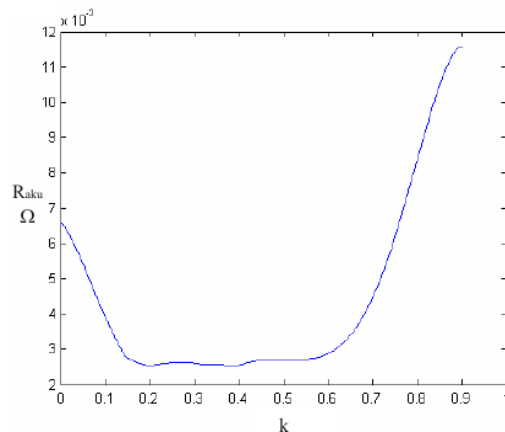


Rys. 8. Wykresy zmian napięcia akumulatora HHR-650D/FT dla prądów wyladowania 0,5C, 1C, 2C, 3C, 4C i 5C w funkcji czasu

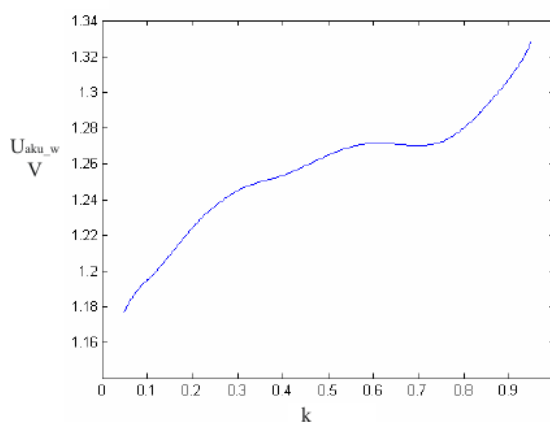
Na rysunkach 9 i 10 pokazano charakterystyki napięcia siły elektromotorycznej ogniwa oraz rezystancji wewnętrznej w funkcji stanu naładowania akumulatora k podczas ładowania, a na rysunkach 11 i 12 pokazano charakterystyki napięcia źródła ogniwa oraz rezystancji wewnętrznej w funkcji stanu naładowania akumulatora k podczas wyladowania.



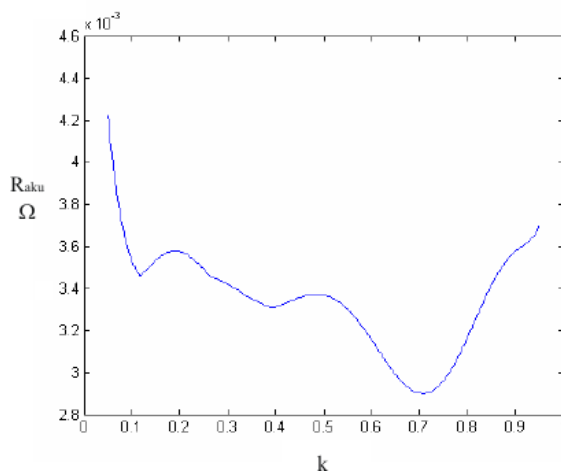
Rys. 9. Wyznaczone napięcie siły elektromotorycznej ogniwa podczas ładowania



Rys. 10. Wyznaczona rezystancja wewnętrzna ogniwa podczas ładowania



Rys. 11. Wyznaczone napięcie siły elektromotorycznej ogniwa podczas wyladowania



Rys. 12. Wyznaczona rezystancja wewnętrzna ogniwa podczas wyladowania

W tabeli 2 przedstawiono parametry energetyczne ogniwa HHR-650D/FT wyznaczone na podstawie badań laboratoryjnych.

Tabela 2. Parametry energetyczne akumulatora HHR-650D/FT

t_w	I_w	Q_w	U_{wsr}	p_{wsr}	q_{en}
min	A	Ah	V	W/kg	kJ/kg
115	3,3	6,32	1,254	38,67	2,66
58,2	6,5	6,31	1,243	75,51	2,64
30,85	12	6,13	1,225	137,38	2,53
18,25	20	6,08	1,199	224,11	2,45
14,3	25	5,96	1,182	276,16	2,37
11,2	30	5,6	1,166	326,92	2,19

Założenia do modelu:

- napięcie źródła ogniwa oraz rezystancja wewnętrzna zależą od stopnia naładowania akumulatora k ,
- przyjmuje się stałą temperaturę ogniwa,
- pomija się rezystancję połączeń ogniwa.

W opracowanym modelu ogniwa Ni-MH wartością wejściową jest zapotrzebowanie na moc, na wyjściu otrzymamy chwilową wartość napięcia U_{aku} , prądu I_{aku} oraz stanu naładowania akumulatora k .

Napięcie siły elektromotorycznej ogniwa aproksymowano wielomianem:

$$U_a(k) = -v_1 k^6 + v_2 k^5 - v_3 k^4 + v_4 k^3 - v_5 k^2 + v_6 k + v_7 \quad (4)$$

Rezystancja wewnętrzna aproksymowana wielomianem:

Tabela 3. Współczynniki wielomianów 4 i 5

Współczynnik	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
Wartość	2,32545	8,59986	11,25894	7,12966	2,64882	0,74089	1,12987
Współczynnik	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
Wartość	260.139	575.923	325.5909	75.5084	115.6633	32.6497	4.5068

$$R_{aku}(k) = -r_1 k^6 + r_2 k^5 - r_3 k^4 + r_4 k^3 - r_5 k^2 + r_6 k + r_7 \quad (5)$$

W tabeli 3 podane zostały współczynniki wielomianów $U_a(k)$ i $R_{aku}(k)$.

Prąd podczas ładowania wyrażono równaniem:

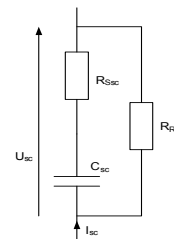
$$I_{aku}(t) = \frac{-U_a(k) + \sqrt{U_a(k)^2 + 4R_{aku}(k)P_{aku}(t)}}{2R_{aku}(k)} \quad (6)$$

natomiast prąd podczas wyładowania:

$$I_{aku}(t) = \frac{U_a(k) - \sqrt{U_a(k)^2 - 4R_{aku}(k)P_{aku}(t)}}{2R_{aku}(k)} \quad (7)$$

3. Model superkondensatora

Model baterii superkondensatorów oparto na elektrycznym schemacie zastępczym zbudowanym z podstawowych elementów elektrycznych, których wartości można wyznaczyć doświadczalnie [6][7][8]. Elektryczny schemat zastępczy wykorzystany do modelowania superkondensatora przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Zastępczy model elektryczny superkondensatora. C_{sc} – pojemność superkondensatora, R_{Ssc} – rezystancja szeregowa superkondensatora, R_{Psc} – rezystancja równoległa superkondensatora

Znajdujący się na schemacie (rys. 13) symbol kondensatora C_{sc} odpowiada pojemności superkondensatora i możliwej do zgromadzenia energii. Pojemność ta nie ma stałej wartości i można ją opisać jako zmienną w funkcji napięcia:

$$C_{sc}(u_{sc}(t)) = C_{sc0} + \kappa u_{sc}(t) \quad (8)$$

gdzie: C_{sc0} – pojemność superkondensatora przy napięciu równym 0 V, κ – współczynnik zależności pojemności superkondensatora od napięcia, u_{sc} – napięcie superkondensatora.

Prąd chwilowy superkondensatora można wyznaczyć z zależności:

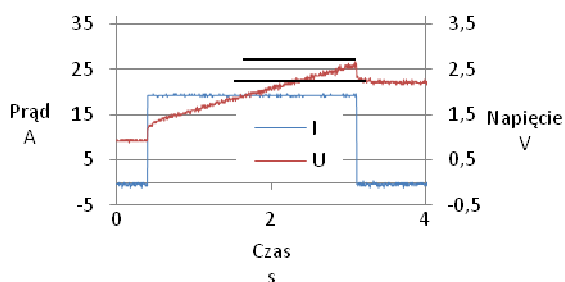
$$i_{sc}(t) = (C_{sc0} + 2\kappa u_{sc}(t)) \frac{du_{sc}(t)}{dt} \quad (9)$$



Rys. 14. Moduł superkondensatora BPAK0058 E015

Do celów symulacyjnych przyjęto parametry superkondensatora Maxwell BPAK0058 E015 (rys. 14) o parametrach znamionowych: pojemność znamionowa $C_{sc} = 58$ F, napięcie znamionowe $U_{scn} = 15$ V. Metodę wyznaczania współczynnika k oraz jego wartości zaczerpnięto z [9]. Przedstawiony i badany w [9] moduł superkondensatorów BMOD0350 produkcji Maxwell wykonany jest z pojedynczych ogniw identycznych jak w module BPAK0058. Wartość współczynnika κ wynosi $\kappa = 1,6837$ F/V, a pojemność $C_{sc0} = 42$ F.

Rezystancję szeregową superkondensatora wyznaczono mierząc wartość napięcia superkondensatora przy skokowej zmianie wartości prądu płynącego przez superkondensator (rys. 15). Średnia wartość rezystancji podczas serii prób pomiarowych wyniosła $R_{sc} = 19$ m Ω .



Rys. 15. Przebiegi prądu i napięcia podczas próby skokowej zmiany prądu ładowania modułu superkondensatorów BPAK0058, $\Delta I = 20$ A

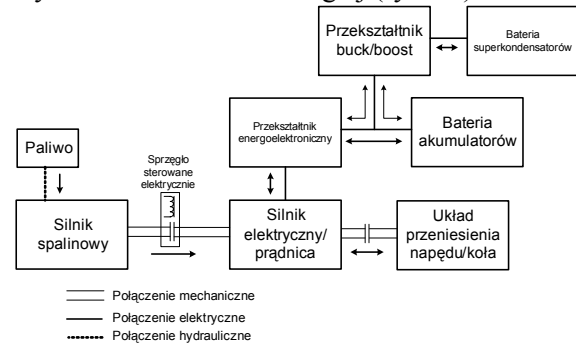
Stopień naładowania superkondensatora zapisano wyrażeniem:

$$k_{sc} = \frac{(C_0 + \frac{4}{3} \kappa U_{sc}) U_{sc}^2}{(C_0 + \frac{4}{3} \kappa U_{scmax}) U_{scmax}^2} \quad (10)$$

4. Badania symulacyjne

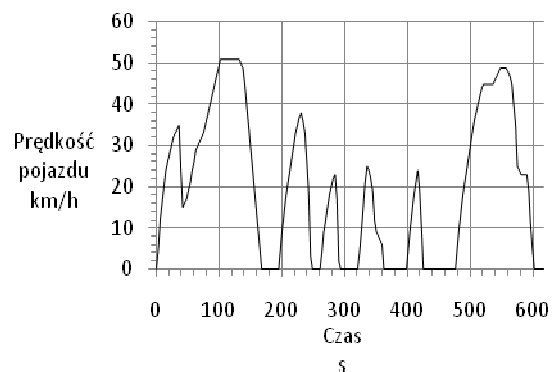
W ramach badań przeprowadzono symulacje współpracy omawianych zasobników energii

elektrycznej z hybrydowym układem napędowym o strukturze równoległej (rys. 16).

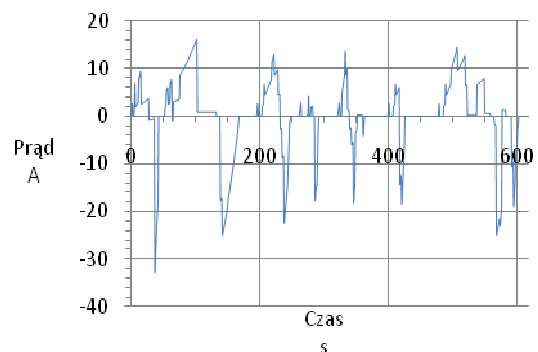


Rys. 16. Schemat struktury równoległego napędu hybrydowego w pojeździe miejskim

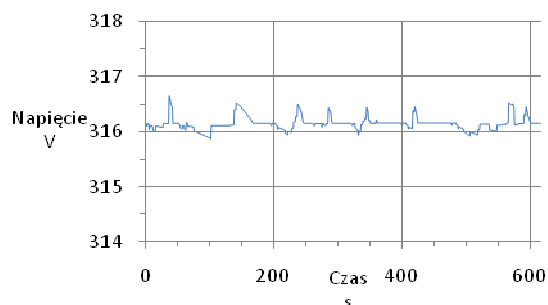
Symulacje zostały przeprowadzone metodą quasi-statyczną, dla której danymi wejściowymi są prędkość i przyspieszenie pojazdu, czyli zadany cykl jazdy (rys. 17). Na rysunkach 18, 19 i 20 pokazano odpowiednio przebiegi prądu, napięcia i stanu naładowania akumulatora podczas realizacji przejazdu zadanego profilu prędkości. Na rysunkach 21 i 22 pokazano odpowiednio przebiegi prądu i napięcia superkondensatora.



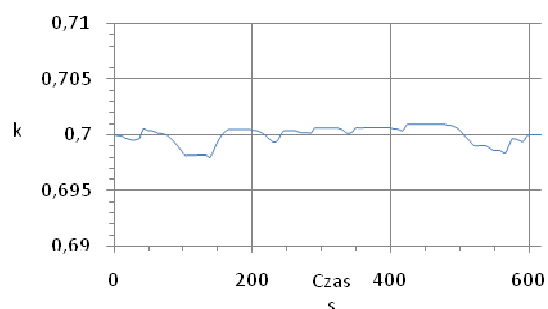
Rys. 17. Schemat struktury równoległego napędu hybrydowego w pojeździe miejskim



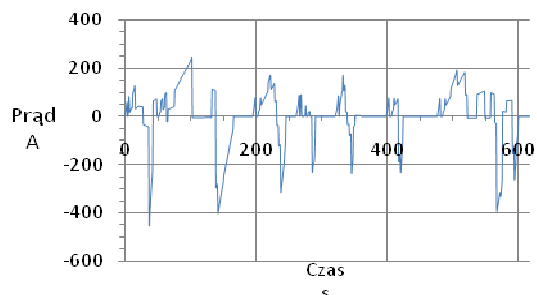
Rys. 18. Przebieg zmian prądu akumulatora podczas realizacji zadanego cyklu jazdy



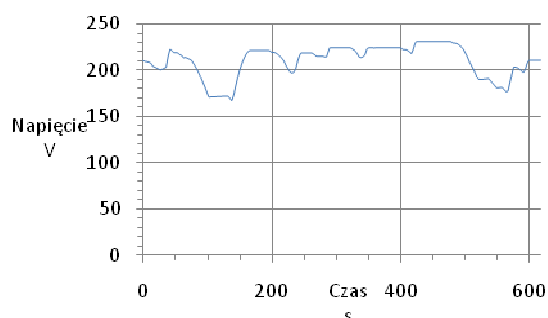
Rys. 19. Przebieg zmian napięcia akumulatora podczas realizacji zadanego cyklu jazdy



Rys. 20. Przebieg zmian stopnia naładowania akumulatora podczas symulacji przejazdu cyklu Silesia Bus



Rys. 21. Przebieg zmian prądu superkondensatora podczas realizacji zadanego cyklu jazdy



Rys. 22. Przebieg zmian napięcia superkondensatora podczas realizacji zadanego cyklu jazdy

Przedstawione powyżej zarejestrowane przebiegi są wynikiem symulacji przejazdu zadanego profilu prędkości przez autobus z napędem hybrydowym [10] dla szczególnego przypadku

stałego rozdziału mocy pomiędzy zasobniki energii elektrycznej oraz równowagi początkowego i końcowego stanu naładowania zasobników. Początkowy stan naładowania zasobników $k = 0,7$.

5. Podsumowanie

Przyjęte struktury modeli akumulatora i superkondensatora posłużyły do budowy modelu symulacyjnego napędu hybrydowego o strukturze szeregowej dla pojazdu miejskiego oraz umożliwiły przeprowadzenie badań symulacyjnych przejazdu zadanego profilu prędkości metodą tzw. quasi-statyczną. Modele te powstały na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych rzeczywistych modułów ogniw akumulatorów niklowo-wodorkowych oraz superkondensatorów.

Literatura

- [1]. Szumanowski A.: *Teoria samochodu. Akumulacja energii w pojazdach WKŁ*, Warszawa 1984.
- [2]. Kolmanovsky I., van Nieuwstadt M., Sun J.: *Optimization of Complex Powertrain Systems for Fuel Economy and Emissions* Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications Kohala Coast-Island of Hawaii, 1999.
- [3]. Szumanowski A.: *Hybrid electric vehicle drives design. Edition based on urban buses* Wydawnictwo ITE, Warszawa-Radom 2006.
- [4]. Szumanowski A., Chang Yuhua, Piórkowski P.: *Method of battery adjustment for hybrid drive by modeling and simulation* IEEE VPPC, Chicago 2005.
- [5]. Kelly K. J., Rajagopalan A.; *Benchmarking of OEM Hybrid Electric Vehicles at NREL* National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado 2001.
- [6]. Barrade P.: *Energy storage and applications with supercapacitors* ANAE, 2003.
- [7]. Johansson P., Andersson B.: *Comparison of simulation programs for supercapacitor modelling. Model creation and verification* Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg 2008.
- [8]. Tallner C., Lannetoft S.: *Batteries or supercapacitors as energy storage in HEV's?* Lund University, Lund 2005.
- [9]. Zygmanski M., Grzesik B.: *Moduł superkondensatorowy BMOD0350 jako element kondycjonera energii* Śląskie Wiadomości Elektryczne, Rok XV I, Nr 6' 2009(87).
- [10]. Fice M.: *Zarządzanie rozplywem energii w napędzie hybrydowym*, Praca doktorska, Gliwice 2010.