

Karol BEDNAREK*
Leszek KASPRZYK*
Emil HŁASKO*

MODELE FUNKCJONOWANIA ZASOBNIKÓW ENERGII STOSOWANYCH W UKŁADACH MOBILNYCH

W pracy zajęto się problematyką zasobników energii stosowanych w obiektach mobilnych. Szczególnie skupiono się na modelach matematycznych akumulatorów kwasowo-ołowiowych, litowo-jonowych oraz superkondensatorów. Przy wykorzystaniu modelu matematycznego akumulatora kwasowo-ołowiowego przeprowadzono symulację procesu jego rozładowania w programie MATLAB. Zaprezentowano charakterystyki parametrów użytkowych przykładowego akumulatora kwasowo-ołowiowego uzyskane w rezultacie zrealizowanych symulacji. Dokonano także porównania charakterystyk obciążenia stałoprądowego dwóch konkretnych akumulatorów, które uzyskano w wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych, z charakterystykami wykreślonymi na podstawie danych katalogowych producenta, otrzymanych w wyniku realizacji badań fizycznych.

SŁOWA KLUCZOWE: zasobniki energii, modele matematyczne, symulacje rozładowania akumulatora, zasilanie obiektów mobilnych

1. WPROWADZENIE

Urządzenia elektryczne, użytkowane przez człowieka w każdej sferze jego działalności – zarówno gospodarczej, jak i w życiu prywatnym, wymagają do swojego funkcjonowania dostarczenia energii. Najbardziej powszechnie wykorzystywaną formą energii jest energia elektryczna z uwagi na najkorzystniejsze sposoby jej wytwarzania, przesyłania, przetwarzania, a także gromadzenia. Jednym ze sposobów dostarczania energii elektrycznej do odbiorników jest zastosowanie sieci elektroenergetycznej. Znaczna część odbiorników energii nie może być jednak zasilana sieciowo, szczególnie ma to miejsce w przypadku urządzeń mobilnych. W tych sytuacjach stosuje się różnego rodzaju zasobniki (magazyny) energii.

W części rozwiązań układów mobilnych, np. w pojazdach elektrycznych, z uwagi na dynamikę zmian przepływów energii powstaje potrzeba określania

* Politechnika Poznańska.

ilości energii, jaką można jeszcze wykorzystać, a w układach rekuperacyjnych (z odzyskiem) poziomu energii możliwej do zmagazynowania, w celu osiągnięcia właściwego, racjonalnego zarządzania gromadzoną energią. Realizacja wielowariantowych badań przepływów energii między zasobnikami a odbiornikami na układach fizycznych jest bardzo kosztowna, stąd rodzi się zapotrzebowanie na opracowanie modeli matematycznych rozpatrywanych systemów i stworzenie możliwości przeprowadzania precyzyjnych symulacji komputerowych, pozwalających dokonywać szerokich analiz funkcjonalnych rozważanych układów, przy uwzględnieniu z góry narzucanych kryteriów pracy zarówno zasobników, jak też odbiorników energii.

W pracy przedstawiono modele matematyczne akumulatora kwasowo-ołowiowego, litowo-jonowego i superkondensatora. Na podstawie modelu akumulatora kwasowo-ołowiowego zasymulowano proces jego rozładowania w programie MATLAB. Dokonano porównania charakterystyk stałoprądowych stworzonych na podstawie danych producenta wybranych akumulatorów z charakterystykami otrzymanymi w wyniku symulacji.

2. MAGAZYNOWANIE ENERGII

Energia może być magazynowana w zasobnikach energii w postaci energii elektrycznej, chemicznej bądź mechanicznej. Do najczęściej wykorzystywanych zasobników energii należą: akumulatory (wtórne ogniwa elektrochemiczne), superkondensatory (gromadzenie energii w polu elektrycznym), ogniwa paliwowe (zachodzi w nich elektrochemiczna reakcja utleniania dostarczanego paliwa), kinetyczne zasobniki energii (układy z masami wirującymi), systemy pneumatyczne (ze sprężonym powietrzem), nadprzewodnikowe zasobniki energii (gromadzenie energii w polu magnetycznym) oraz elektrownie szczytowo-pompowe (magazynowanie dużych energii w postaci energii potencjalnej wody). Szersze informacje na temat poszczególnych zasobników energii zamieszczono w pracach [1–5].

Zasobniki energii (mając różną naturę) z uwagi na swe parametry użytkowe dają różne możliwości wykorzystania w układach zasilania określonych obiektów. Możliwości ich zastosowań w dużej mierze zależą od wartości gromadzonych energii (funkcjonowanie systemów elektroenergetycznych a np. przenośnego sprzętu RTV), od sposobu ich użytkowania (układy stacjonarne a mobilne), od oczekiwań w zakresie dynamiki wymiany ładunku (poziomy prądów ładowania i rozładowania), występujących strat i osiągniętych sprawności, ale także od czynników ekologicznych (wpływu na środowisko).

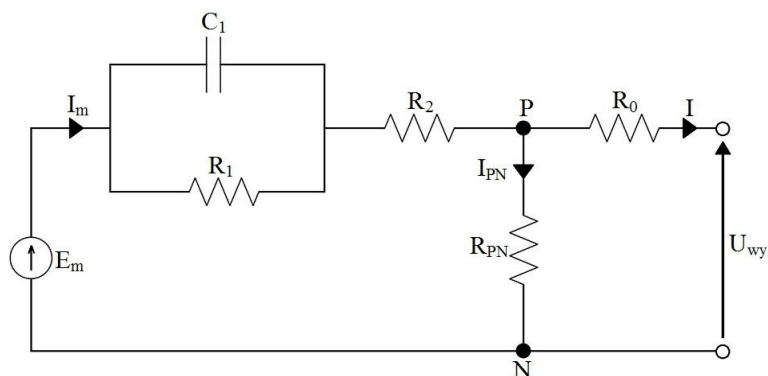
W pracy rozpatrywane są zasobniki energii wykorzystywane w układach mobilnych. Szczególnie analizie poddawane są układy, w których intensywnie zmienia się dynamika poboru oraz gromadzenia energii. Typowym przykładem

takich warunków funkcjonowania źródła i odbiornika są układy zasilania systemów napędowych pojazdów elektrycznych bądź hybrydowych, w których realizowany jest odzysk energii podczas hamowania pojazdu. Przy zarządzaniu przepływami energii między źródłami zasilania a odbiornikami niezwykle istotna jest bieżąca znajomość ilości energii, jaką można pobrać (zużyć) oraz możliwej jeszcze do zmagazynowania. Realizacja wielowariantowych badań fizycznych przepływów energii w takich układach związana jest z wysokimi kosztami inwestycyjnymi oraz eksploatacyjnymi i bardzo dużymi nakładami pracy. Powstaje zatem potrzeba stworzenia modeli matematycznych rozważanych układów i precyzyjnego zamodelowania ich funkcjonowania [2, 3, 5–11]. Te matematyczno-informatyczne modele niezbędne są do fizycznej realizacji zarządzania przepływami energii między zasobnikami (szczególnie pracującymi hybrydowo) a systemami odbiorczymi. Z tego względu autorzy w dalszej części pracy przedstawili modele matematyczne wybranych zasobników energii oraz ich implementację informatyczną.

3. MODELE MATEMATYCZNE ZASOBNIKÓW ENERGII

3.1. Model matematyczny akumulatora kwasowo-ołowiowego

Na rys. 1 przedstawiono schemat zastępczy ogniwa kwasowo-ołowiowego, który składa się z obwodu głównego oraz obwodu pasożytniczego. Obwód główny zbudowany jest ze źródła napięcia E_m , kondensatora C_1 oraz rezystorów R_1 i R_2 , natomiast obwód pasożytniczy stanowi gałąź poprzeczna z rezystancją R_{PN} . Podczas gdy ogniwo jest w pełni naładowane, przez gałąź pasożytniczą płynie prąd I_{PN} o znikomej wartości. W związku z tym w procesie modelowania rozładowania akumulatora kwasowo-ołowiowego gałąź tę można pominąć, podobnie jak rezystancję R_1 , której wartość także jest niewielka [4, 6].

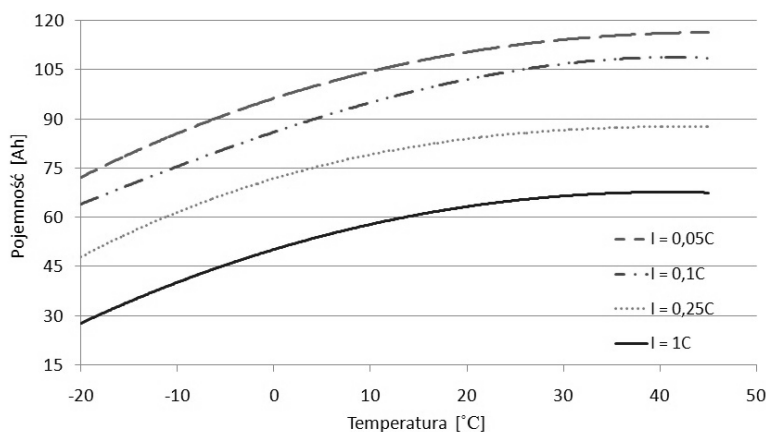


Rys. 1. Schemat zastępczy ogniwa kwasowo-ołowiowego

Pojemność akumulatora jest funkcją natężenia prądu I oraz temperatury elektrolitu T_e i opisana jest wzorem [4, 7]:

$$C(I, T_e) = \frac{K_C C_0 \left(1 + \frac{T_e}{-T_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_C - 1) \left(\frac{I}{I_n}\right)^\delta} \quad (1)$$

gdzie: I_n – nominalna wartość prądu [A], T_f – temperatura zamarzania elektrolitu [°C]. Współczynniki K_C , C_0 , ε , δ niezbędne do określenia pojemności ogniwa zależą od temperatury otoczenia, a także od natężenia pobieranego prądu i wyznaczane są na podstawie charakterystyk przedstawionych na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka zmian pojemności akumulatora w zależności od temperatury otoczenia oraz prądów rozładowania [6]

Współczynnik ε można także obliczyć na podstawie współczynnika temperaturowego α , korzystając ze wzoru [4, 7]:

$$\varepsilon = \alpha (T_n - T_f) \quad (2)$$

gdzie T_n – temperatura znamionowa [°C].

Temperatura elektrolitu T_e zmienia się w czasie i jest obliczana na podstawie zależności [4, 6]:

$$T_e(t) = \int_0^{t_w} \frac{1}{C_t} \left(P_s - \frac{T_e - T_a}{R_t} \right) dt \quad (3)$$

gdzie: T_a – temperatura otoczenia [°C], P_s – moc strat na rezystancjach R_0 i R_2 [W], C_t – pojemność temperaturowa [Wh/°C], R_t – opór cieplny [°C/W], t_w – czas wymiany ładunku (ładowania lub rozładowania) [s].

Stan naładowania *SOC* (ang. State Of Charge) oraz poziom naładowania *DOC* (ang. Depth Of Charge) akumulatora wyznacza się ze wzorów [4,8]:

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0, T_e)} \quad (4)$$

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, T_e)} \quad (5)$$

w których: I_{avg} – średni prąd rozładowania akumulatora [A], Q_e – ładunek zgromadzony lub pobierany z ogniwa, określany na podstawie zależności [4, 6]:

$$Q_e = \int_0^{t_w} I_m(t) dt \quad (6)$$

gdzie: I_m – natężenie prądu płynącego w obwodzie głównym ogniwa [A].

Prąd I_{PN} płynący przez gałąź pasożytniczą zależy od temperatury elektrolitu, temperatury jego zamarzania, napięcia U_{PN} na tej gałęzi oraz stałych U_{P0} , G_{P0} , A_p wyznaczanych na podstawie badań. Wyraża się on wzorem [4, 6]:

$$I_{PN} = U_{PN} G_{P0} \exp\left(\frac{U_{PN}}{U_{P0}} + A_p \left(1 + \frac{T_e}{-T_f}\right)\right) \quad (7)$$

Wartości elementów wchodzących w skład modelu, zależne od temperatury elektrolitu oraz stanu naładowania akumulatora, obliczyć można stosując wyrażenia [4, 8]:

$$E_m = E_{m0} - K_E (273 + T_e)(1 - SOC) \quad (8)$$

$$R_0 = R_{00}(1 + A_0(1 - SOC)) \quad (9)$$

$$R_1 = -R_{10} \ln(SOC) \quad (10)$$

$$C_1 = \frac{\tau}{R_1} \quad (11)$$

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp(A_{21}(1 - SOC))}{1 + \exp\left(\frac{A_{22}I_m}{I_n}\right)} \quad (12)$$

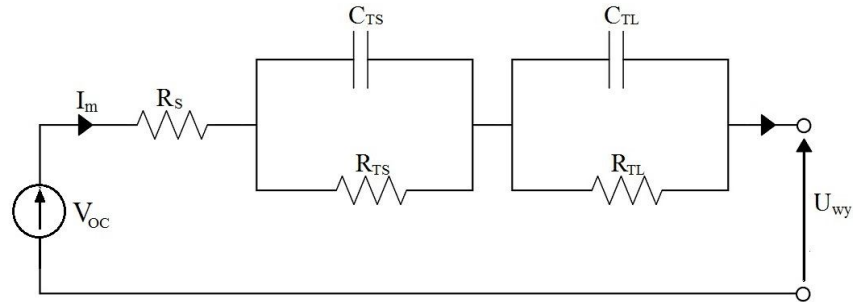
W powyższych wzorach: τ – stała czasowa obwodu [s], E_{m0} , K_E , R_{00} , A_0 , R_{10} , R_{20} , A_{21} , A_{22} są stałymi, określonymi na podstawie badań (przykładowe wartości zamieszczono w pracach [6, 9]). Po wyznaczeniu wartości elementów modelu obliczyć można napięcie na wyjściu na podstawie wzoru [4, 6]:

$$U_{wy} = E_m - I \cdot Z \quad (13)$$

gdzie: I – prąd pobrany lub dostarczony do ogniwa [A], Z – impedancja zastępcza ogniwa.

3.2. Model matematyczny akumulatora litowo-jonowego

Model ogniwa litowo-jonowego składa się ze źródła napięcia V_{OC} , rezystancji R_S , połączonych równolegle rezystancji R_{TS} i pojemności C_{TS} oraz połączonych równolegle rezystancji R_{TL} i pojemności C_{TL} [4, 6]. Schemat zastępczy ogniwa przedstawiony został na rys. 3.



Rys. 3. Schemat zastępczy ogniwa litowo-jonowego

Wartości wszystkich elementów modelu zależą od stanu naładowania akumulatora SOC oraz parametrów określanych na podstawie danych katalogowych producenta. Są one wyznaczone za pomocą wzorów [4, 6]:

$$V_{OC} = V_{OC0} + V_{OC1} \cdot e^{A_1 \cdot SOC} + V_{OC2} \cdot SOC + V_{OC3} \cdot SOC^2 + V_{OC4} \cdot SOC^3 \quad (14)$$

$$R_S = R_{S0} + R_{S1} \cdot e^{A_2 \cdot SOC} \quad (15)$$

$$R_{TS} = R_{TS0} + R_{TS1} \cdot e^{A_3 \cdot SOC} \quad (16)$$

$$R_{TL} = R_{TL0} + R_{TL1} \cdot e^{A_4 \cdot SOC} \quad (17)$$

$$C_{TS} = C_{TS0} + C_{TS1} \cdot e^{A_5 \cdot SOC} \quad (18)$$

$$C_{TL} = C_{TL0} + C_{TL1} \cdot e^{A_6 \cdot SOC} \quad (19)$$

Szczegóły dotyczące przedstawionego modelu matematycznego zawarto w pracy [6].

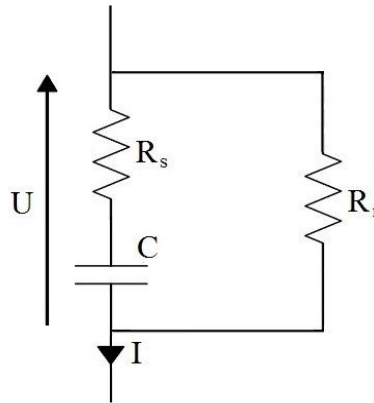
3.3. Model matematyczny superkondensatora

Schemat zastępczy superkondensatora zbudowany z rezystancji szeregowej R_s , rezystancji równoległej R_r oraz pojemności C został przedstawiony na rys. 4.

Pojemność superkondensatora jest funkcją napięcia, które zmienia się w czasie i jest obliczana za pomocą wzoru [4, 10]:

$$C(u(t)) = C_0 + k_k \cdot U(t) \quad (20)$$

w którym: C_0 – pojemność przy napięciu 0 V [F], U – napięcie [V], k_k – współczynnik pojemności w funkcji napięcia.



Rys. 4. Schemat zastępczy superkondensatora

Współczynnik pojemności k_k wyznacza się na podstawie zależności [4, 10]:

$$k_k = \frac{\left(C_0 + \frac{4}{3}k_k U\right)U^2}{\left(C_0 + \frac{4}{3}k_k U_{\max}\right)U_{\max}^2} \quad (21)$$

Szczegółowe informacje związane z przedstawionym modelem można znaleźć w pracach [10, 11].

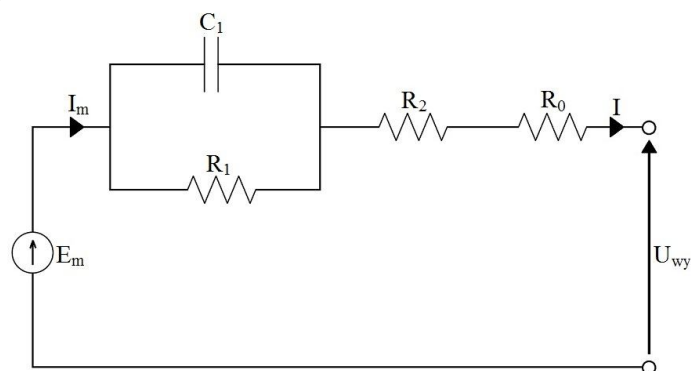
4. SYMULACJA KOMPUTEROWA ROZŁADOWANIA AKUMULATORA KWASOWO-OŁOWIOWEGO W ŚRODOWISKU MATLAB

4.1. Opis symulacji

Autorzy dokonali w programie MATLAB symulacji rozładowania akumulatora kwasowo-ołowiowego. Do tego celu wykorzystano model przedstawiony w rozdziale 3.1, który został uproszczony poprzez pominięcie gałęzi poprzecznej (pasożytniczej). Wpływ tej gałęzi na uzyskiwane wyniki podczas procesu rozładowywania akumulatora jest niewielki ze względu na niską wartość płynącego w niej prądu (rzędu nA). W programie zaimplementowano wyrażenia opisujące poszczególne elementy wchodzące w skład obwodu przedstawionego na rys. 5.

Pierwszym krokiem było wyznaczenie wartości wszystkich elementów modelu w stanie pełnego naładowania akumulatora. Następnie analizowane wartości liczone cyklicznie, uwzględniając fakt zmiany stanu naładowania akumulatora podczas jego obciążenia. Przeprowadzona symulacja pozwoliła zaobserwo-

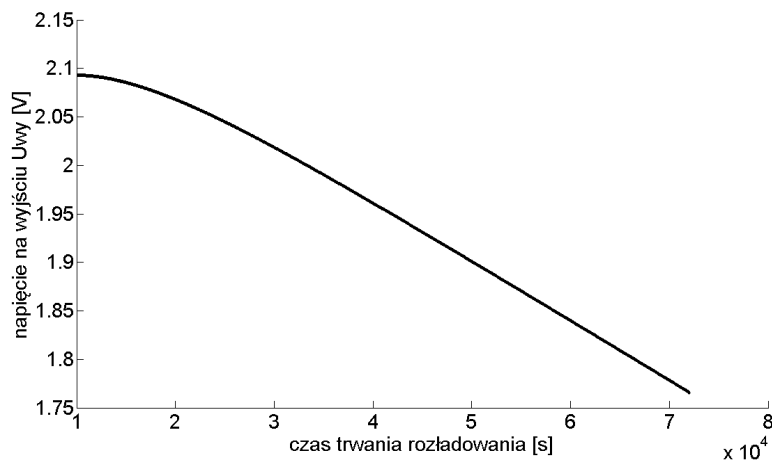
wać zmianę pojemności, napięcia czy stanu naładowania akumulatora w czasie procesu jego rozładowywania.



Rys. 5. Schemat akumulatora kwasowo-ołowiowego wykorzystany do symulacji

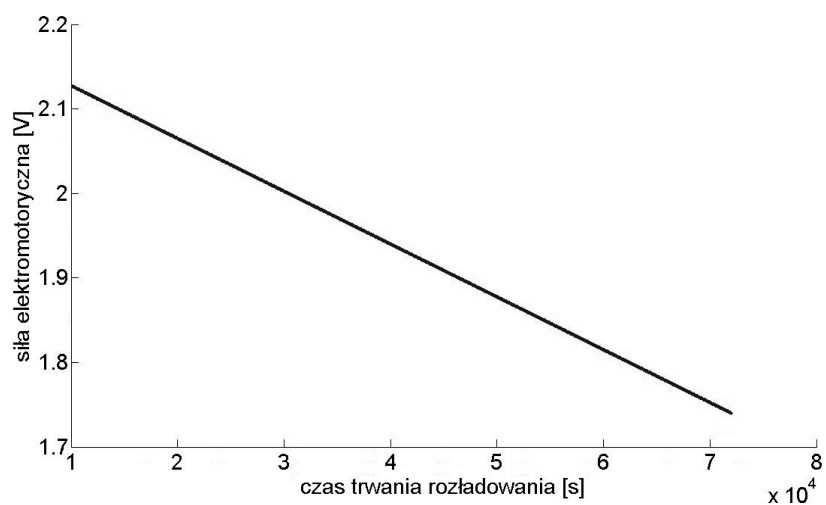
4.2. Wyniki symulacji

Na rys. 6 przedstawiona została charakterystyka rozładowania pojedynczego ogniwa akumulatora kwasowo-ołowiowego o pojemności 84 Ah, otrzymana w wyniku symulacji dla obciążenia stałoprądowego o wartości $I = 4,2$ A. W ciągu 20 godzin działania obciążenia wartość napięcia na pojedynczym ogniwie akumulatora kwasowo-ołowiowego spada nieliniowo od wartości ok. 2,10 V do ok. 1,75 V. Nieliniowy charakter przebiegu rozładowania wynika z faktu, iż wartości elementów wchodzących w skład obwodu zastępczego modelu również zmieniają się w sposób nieliniowy.

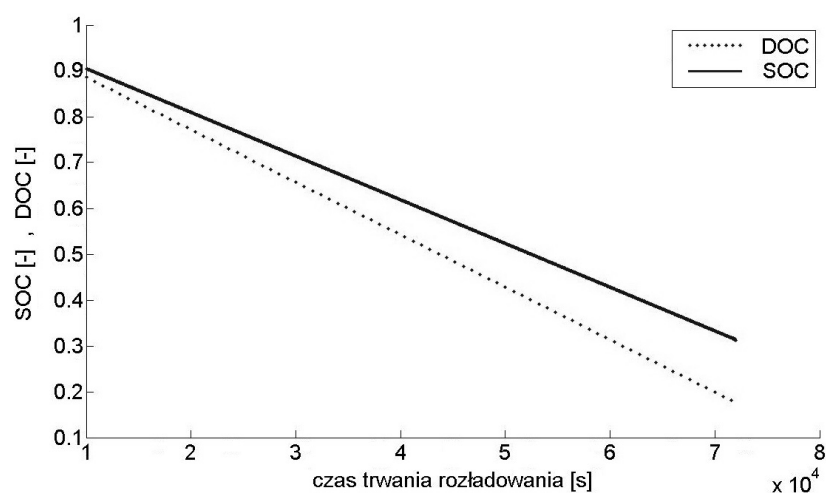


Rys. 6. Charakterystyka rozładowania akumulatora kwasowo-ołowiowego

Charakterystykę zmian siły elektromotorycznej E_m akumulatora w czasie rozładowania przedstawiono na rys. 7. Wartość siły elektromotorycznej zależy od stanu naładowania akumulatora SOC oraz temperatury elektrolitu i wraz ze wzrostem czasu działania obciążenia stałoprądowego spada ona w sposób liniowy. Charakter liniowy mają również przebiegi stanu naładowania (SOC) oraz poziomu naładowania (DOC) akumulatora w funkcji czasu (rys. 8) i zależne są od ilości ładunku pobranego z ogniwa oraz jego pojemności.



Rys. 7. Zmiana siły elektromotorycznej akumulatora kwasowo-ołowiowego w czasie



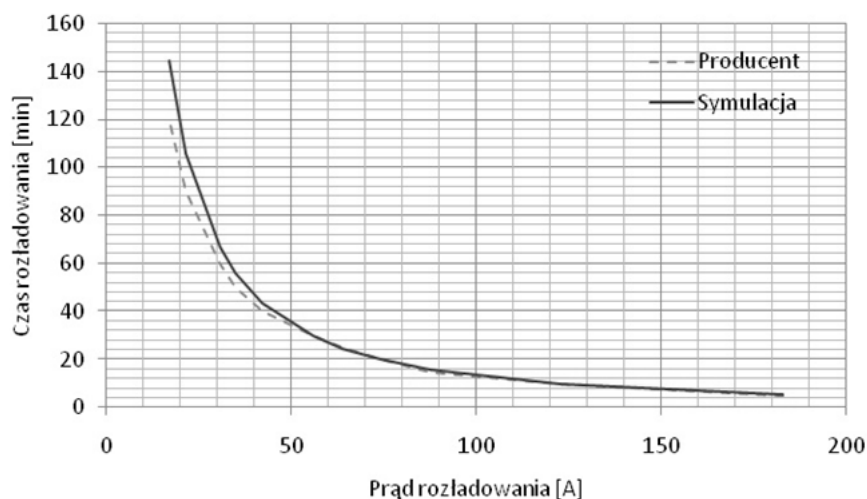
Rys. 8. Charakterystyka zmian stanu naładowania akumulatora SOC oraz poziomu naładowania akumulatora DOC w czasie

4.3. Porównanie charakterystyk zasymulowanych z podawanymi przez producenta akumulatorów

Bazując na danych katalogowych akumulatora kwasowo-ołowiowego EUROPOWER EV 50-12, którego podstawowe parametry zamieszczone zostały w tabeli 1, wykreślono jego charakterystykę stałoprądową rozładowania [12]. Autorzy przeprowadzili symulację stałoprądowego procesu rozładowania rozważanego akumulatora w programie MATLAB. Wykreśloną na podstawie symulacji charakterystykę porównano z wykresem uzyskanym przez producenta na drodze realizacji badań fizycznych. Oba przebiegi zestawiono na rys. 9.

Tabela 1. Dane znamionowe akumulatora EV 50-12 [12]

Parametr		Wartość
Napięcie znamionowe		12 V
Pojemność		48 Ah
Ilość ogniw		6
Technologia		AGM
Rezystancja wew.		< 5 mΩ
Prąd ładowania		4,8 A (max 14,4 A)
zakres temperatur pracy	ładowanie	0°C ÷ 40°C
	rozładowanie	-20°C ÷ 50°C
masa		16,5 kg



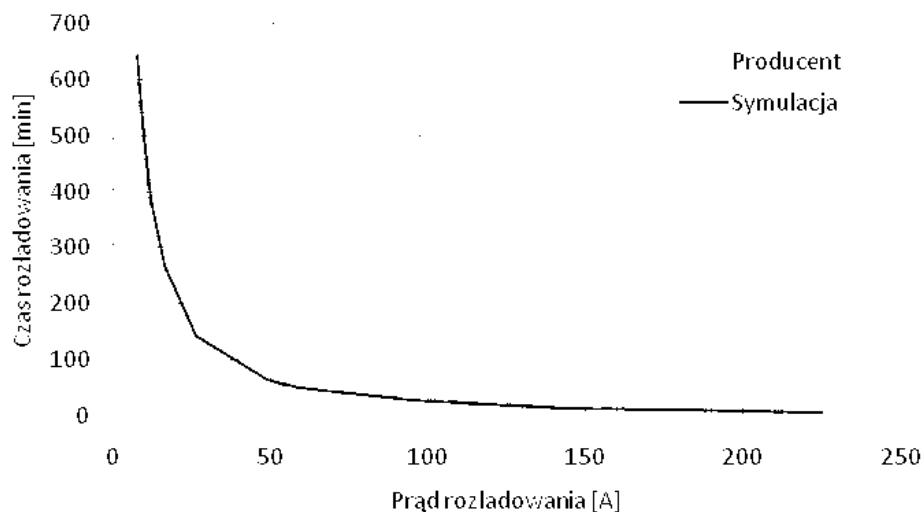
Rys. 9. Porównanie charakterystyk stałoprądowych uzyskanych na podstawie danych producenta akumulatora EUROPOWER EV 50-12 z charakterystykami otrzymanymi w wyniku symulacji

Charakterystykę stałoprądową rozładowania wykreślono również dla akumulatora EUROPOWER EPL 85-12, którego dane techniczne zamieszczono w tabeli 2 [12]. Podobnie jak w przypadku pierwszego akumulatora autorzy przeprowadzili symulację, na podstawie której określono czasy rozładowania dla podanych przez producenta prądów rozładowania. Otrzymaną w ten sposób charakterystykę stałoprądową rozładowania porównano z charakterystyką uzyskaną z danych producenta, co przedstawiono na rys. 10.

Wyniki zrealizowanych symulacji są zbliżone do podawanych danych technicznych, co dowodzi, że stworzony przez autorów model jest prawidłowy.

Tabela 2. Dane znamionowe akumulatora EPL 85-12 [12]

Parametr		Wartość
Napięcie znamionowe		12 V
Pojemność		85 Ah
Ilość ogniw		6
Technologia		AGM
Rezystancja wew.		< 5 mΩ
Prąd ładowania		8,5 A (max 25,5 A)
Zakres temperatur pracy	ładowanie	0°C ÷ 40°C
	rozładowanie	-20°C ÷ 50°C
Masa		31,2 kg



Rys. 10. Porównanie charakterystyk stałoprądowych uzyskanych na podstawie danych producenta akumulatora EUROPOWER EPL 85-12 z charakterystykami otrzymanymi w wyniku symulacji

5. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono modele matematyczne wybranych zasobników energii, a mianowicie akumulatora kwasowo-ołowiowego, litowo-jonowego oraz superkondensatora. Na tej podstawie przeprowadzono symulację komputerową (w środowisku MATLAB) procesu rozładowania akumulatora kwasowo-ołowiowego. W celu weryfikacji sporządzonego modelu obliczeniowego dokonano porównania charakterystyk stałoprądowego rozładowania określonych akumulatorów, wykreślonych na podstawie parametrów technicznych podawanych przez producenta (uzyskiwanych w procesie badań obiektów fizycznych) z osiągniętymi w wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych. Zbieżność zestawionych rezultatów pomiarów i symulacji komputerowych jest zadowalająca.

Od precyzji sporządzonych modeli zależy dokładność uzyskiwanych obliczeń parametrów funkcjonalnych zasobników, prawidłowość symulacji procesów ładowania i rozładowania magazynów energii, a w konsekwencji jakość możliwości zarządzania przepływami energii między źródłami zasilania a odbiornikami.

LITERATURA

- [1] Bednarek K., Kasprzyk L., Functional analyses and application and discussion regarding energy storages in electric systems, in: Computer Applications in Electrical Engineering, edited by R. Nawrowski, Publishing House of Poznan University of Technology, Poznan 2012, p. 228-243.
- [2] Kasprzyk L., Bednarek K., Elektromagnetyzm a zagadnienia gromadzenia energii, Przegląd Elektrotechniczny, No 12 (90), 2014, s. 221-224.
- [3] Kasprzyk L., Bednarek K., Dobór hybrydowego zasobnika energii do pojazdu elektrycznego, Przegląd Elektrotechniczny, No 12 (91), 2015, s. 129-132.
- [4] Hłasko E., Zasobniki energii w pojazdach elektrycznych, pr. dypl. inżynierska, Poznań, 2016.
- [5] Kasprzyk L., Pojazdy elektryczne a problematyka doboru magazynu energii elektrycznej w aspekcie ochrony środowiska, Europejski Wymiar Bezpieczeństwa Energetycznego a Ochrona Środowiska, 2015, p. 691-708.
- [6] Moćko W., Szymańska M., Wojciechowski A., Opracowanie i kalibracja modelu matematycznego akumulatorów trakcyjnych przeznaczonych do samochodu elektrycznego, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 2, 2013.
- [7] Barsali S., Ceraolo M., Dynamical Models of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues, IEE Transactions on Energy Conversion, 17/1, 2002.
- [8] Planklang B., Pornharutai P., Mathematical Model and Experiment of Temperature Effect on Discharge of Lead-Acid Battery for PV Systems in Tropical Area, Energy and Power Engineering, 2013, 5, str. 43-49.
- [9] Ceraolo M., New Dynamical Model of Lead-Acid Batteries, IEE Transactions on Power Systems, 15/4, listopad 2000.

- [10] Maciejczyk A., Pawelski Z., Model numeryczny układu napędowego autobusu miejskiego zasilanego z dwóch źródeł energii elektrycznej. Modele matematyczne głównych podzespołów. Część 2, Logistyka, marzec 2015.
- [11] Setlak R., Fice M., Modelowanie zasobników energii elektrycznej dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 90/2011.
- [12] http://www.emu.com.pl/?pl_produkty,20#page, [24.01.2016].

OPERATING MODELS OF ENERGY STORAGE UNITS USED IN MOBILE SYSTEMS

The paper deals with the problems of the energy storage units used in mobile systems. Particular attention is paid to mathematical models of the lead-acid and lithium-ion batteries as well as supercapacitors. The mathematical model of a lead-acid battery enabled simulation of the battery discharging process with the help of the MATLAB software. Based on these simulations the characteristics of operating parameters of an example of a lead-acid battery is presented. Moreover, the DC-current load characteristics obtained in result of the computer simulations for two specific batteries were compared to the ones plotted based on the manufacturer's catalogue data obtained from the physical tests.

(Received: 21. 02. 2016, revised: 4. 03. 2016)