

doi:10.15199/48.2017.12.25

Modelowanie pracy superkondensatora zasilającego układ poprawiający bezpieczeństwo drogowe

Streszczenie. W pracy przedstawiono właściwości wybranych magazynów energii oraz przyczyny stopniowo rosnącej popularności superkondensatorów. Scharakteryzowano wybraną metodę modelowania superkondensatorów. Zamieszczono przykład wyznaczania parametrów modelu zastępczego na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Przedstawiono wyniki symulacji układu oświetlenia przejścia dla pieszych zasilanego modulem fotowoltaicznym współpracującym z superkondensatorowym magazynem energii.

Abstract. The paper presents the properties of selected energy stores and the reasons for the progressively increasing popularity of supercapacitors. The selected method of supercapacitor modelling was characterized. The example of determining the parameters of a model based on the measurements was made. The results of simulation of pedestrian lighting system powered by photovoltaic module cooperating with supercapacitors was presented. (Modelling of the supercapacitor operation of the power supply system to improve road safety).

Słowa kluczowe: superkondensatory, modelowanie, oświetlenie przejść dla pieszych

Keywords: supercapacitors, modelling, lighting pedestrian crossings

Wstęp

Przez ostatnie lata niemal na całym świecie zauważyć można stałą poprawę jakości życia. Wynika to przede wszystkim z intensywnego rozwoju metod i narzędzi do projektowania układów elektrycznych i elektronicznych [3,4]. Rozwój ten jest widoczny w obszarze wytwarzania struktur niskoenergetycznych, odnawialnych źródeł energii, jak i w nowych koncepcjach magazynowania energii elektrycznej [1,9]. Jednocześnie duży nacisk nakładany jest na wykorzystanie nowych technologii do poprawy bezpieczeństwa na drogach. Dzięki temu zakończył się okres, w których infrastruktura ruchu drogowego wspierana była jedynie przez rozwiązania oparte o oznaczenia pionowe (znaki i słupki) i poziome (oznaczenia malowane na jezdni). Coraz częściej widoczne są rozwiązania niekonwencjonalne, wykorzystujące źródła światła typu LED zasilane ze źródeł fotowoltaicznych oraz układy magazynujące energię. Wśród nich można wyróżnić aktywne punktowe elementy odblaskowe, znaki aktywne oraz autonomiczne oświetlenie przejść dla pieszych. W szczególności te ostatnie układy mogą przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa na drogach, ponieważ w Polsce aż 60% wypadków na przejściach dla pieszych ma miejsce w porze nocnej.

Najczęściej energię gromadzi się z wykorzystaniem wtórnych ogniw elektrochemicznych (akumulatorów). Niestety, z magazynowaniem energii elektrycznej w akumulatorach wiąże się wiele wad, z których największymi są niska trwałość magazynu, niewielka odporność na prądy o wartości większej od znamionowej oraz niekorzystny wpływ zarówno wysokich jak i niskich temperatur na ich pracę [5,10,11]. Alternatywą dla akumulatorów w niektórych aplikacjach stają się superkondensatory. Pomimo wysokiej ceny (kilkaset tysięcy USD/kWh) i różnych ograniczeń technicznych (np. kilkukrotnie mniejsza gęstość energii w porównaniu do ogniw elektrochemicznych), stanowią one grupę magazynów, z którymi wiąże się duże nadzieje [2].

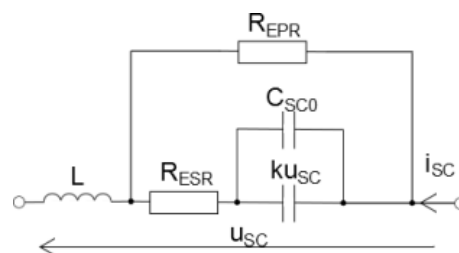
Z tego względu w pracy zajęto się tematyką modelowania pracy superkondensatorów na przykładzie współpracy z układem zasilającym oświetlenie przejścia dla pieszych pozyskującym energię elektryczną ze źródła fotowoltaicznego.

Modelowanie superkondensatora

Superkondensatory ze względu na swoją budowę można rozpatrywać jako układy posiadające cechy klasycznych ogniw elektrochemicznych i tradycyjnych

kondensatorów. Posiadają znacznie większe gęstości mocy niż ogniwa elektrochemiczne oraz znacznie większe gęstości energii niż klasyczne kondensatory. Specyficzna budowa superkondensatorów powoduje, że charakteryzują się one niskim napięciem pracy (zazwyczaj w zakresie od 2 V do 2,8 V, a w rozwiązaniach hybrydowych do 5 V). Z tego powodu łączy się je szeregowo w większe struktury określane mianem modułów superkondensatorowych. Dodatkowo instaluje się w nich układy kontrolujące parametry pracy pojedynczych superkondensatorów (w szczególności temperaturę i napięcie), co wynika z możliwości nierównomiernego ich obciążenia, spowodowanego dużą tolerancją pojemności (rzędu $\pm 20\%$) i ryzykiem uszkodzenia, a nawet wybuchu, w przypadku przekroczenia dopuszczalnych napięć.

Praktyczne wykorzystanie superkondensatorów, jak w przypadku innych nowatorskich rozwiązań, musi być poprzedzone wykonaniem odpowiednich symulacji i analiz, na przykład z wykorzystaniem modelu matematycznego [7]. Takie podejście znacznie zmniejsza czas niezbędny do budowy optymalnego rozwiązania. Najczęściej spotykaną w literaturze formą modelowania superkondensatorów jest zastępczy obwód elektryczny zbudowany z elementów RLC. Ich liczbę, wartości oraz sposób połączenia dobiera się w taki sposób, aby odwzorować z żądaną dokładnością procesy elektrostatyczne i elektrochemiczne w nich zachodzące [6]. Szczegółowe odwzorowanie tych zjawisk jest złożone i trudne w analizie, dlatego w praktyce stosuje się modele uwzględniające tylko procesy dominujące. Sposób wyboru optymalnego modelu superkondensatora został przedstawiony w pracy [7]. Na jej podstawie wybrano model pierwszego rzędu z zmienną wartością pojemności, przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Model superkondensatora o zmiennej pojemności pierwszego rzędu [6]

Zasadniczą częścią obwodu jest połączenie równoległe dwóch kondensatorów (C_{SC0} , ku_{SC}), modelujące liniowo zmieniającą się wartość pojemności superkondensatora w zależności od napięcia na zaciskach układu. Rezystancja szeregową R_{ESR} wynika z przepływającego, podczas ładowania i rozładowania, przez superkondensator prądu i_{SC} i odzwierocuje straty energii. Indukcyjności L dotyczy połączeń między okładzinami i zaciskami wejściowymi. Rezystancja równoległa R_{EPR} reprezentuje straty energii podczas samorozładowania. Wymienione parametry modelu superkondensatora wyznaczono na podstawie przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych.

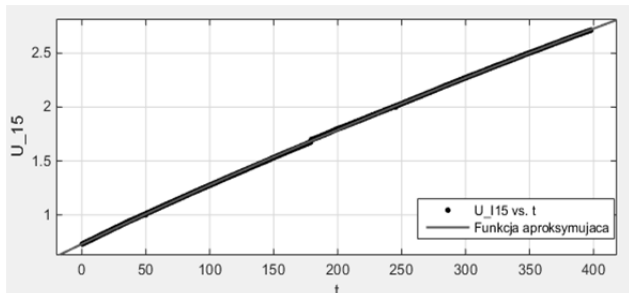
Wyznaczenie parametrów modelu superkondensatora

W celu wyznaczenia parametrów modelu wykonano pomiary laboratoryjne na superkondensatorach LSUC 2,7 V 3000 F Cylindrical Cell firmy LS Mtron. Do obciążenia i zasilania badanych układów posłużyła ładowarka Pulsar 3 firmy Elprog pozwalająca na cykliczne ładowanie i rozładowywanie ogniw elektrochemicznych różnego typu prądem z zakresu 0-25 A dla napięciu 0-60 V. Niezbędną akwizycję danych przeprowadzono za pomocą 20-kanalowego rejestratora GL800 firmy Graphtec.

Pojemność superkondensatora C_{SC} wyznaczono rejestrując napięcie na jego zaciskach z częstotliwością 5 próbek na sekundę, podczas ładowania stałym prądem $i_{SC} = 15$ A. Analizując przebieg tych wartości (zamieszczonych na rysunku 2), zauważalna jest liniowa zależność pojemności od wartości napięcia na zaciskach, którą opisano wzorem:

$$(1) \quad C_{SC}(u_{SC}) = C_{SC0} + ku_{SC}$$

gdzie: C_{SC0} – pojemność superkondensatora przy napięciu 0 V, k – współczynnik określający zależność pojemności superkondensatora od napięcia, u_{SC} – napięcie na zaciskach superkondensatora.



Rys. 2. Przebieg napięcia u_{SC} podczas ładowania stałym prądem $i_{SC}=15$ A

Napięcia u_{SC} w stanie ładowania można opisać za pomocą równania różniczkowego (2), którego rozwiązaniem jest zależność (3).

$$(2) \quad \frac{du_{SC}}{dt} = \frac{i_{SC}}{C_{SC0} + ku_{SC}}$$

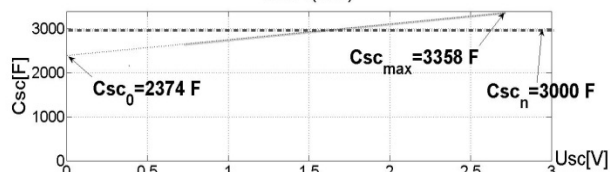
$$(3) \quad u_{SCA_S}(t) = \frac{C_{SC0}}{k} + \frac{\sqrt{2ki_{SC}t + (C_{SC0} + ku_{SC0})^2}}{k}$$

Rzeczywisty przebieg napięcia ładowania u_{SC} zaaprosymowano w środowisku Matlab za pomocą funkcji opisanej wzorem (3), a uzyskane wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 3. Na tej podstawie obliczono wartości współczynników $k = 363$ F/V i $C_{SC0} = 2374$ F.

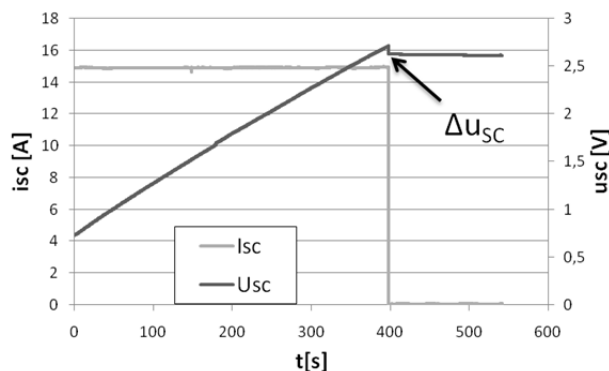
W celu wyznaczenia rezystancji szeregowej R_{ESR} , proces ładowania prądem $i_{SC} = 15$ A przerwano przy

napięciu znamionowym superkondensatora, uzyskując spadek napięcia Δu_{SC} (rysunek 4). Wartość szukanej rezystancji wyznaczono ze wzoru (4), uzyskując wynik 5,66 m Ω .

$$(4) \quad R_{ESR} = \frac{\Delta u_{SC}}{\Delta i_{SC}} \quad C_{SC}=f(u_{SC})$$

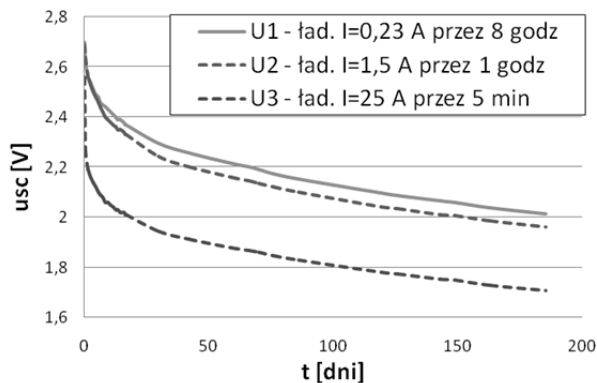


Rys. 3. Zależność pojemności superkondensatora C_{SC} od napięcia na jego zaciskach



Rys. 4. Zmiana napięcia Δu_{SC} na superkondensatorze przy skokowej zmianie prądu Δi_{SC}

Proces samorozładowania superkondensatora wynika ze złożonych reakcji chemicznych zachodzących w układzie i reprezentowany jest przez rezystancję równoległą R_{EPR} . Jej wartość najlepiej wyznaczyć eksperymentalnie, po przerwaniu procesu ładowania przy napięciu znamionowym – mimo braku obciążenia napięcie na zaciskach układu wykładniczo maleje. Przebieg zmienności funkcji napięcia zależny jest od wartości prądu ładowania oraz od czasu podtrzymania w stanie naładowania, co przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Proces samorozładowania superkondensatora dla różnych prądów ładowania

Z wykonanych pomiarów wynika, że przebieg napięcia samorozładowania podczas gwałtownych procesów ładowania (tzn. odbywających się z większą wartością prądu w krótszym czasie, np. u_3) wymaga opisu co najmniej dwiema stałymi czasowymi. Jedna z nich reprezentuje powolne rozładowanie w długim czasie, natomiast druga – dla początkowego przebiegu – odzwierciedla szybki spadek

napięcia w krótkim okresie. Jest to związane ze zjawiskiem relaksacji [2]. W rozpatrywanym przypadku układu zasilania oświetlenia przejścia dla pieszych (opisanego w kolejnym rozdziale), prąd ładowania z paneli fotowoltaicznych nie przekracza kilku amperów, dlatego do wyznaczenia rezystancji równoległej modelu wybrano pomiary dla napięcia u_2 (ładowanie superkondensatora prądem 1,5 A przez 1 godzinę). Po ich zaaprosymowaniu funkcją $u_{SCA_P}(t)$, opisaną zależnością (5), obliczono rezystancję równoległą uzyskując wynik $R_{EPR}=15,84k\Omega$.

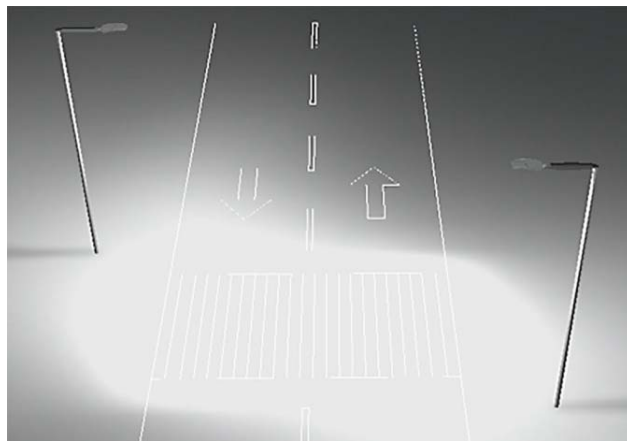
$$(5) \quad u_{SCA_P}(t) = u_{SC0} e^{-\frac{t}{R_{EPR} C_{SC}}}$$

Symulacja pracy układu zasilania oświetlenia przejścia dla pieszych

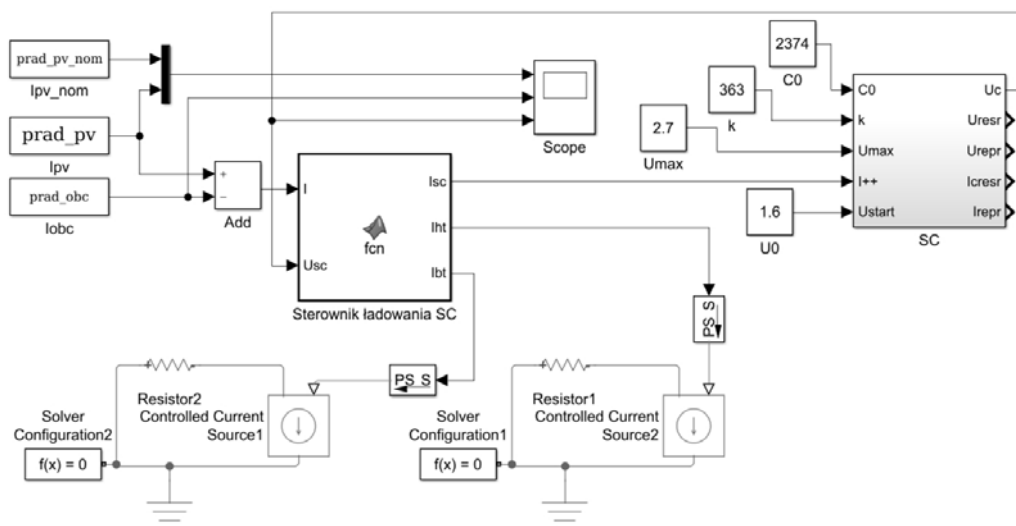
Aktualne wymagania formalne dotyczące oświetlenia przejścia dla pieszych określa norma PN-EN13201:2007 zalecająca znacznie wyższe natężenie oświetlenia mierzone na płaszczyźnie pionowej niż poziomej. Ponadto, sugeruje się takie umieszczenie oświetlenia przejścia dla pieszych, aby osoby były widoczne w dobrym ujemnym kontraście, to znaczy jako ciemna sylwetka na jasnym tle. Jednocześnie, ukierunkowanie opraw względem powierzchni przejścia powinno zapobiegać nadmiernemu olśnieniu kierowców.

Na potrzeby symulacji wybrano jezdnię o szerokości 7 m z przejściem dla pieszych szerokim na 4 m, do którego z

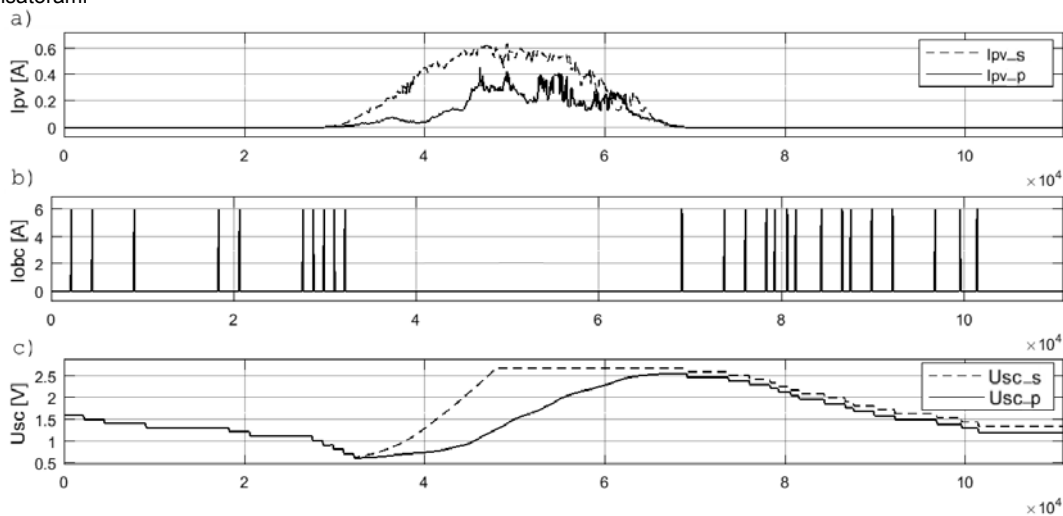
przyczyn technicznych nie można dostarczyć energii z sieci elektroenergetycznej. W celu spełnienia warunków prawidłowego oświetlenia wybrano dwie oprawy „Teceo 1“ firmy Schreder o mocy 51 W każda, rozmieszczone jak na rysunku 6.



Rys. 6. Geometria przejścia dla pieszych oświetlonego dwiema oprawami Teceo1 [13]



Rys. 7. Symulacja pracy autonomicznego oświetlenia przejścia dla pieszych zasilanego z modułu fotowoltaicznego współpracującego z superkondensatorami



Rys. 8. Zależność obliczonego prądu ładowania (a), prądu obciążenia (b) oraz napięcia (c) na pojedynczym superkondensatorze w funkcji czasu (w okresie jednej doby pochmurnego oraz pogodnego dnia stycznia)

Ponadto przewidziano załączenie oświetlenia na 30 s tylko w godzinach nocnych w średniej liczbie 25 razy na dobę. Wiąże się to z koniecznością użycia magazynu energii gromadzącego około 32 Wh, z uwzględnieniem jego przewymiarowania wynikającego z braku możliwości całkowitego rozładowania.

Do symulacji zasilania superkondensatora energią słoneczną wybrano moduł fotowoltaiczny 330J o mocy 30 W firmy Solar Electric Supply [14]. Zakładając 10% straty energii w układzie zasilającym oraz dzienną ekspozycję na promieniowanie słoneczne w warunkach STC, teoretyczna energia wyprodukowana w ciągu doby wynosi 135 Wh. Jednak w celu lepszego odwzorowania rzeczywistej pracy modułu fotowoltaicznego i generowanej przez niego energii [8,12] przyjęto, że panele słoneczne są oświetlone takim promieniowaniem jak zmierzono w dwóch wybranych dniach styczniowych (pochmurnym oraz słonecznym). Pomiary realizowano przez 24 godziny rejestrując wartości co 1 sekundę. Dla takich przypadków dokonano analizy zachowania modelu superkondensatora w czasie ładowania przez panel, z uwzględnieniem zarówno negatywnego wpływu położenia geograficznego, przejawiającego się w niewielkiej ilości dziennych godzin słonecznych, jak i stochastycznego charakteru pogody, mającego wpływ na ilość docierającego promieniowania słonecznego w danej chwili.

Ze względu na wymogi zasilania oraz zapotrzebowanie na energię odbiornika, do magazynowania energii wybrano 12 superkondensatorów typu LSUC 2,7 V 3000 F – dwie równoległe gałęzie składające się z sześciu szeregowo połączonych superkondensatorów. Uzyskano dzięki temu napięcie znamionowe magazynu o wartości 16,2 V i pojemności 1000 F (energii 36,48 Wh). Wykonane symulacje i wizualizacje ich wyników zrealizowano w oprogramowaniu Matlab. W przeprowadzonych symulacjach dokonano analizy pracy pojedynczego superkondensatora (założono, że pozostałe zachowują się identycznie).

Projekt symulacji w środowisku Matlab Simulink przedstawiono na rysunku 7. Dodano w nim sterownik zabezpieczający układ zasilania przed ładowaniem powyżej napięcia znamionowego superkondensatora

Autorzy:

mgr inż. Damian Gluchy, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Email: damian.gluchy@put.poznan.pl;
dr inż. Leszek Kasprzyk, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Email: leszek.kasprzyk@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Alemany, J., Magnago, F., Lombardi, P., Arendarski, B., Komarnicki, P., Multi-objective Optimization Model for Wind Power Allocation, *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, art. no. 1876934
- [2] Barrade P., Energy Storage and Applications with Supercapacitors, Laboratoire Electronique Industrielle, LEI STI-ISE, Ecole Polytechnic Federale de Lausanne, EPFL CH 1015 Lausanne.
- [3] Bednarek K., Jajczyk J, Effectiveness of optimization methods in heavy-current equipment designing, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr.12, p. 29-32
- [4] Bednarek K., Kasprzyk L., Suppression of higher harmonic components introduction to the networks and improvement of the conditions of electric supply of electrical equipment, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr.12b, p. 236-239
- [5] Burzyński D., Kasprzyk L, Modelling and simulation of lead-acid battery pack powering electric vehicle, *E3S Web of Conferences*, Nr 14, Vol. 01041, 2017

($U_n = 2,7$ V) oraz poniżej wartości krytycznej określonej na $U = 0,5$ V. Na rysunku 8a przedstawiono wykres prądu ładowania w funkcji czasu, odpowiadający irradiancji z pomiarów dla dnia o dużym zachmurzeniu (linia ciągła) oraz o prawie bezchmurnym niebie (linia przerywana). Ponadto na rysunku 8b zaprezentowano losowe zapotrzebowanie na energię przez oświetlenie LED (oświetlenie przejścia dla pieszych). W trzeciej części tego samego rysunku (8c) zamieszczono przebiegi napięcia na superkondensatorze odpowiadające poziomowi jego naładowania odpowiednio dla dnia o niewielkim (linia przerywana) i dużym (linia ciągła) zachmurzeniu. Zamieszczone przebiegi wskazują, że elementy układu zasilania zostały dobrane prawidłowo i w każdej rozpatrywanej sytuacji zapewniają ilość energii wystarczającą do prawidłowego funkcjonowania systemu oświetlenia.

Wnioski

Przeprowadzone symulacje wykazały, że generacja energii nawet w częściowo pochmurny zimowy dzień w warunkach klimatu Polski umożliwia zgromadzenie w magazynie dostatecznej ilości energii, aby zasilić autonomiczny układ oświetlenia przejścia dla pieszych w godzinach nocnych.

Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na analizy złożonych układów elektrycznych współpracujących z superkondensatorami ich modelowanie jest coraz bardziej potrzebne. Przedstawione w pracy modele oraz badania pozwalające na wyznaczenie poszczególnych parametrów umożliwiają analizę zachowania się tych magazynów bez wnikliwej znajomości zachodzących w nich zjawisk fizycznych, chemicznych i elektrochemicznych.

Potwierdzono też możliwość zastąpienia tradycyjnych ogniw chemicznych superkondensatorowym magazynem energii, który charakteryzuje się większą trwałością i odpornością na warunki środowiskowe. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest zwiększenie żywotności systemu oraz zmniejszenie negatywnego wpływu temperatury otoczenia na wartość pobieranej energii z magazynu.

- [6] Faranda R., Gallina M., Son D.T., A new simplified model of Double-Layer Capacitors. In *Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power*, 2007, p. 706-710
- [7] Gluchy D., Kasprzyk L., Tomczewski A.: Modelowanie superkondensatorów na potrzeby współpracy z OZE, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 89(2017), p. 335-346
- [8] Gluchy D., Kurz D., Trzmiel G.: Analysis of the influence of shading by horizon of PV cells on the operational parameters of a photovoltaics system, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90(2014), nr.4, p. 78-80
- [9] Jakubiec B., Computer model of electric vehicle drive system fed from hybrid energy storage system, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), Nr.12, p. 57-60
- [10] Kasprzyk L., Bednarek K., Elektromagnetyzm a zagrożenia gromadzenia energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.12b, p. 221-224
- [11] Kasprzyk L. Modelling and analysis of dynamic states of the lead-acid batteries in electric vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność* 19 (2017), nr.2, p. 229-236
- [12] Korzeniewska, E., Drzymała, A. Elektrownie fotowoltaiczne- aspekty techniczne i ekonomiczne, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr.12, p. 324-327.
- [13] <http://www.schreder.com/globalassets/pls-pl/products/documents/przejscia.pdf>
- [14] <https://www.solarelectricsupply.com/solar-electric-supply-ses-330j-solar-panels-525>