

Symulacja pracy akumulatorów kwasowo-ołowiowych

Streszczenie. W artykule zaprezentowano zagadnienia związane z modelowaniem pracy zasobników energii elektrycznej na przykładzie elektrochemicznych źródeł energii, jakimi są akumulatory kwasowo-ołowiowe. Przedstawiono uzasadnienie konieczności analizy pracy zasobników energii, szczególnie omówiono model matematyczny ogniwa kwasowo-ołowiowego oraz zaprezentowano przykładową analizę zachowania się takiego ogniwa podczas jazdy samochodem elektrycznym.

Abstract. The paper presents issues related to the modeling work of energy storages on the example of electrochemical energy sources which are lead-acid batteries. Substantiation for the necessity of work analysis of energy storages was presented. Moreover, the mathematical model of lead-acid cell was discussed in detail as well as a sample analysis of the behavior of such cell during driving an electric car was considered. (**Work simulation of lead-acid batteries**).

Słowa kluczowe: model matematyczny, akumulator, pojazdy elektryczne, Matlab Simulink.

Keywords: mathematical model, battery, electric vehicles, Matlab Simulink.

Wstęp

Współczesny człowiek bardzo silnie uzależnił się od wielu osiągnięć cywilizacyjno-technicznych, bez których wręcz nie wyobraża sobie obecnie egzystencji. Osiągnięciami takimi są zastosowania elektryczności we wszelkich obszarach działalności człowieka, dostępność bieżącej wody, stan (komfort) obiektów mieszkaniowych i możliwości ogrzewania pomieszczeń, ale także technologie informacyjne oraz możliwości transportowe. Samochody do niedawna były dla ludzi luksusem. Teraz stały się raczej nieodzownym środkiem pracy i egzystencji. Z uwagi na powszechność wykorzystywania pojazdów powstają problemy związane z ochroną środowiska, jak również z zasobami energetycznymi. Z tych względów poszukiwane są alternatywne w stosunku do napędów spalinowych źródła zasilania pojazdów. Najbardziej popularne stają się koncepcje samochodów hybrydowych (HV) oraz elektrycznych (EV). Implikuje to zatem potrzeby wytworzenia oraz właściwego wykorzystania zasobników energii, które umożliwiłyby długotrwałe zasilanie dużych obiektów mobilnych, jakimi są pojazdy.

Podczas analiz funkcjonalnych różnych rozwiązań określonych obiektów opłaca się wykorzystywać ich modele matematyczno-informatyczne w celu osiągnięcia możliwości realizacji szerokiej, wielowariantowych rozwiązań, związanych z ich rozwiązaniami konstrukcyjnymi i osiąganymi parametrami pracy. Jednocześnie eliminuje się wówczas w znacznym stopniu potrzeby budowy kolejnych modeli i prototypów, a w efekcie zmniejsza koszty inwestycyjne i eksploatacyjne wynikające z tworzenia obiektów badawczych i realizowanych badań.

Zapotrzebowanie na modele matematyczne zasobników energii

Zasobniki energii (mając różną naturę) z uwagi na swe parametry dają różne możliwości wykorzystania w układach zasilania określonych obiektów. Możliwości ich zastosowania w dużej mierze zależą od wartości gromadzonych energii, od sposobu ich użytkowania, od oczekiwań w zakresie szybkości wymiany ładunku (poziomy prądów ładowania i rozładowania oraz czasy realizacji tych procesów), od występujących strat i osiąganych sprawności, ale także od czynników ekologicznych. Istnieje wiele różnych rodzajów magazynów energii [1]. Dobór ich do zasilania określonego obiektu nie jest łatwy, szczególnie jeśli pobory energii charakteryzują się znaczną dynamiką, a zatem potrzebą dostępności dużej mocy, a jednocześnie wymagana jest ich wysoka zasobność, wiążąca się np. w samochodach elektrycznych z uzyskiwanym zasięgiem

jazdy. Modelowanie współpracy źródeł energii z rozważanymi odbiornikami uelastycznia proces ich właściwego doboru i osiągnięcia ich optymalnego wykorzystania (prawidłowego zarządzania ich pracą).

W celu opracowania najkorzystniejszego wariantu rozwiązania konstrukcyjnego wytwarzanego urządzenia niezbędne jest przeprowadzenie licznych, żmudnych, długotrwałych badań, realizowanych na różnych modelach fizycznych bądź prototypach. Budowa kolejnych modeli i realizacja badań są z reguły bardzo kosztowne. Bardziej opłacalnym rozwiązaniem jest zazwyczaj opracowanie precyzyjnego modelu matematyczno-informatycznego wytwarzanego urządzenia i realizacja wielowariantowych analiz teoretycznych na wypracowanym modelu matematyczno-informatycznym [2].

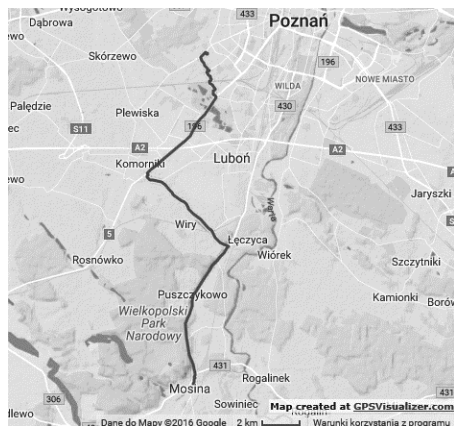
Przy indywidualnym wykorzystaniu poszczególnych zasobników energii znajomość ich matematycznych modeli jest istotna podczas analizy praktycznego wykorzystania tych magazynów. Pomaga ona projektantowi zrozumieć i przeanalizować ilościowo i jakościowo procesy w nich zachodzące (podczas ładowania i rozładowania), co może rzutować na prawidłowość realizowanego przez niego zadania projektowego i uzyskiwanych rezultatów jego pracy twórczej. Właściwe wykorzystanie tych informacji powinno prowadzić do efekcie do stworzenia korzystniejszego rozwiązania konstruowanego obiektu. Modelowanie tego procesu jest szczególnie złożone w przypadku elektrochemicznych źródeł energii, jakimi są akumulatory stosowane w pojazdach elektrycznych [2].

Model matematyczny akumulatora kwasowo-ołowiowego pracującego w stanach dynamicznych

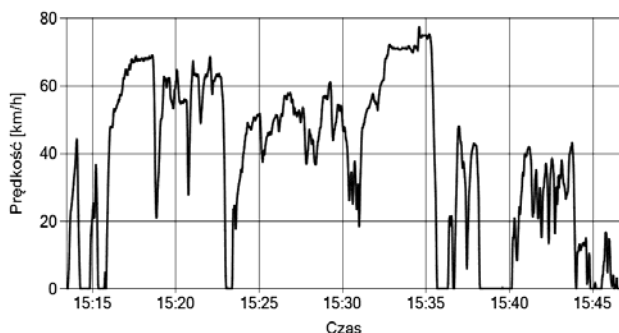
Analiza stanów dynamicznych w zasobnikach energii takich jak akumulatory kwasowo-ołowiowe jest skomplikowanym zagadnieniem ze względu na konieczność jednoczesnego uwzględnienia wielu parametrów wpływających na ich pracę [1,2]. Analizy takie przeprowadzane są przede wszystkim w celu oszacowania wartości prądów i napięć na zaciskach akumulatora podczas częstych zmian obciążenia przy różnych stanach naładowania ogniwa czy określenia wpływu temperatury na zachowanie się akumulatora, a także przy różnego rodzaju badaniach dotyczących trwałości tych urządzeń.

Każde tego typu zagadnienie wymaga zastosowania modelu akumulatora, umożliwiającego obliczenie zmian wartości istotnych jego parametrów. Model matematyczny pojedynczego ogniwa kwasowo-ołowiowego rzędu n -tego reprezentuje schemat elektryczny przedstawiony na rysunku 1 [3,4].

określenia zapotrzebowania na moc podczas jazdy. W tym celu dokonano rejestracji prędkości pojazdu poruszającego się po terenie mieszanym (częściowo po terenie zabudowanym i częściowo po terenie niezabudowanym – rys. 2), pokonując w czasie około 33 minut trasę o długości 21 km. Zarejestrowaną prędkość jazdy przedstawiono na rysunku 3.

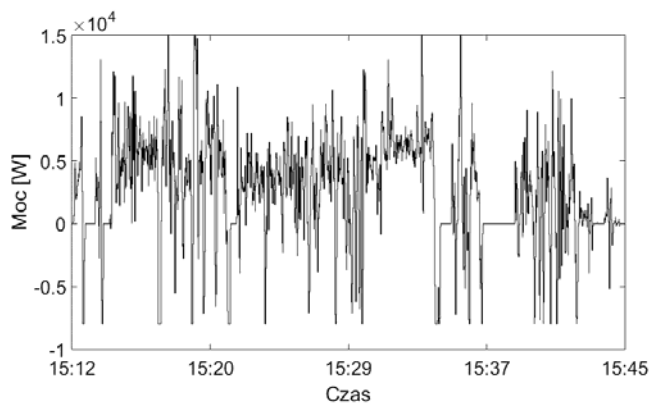


Rys. 2. Trasa, na której dokonano rejestracji prędkości jazdy



Rys. 3. Zarejestrowana prędkość jazdy samochodu osobowego

Następnie oszacowano zapotrzebowanie na moc pojazdu zakładając, że jest to pojazd o masie 1000 kg, poruszający się po nawierzchni asfaltowej, posiadający powierzchnię czołową równą 2,1 m². Ze względu na nizinne ukształtowanie terenu w rozważaniach pominięto zmianę wysokości pojazdu. Założono również, że w pojeździe nie jest włączona klimatyzacja, a oświetlenie pojazdu typu LED stanowi pomijalną część zapotrzebowania na energię. Wartości oporów toczenia oraz aerodynamiczne wyznaczone wykorzystując do tego wzory przedstawione w pracach [2,5]. Obliczone zapotrzebowanie na moc pojazdu podczas jazdy przedstawiono na rysunku 4.

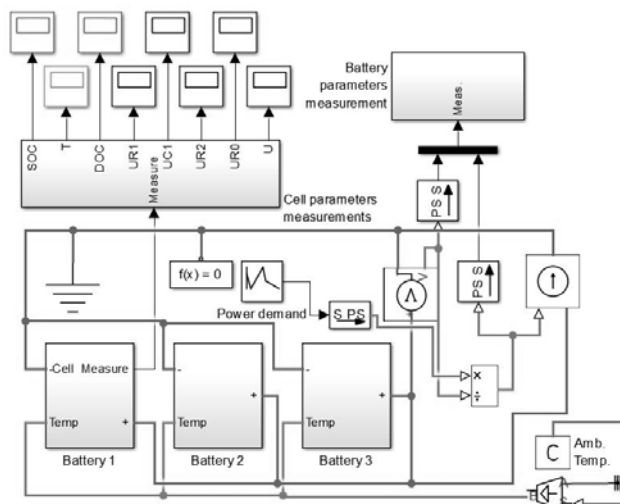


Rys. 4. Zapotrzebowanie na moc pojazdu w funkcji czasu

Podczas symulacji założono, że rozważany pojazd elektryczny wyposażony był w magazyn energii, składający się z 3 modułów zbudowanych z szeregowo połączonych 8 akumulatorów kwasowo-ołowiowych o napięciu 12 V i pojemności 50 Ah, a układ pracuje w temperaturze 20°C. Łączne napięcie zasobnika wynosi 96 V, a całkowita pojemność 150 Ah. Podczas analizy wykorzystano następujące parametry pojedynczego ogniwa (poniżej zamieszczono wybrane, najważniejsze parametry modelu, szczegółowo opisane w pracy [4]):

- $K_C = 1,15$,
- $E_{m0} = 2,1 \text{ V}$,
- $R_{00} = 0,0024 \Omega$,
- $R_{10} = 0,05 \Omega$,
- $R_{20} = 0,15 \Omega$,
- $A_0 = -0,5$,
- $A_{21} = -8,0$,
- $A_{22} = -5,75$,
- $\tau = 100 \text{ s}$.

Analizę zachowania się akumulatorów wykonano z wykorzystaniem środowiska MATLAB Simulink firmy MathWorks, w którym zaimplementowano opisany w poprzednim rozdziale model matematyczny wraz z odbiornikiem (rys. 5), który obciążał analizowane akumulatory mocą przedstawioną na rysunku 4.



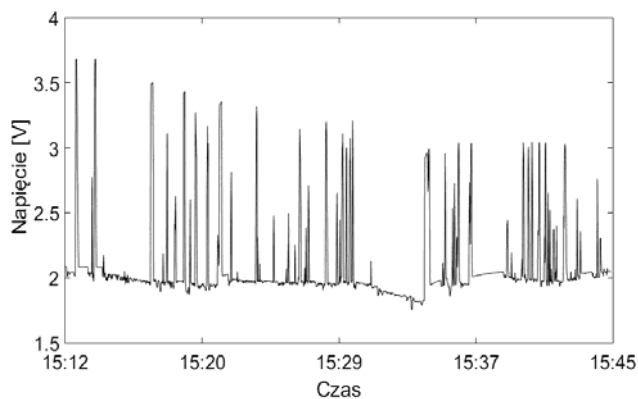
Rys. 5. Model zbudowany w środowisku MATLAB

W przedstawionym modelu założono, że wszystkie ogniwa są identyczne, jednakowo obciążone i chłodzone, temperatura otoczenia wynosi 25°C, a początkowy stan naładowania akumulatorów wynosi około 96%.

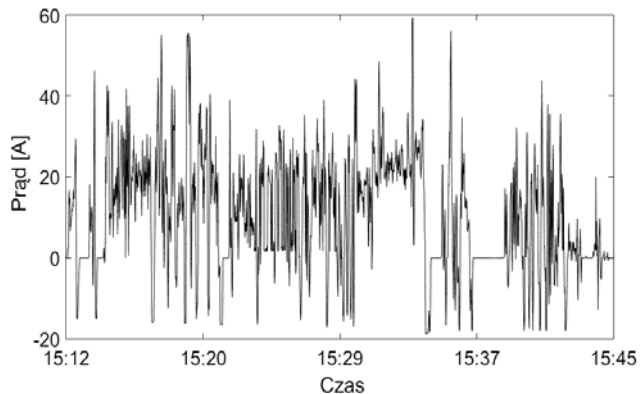
Poprawność przedstawionego modelu matematycznego i działania zrealizowanej symulacji sprawdzono i opisano w pracach [3,4].

W wyniku przeprowadzonej symulacji wyznaczono charakterystyki napięcia i prądu na pojedynczym ogniwie (rys. 6 i 7), stopnia i poziomu naładowania akumulatora (rys. 8 i 9) oraz zużycia energii podczas jazdy (rys. 10), z wyszczególnieniem:

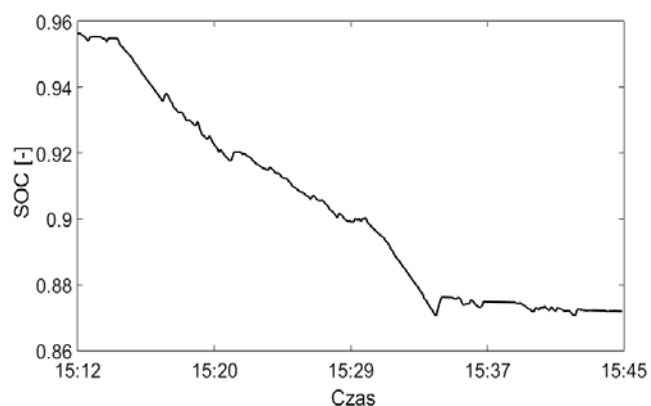
- energii potrzebnej do przyspieszania pojazdu (energii, którą pojazd potrzebowałby, aby pokonać zadany odcinek drogi bez możliwości odzysku energii) – rysunek 10 wykres 1,
- energii możliwej do odzyskania – rysunek 10 wykres 2,
- energii jaką pojazd zużyłby podczas pokonania zadanego odcinka jazdy przy założeniu, że byłby wyposażony w system hamowania odzyskowego – rysunek 10 wykres 3 (suma wartości z wykresów 1 i 2).



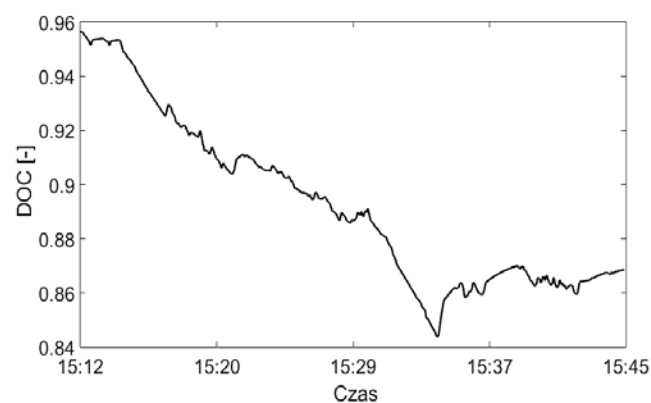
Rys. 6. Napięcie na pojedynczym ogniwo w funkcji czasu



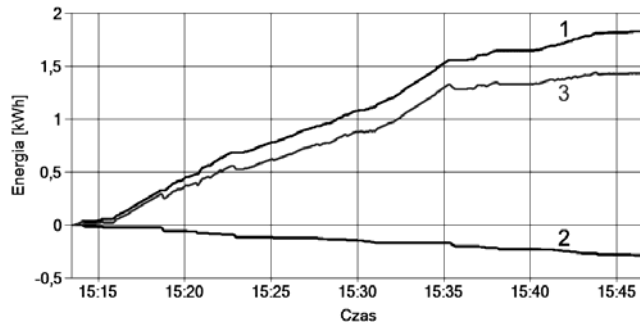
Rys. 7. Prąd przepływający przez pojedyncze ogniwo w funkcji czasu



Rys. 8. Stopień naładowania akumulatora (SOC) w funkcji czasu



Rys. 9. Poziom naładowania akumulatora (DOC) w funkcji czasu



Rys. 10. Energia użyta podczas przyspieszania (1), energia odzyskana podczas hamowania (2), energia potrzebna do przejechania zadanego odcinka drogi (suma energii potrzebnej do przyspieszania oraz odzyskanej) (3) w funkcji czasu jazdy.

Wnioski

Opracowana i wykonana przez autorów symulacja pozwala na szczegółową analizę parametrów elektrycznych oraz zjawisk cieplnych zachodzących w akumulatorze kwasowo-ołowiowym, tym samym umożliwia ona odwzorowanie zachowania się akumulatora w trakcie jazdy samochodem elektrycznym.

Poprawność analizowanego modelu zweryfikowano badając czas rozładowania akumulatora prądem dziesięcio- i dwudziestogodzinnym, co realizowano na podstawie definicji pojemności elektrycznej, zgodnie z zaleceniami normatywnymi.

Zastosowanie symulacji komputerowej umożliwia wielokrotną analizę zachowania się takich zasobników w stanach znacznie odbiegających od stanów znamionowych, dzięki czemu oszczędza się czas (symulacja komputerowa trwa znacznie krócej niż badania eksperymentalne) oraz pieniądze, ponieważ wielokrotnie powtarzane symulacje, przeprowadzane na rzeczywistych akumulatorach powodują ich szybką degradację i konieczność zakupu nowych magazynów energii. Warto też dodać, że ze względu na czasochłonność wykonywanych obliczeń warto realizować je z wykorzystaniem wielu procesorów [6].

Autorzy: dr inż. Leszek Kasprzyk, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: Leszek.Kasprzyk@put.poznan.pl,
dr inż. Karol Bednarek, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: Karol.Bednarek@put.poznan.pl,
mgr inż. Damian Burzyński, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: Damian.Burzynski@put.poznan.pl

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, 228-243
- [2] Kasprzyk L., Bednarek K., Dobór hybrydowego zasobnika energii do pojazdu elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), n.12, 129-132
- [3] Ceraolo M., New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries, *IEEE Trans. On Power Systems*, 15 (2000), n.4, 1184-1190
- [4] Jackey R. A., A simple, effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection (<http://mathworks.com>) [10-12-2015]
- [5] Kasprzyk L., Pojazdy elektryczne a problematyka doboru magazynu energii elektrycznej w aspekcie ochrony środowiska, *Europejski Wymiar Bezpieczeństwa Energetycznego a Ochrona Środowiska*, 2015, 691-708
- [6] Kasprzyk L., Bednarek K., Speeding up of electromagnetic and optimization calculations by the use of the parallel algorithms, *Przegląd Elektrotechniczny*, (85) 2009, n.12, 65-68